

DESEMPENHO DE SISTEMAS DE REGA

Lúis Santos Pereira

Resumo

A análise do desempenho dos sistemas de rega tem vindo a assumir interesse crescente devido às implicações económicas e ambientais que lhe estão associadas. Assim, discutem-se alguns indicadores e o seu significado.

Para a rega de gravidade, a rega por aspersão e a microrrega, a escolha incidu sobre a uniformidade de distribuição e o coeficiente de uniformidade para caracterizar os sistemas, e a eficiência da aplicação para caracterizar conjuntamente os sistemas e a sua gestão. Analisam-se para os três métodos de rega os factores de que dependem tais indicadores e, conseqüentemente, algumas opções para melhorar os desempenhos de tais sistemas.

Para os sistemas de distribuição em baixa pressão, analisam-se indicadores de fiabilidade, equidade e regularidade, os quais traduzem a qualidade do serviço e, conseqüentemente, têm implicações sobre o uso da água na exploração agrícola. Para os sistemas de transporte e distribuição em pressão optou-se pelos indicadores de fiabilidade e de variação da pressão, igualmente com implicações nos desempenhos dos sistemas de rega na parcela.

A análise acima descrita é completada com sugestões para a utilização dos indicadores de desempenho em projecto quando seja possível estabelecer níveis mínimos que tais indicadores devem assumir para que o projecto se considere satisfatório. Igualmente, chama-se à atenção para a necessidade de se estimular a avaliação de campo de sistemas em funcionamento para que os resultados sejam usados directamente no conselho aos regantes e gestores de rega, sirvam ao controlo de qualidade dos serviços das empresas de rega e, além disso, possam ser utilizados para melhorar progressivamente os projectos de rega.

Palavras chave: eficiência de aplicação, uniformidade de distribuição, desempenhos no uso da água, desempenhos no serviço de distribuição, fiabilidade.

INTRODUÇÃO

A análise do desempenho dos sistemas de rega, relativos quer à parcela, quer às redes de condução e distribuição de água, tem vindo a receber atenção continuada.

Os indicadores de desempenho foram inicialmente usados como indicadores da qualidade de um projecto ou da qualidade da gestão de um sistema. Posteriormente, no caso de sistemas colectivos de rega, foram considerados também como indicadores da qualidade de serviço ou do funcionamento. Mais tarde, foram tomados ainda como indicadores ambientais, embora de forma pouco precisa. Actualmente, dada a capacidade oferecida pelos

modelos computacionais para simular o funcionamento dos sistemas de rega, os indicadores podem ser utilizados em projecto, para estabelecer critérios a que os sistemas devem ser capazes de responder.

Procura-se hoje uma relação entre os desempenhos técnicos dos sistemas de rega e os resultados económicos que estes produzem, isto é procura-se encontrar meios expeditos para dar um significado económico suficientemente preciso a tais indicadores. No entanto, neste domínio há ainda um longo caminho a percorrer.

Quando há 30 anos se faziam projectos, os nossos critérios eram quase exclusivamente rela-

Centro de Estudos de Engenharia Rural, Instituto Superior de Agronomia. Tapada da Ajuda. 1349-017 Lisboa. Portugal
Telephone: + 351 21 3621575 / 3653100. Fax: + 351 21 3621575 / 3635031. E-mail: lspereira@isa.utl.pt

Artículo recibido el 30 de mayo de 2000, recibido en forma revisada el 16 de octubre de 2000 y aceptado para su publicación el 13 de diciembre de 2000. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

cionados com o funcionamento hidráulico dos sistemas e com a possibilidade de reduzir os custos de investimento. Hoje pode recorrer-se ao CAD, a sistemas periciais e a sistemas de apoio à decisão com recurso à análise multi-critério (Gonçalves et al., 1998). Para tirar proveito destas ferramentas, há que definir atributos quantificáveis para cada solução alternativa que respondam aos objectivos do projecto. Nestas condições, é necessário que os indicadores de desempenho possam ser interpretados no que respeita aos impactos sobre a produção, sobre os gastos excessivos de água, sobre a poluição por nitratos ou sobre o rendimento, por exemplo.

A nível da parcela, tem havido várias tentativas de formulação de relações entre desempenho e rendimento, de que são exemplos os trabalhos de Seginer (1987) e de Warrick e Yates (1987) e, entre nós, os de Sousa et al. (1993) para rega de superfície, e de Santos (1996) para a microrrega. No entanto, têm sido utilizados apenas relações polinomiais, cujos parâmetros são específicos, tornando impossível as generalizações obtidas. À escala das redes, a opção tem sido a de ligar o desempenho à qualidade do serviço, isto é à capacidade de o sistema fornecer os caudais e pressões previstos de acordo com os calendários ou condições de fornecimento fixados. Os correspondentes impactos económicos são muito difíceis de avaliar por serem ligados às consequências da rega na parcela.

Assim, neste artigo, limitamo-nos a apresentar alguns indicadores de desempenho e a esclarecer acerca do seu significado, porém indicando pistas para a sua interpretação em termos financeiros na expectativa de que a discussão assim estabelecida possa fomentar novas abordagens, porventura multidisciplinares, que conduzam quer a desenvolver novos indicadores quer a interpretações precisas dos mesmos.

DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE REGA NA PARCELA

Métodos de rega e indicadores de desempenho

Os métodos de rega podem classificar-se do modo seguinte (cf. Pereira e Trout, 1999):

- rega de superfície ou por gravidade, compreendendo a rega por alagamento, em canteiros tradicionais e sulcos curtos ou em canteiros com nivelamento de precisão, a rega por submersão em can-

teiros para arroz, a rega por infiltração por sulcos ou por faixas e a rega por escoamento livre, como é usada entre nós em lameiros e na rega de lima;

- rega por aspersão, com sistemas estáticos e disposição em quadrícula, fixos ou deslocáveis, com sistemas móveis de canhão ou rampa puxada por enrolador ou por cabo, e sistemas de rampa móvel pivotante ou de deslocação linear;

- rega localizada ou microrrega, compreendendo a rega por gotejamento, por golfadores (“bubblers”), por tubos perfurados ou porosos, a micro-aspersão e a rega sub-superficial por tubos perfurados ou porosos;

- rega subterrânea, realizada por controlo da profundidade da toalha freática, quase sem representação entre nós, mas que em Portugal se praticava a Sul da Ria de Aveiro e nas várzeas da Póvoa de Varzim.

A escolha dos métodos de rega é ditada por um grande número de factores, como se resume no Quadro. 1.

Tem sido enorme o desenvolvimento de equipamentos para a rega, principalmente para os sistemas em pressão, aspersão e microrrega, quer aspersores e emissores, quer sistemas de condutas e rampas, quer equipamentos de aplicação de fertilizantes e outros agroquímicos (fertirrega e quimirrega), quer ainda equipamentos de controlo e automatização.

Na rega por gravidade merecem destaque os desenvolvimentos conseguidos na introdução da rega por sulcos longos, com recurso à nivelção de precisão com controlo por “laser”, aos tubos janelados, aos tubos flexíveis, à automatização por cabo-rega, e à gestão com válvulas automáticas para rega intermitente, bem como a introdução da rega por canteiros com nivelção de precisão e alimentação semi- automática por tubos flexíveis janelados e por sistemas automatizados de cabo-rega (Pereira e Sousa, 1998).

A adopção de sistemas de apoio à decisão, de sistemas periciais e de outros sistemas inteligentes pode constituir ferramenta útil para tal escolha e para projecto, mas não dispensa a avaliação da rega no campo, que constitui a fonte essencial da informação a ser introduzida nos modelos e o meio privilegiado de aprendizagem dos utilizadores dos sistemas de informação.

O desempenho da rega na parcela pode ser avaliado (Merriam e Keller, 1978; Pereira, 1999)

Factores	Rega de superfície	Aspersão	Microrrega
Preço da água	Baixo	Médio	Alto
Fornecimento da água	Irregular	Regular	Contínuo
Disponibilidade da água	Abundante	Média	Limitada
Pureza da água	Não limitante	Sem sólidos	Elevada
Infiltrabilidade do solo	Baixa a média	Média a alta	Qualquer
Capacidade de armazenamento do solo	Alta	Média a baixa	Não limitante
Topografia	Plana e uniforme	Relevo suave	Irregular
Sensibilidade ao défice hídrico	Baixa	Moderada	Alta
Valor da produção	Baixo	Médio	Alto
Custo da mão-de-obra	Baixo	Médio	Alto
Custo da energia	Alto	Baixo	Moderado
Disponibilidade de capital	Baixa	Média a alta	Alta
Exigência em tecnologia	Limitada	Média a alta	Elevada

Quadro 1. Factores que favorecem a escolha do método de rega. Fonte: Pereira e Trout (1999).

através da uniformidade de distribuição e da eficiência de aplicação. A primeira tem como indicadores a uniformidade de distribuição e o coeficiente de uniformidade. A uniformidade de distribuição é definida por

$$DU = 100 (Z_{lq} / Z_{avg}) \quad (1)$$

em que Z_{lq} é a quantidade média (mm) infiltrada no menor quartil da área regada e Z_{avg} é a quantidade média (mm) infiltrada na parcela. Em rega por aspersão as alturas infiltradas são substituídas pelas pluviometrias observadas, enquanto em microrrega se utilizam os caudais debitados pelos emissores. O coeficiente de uniformidade é dado por

$$CU = 100 (1 - \sum X_i / n m) \quad X_i = |Z_i - m| \quad (2)$$

em que Z_i são as alturas de água ou caudais observados (mm), n é o número de observações e m é a média das observações Z_i . DU e CU estão relacionados entre si (Keller e Bliesner, 1990) e CU segue a distribuição normal.

Baixas uniformidades traduzem condições de excesso e de défice de infiltração em partes da parcela (cf. Burt et al. 1997) motivando perdas de produção devidas ao défice, ou ao excesso, de água no solo, e perdas de água e de fertilizantes onde a água infiltrada percola para além da zona radicular.

A eficiência de aplicação define-se frequentemente pela relação:

$$e_a = 100 (Z_{r,lq} / D) \quad (3)$$

em que $Z_{r,lq}$ é a quantidade média (mm) adicionada ao armazenamento na zona radicular no menor quartil da área regada e D é a dotação bruta aplicada (mm). Baixas eficiências indicam que parte da água aplicada não é utilizada para a produção, que pode ser de facto perdida se adicionada a lençóis freáticos ou águas superficiais degradadas.

Para além dos indicadores referidos (Eq. 1, 2 e 3) outros são utilizados, conforme a finalidade e o método de rega (cf. Burt et al., 1997; Pereira, 1999). No entanto os conceitos de base são muito próximos dos que se apresentam aqui.

O conceito de uniformidade (Eq. 2) foi introduzido por Christiansen em 1942 enquanto o de eficiência foi introduzido por Israelsen em 1932. O conceito de eficiência foi facilmente atractivo já que relaciona a quantidade de água consumida com a quantidade de água mobilizada (cf. Wolters, 1992). A ideia de melhorar um sistema ficava assim reduzida a melhorar a eficiência considerando-se que baixas eficiências significavam largas quantidades de água perdida. Porém, a pouco e pouco, foi-se constatando que tal não era assim, como se discute adiante, e que afinal o que caracterizava um sistema e, por isso, condicionava a eficiência, era a uniformidade (cf. Keller e Bliesner, 1990; Pereira, 1996 e 1999; Burt et al., 1997). Ao constatar-se que os indicadores de uniformidade têm um significado estatístico (Hart e Reynolds, 1965), tornou-se possível o seu uso para projectos, nomeadamente relacionando dotações de rega e níveis de produção com objectivos de uniformidade. Por seu lado, a eficiência tornou-se essencialmente um indicador de gestão e do potencial de poupança de água.

Rega de superfície

Em rega de superfície, a uniformidade de distribuição pode representar-se por uma relação funcional com as variáveis normalmente intervenientes nos modelos de simulação e projecto.

$$DU = f(q_{in}, L, S_o, I_c, n, F_a, t_{co}) \quad (4)$$

ilustrando a sua dependência em relação às variáveis caracterizadoras do sistema de rega, as variáveis de projecto q_{in} , caudal unitário, L , comprimento, S_o , declive (e sua irregularidade), I_c , infiltrabilidade do solo, n , rugosidade hidráulica, F_a , forma, e à variável de controlo utilizada pelo regante, t_{co} , tempo de duração da rega, que controla a quantidade aplicada.

Por seu lado, a eficiência de aplicação pode representar-se pela relação

$$e_a = f(q_{in}, L, S_o, I_c, n, F_a, t_{co}, SWD) \quad (5)$$

que mostra ser influenciada pelas mesmas variáveis de projecto e de controlo e pela variável de gestão SWD, défice hídrico na zona radicular na ocasião da rega. t_{co} e SWD são as variáveis controladas pelo regante e que determinam ser a rega excessiva ou insuficiente, praticada a tempo ou não; porém, o seu impacto é condicionado pelas restantes variáveis. Isto é, a eficiência depende das características do sistema e da condução da rega. Quando o caudal q_{in} possa ser controlado pelo regante, torn-se mais fácil para este conseguir melhorar quer DU, quer e_a .

Sousa et al. (1993, 1995) encontraram uma relação entre a uniformidade e as quantidades de água disponibilizadas na zona radicular e, consequentemente, com os níveis de produção a atingir na cultura do milho. Tal tornou possível simular igualmente as quantidades de água usada mas não consumida e o arrastamento de nutrientes para além da zona radicular e, assim, quantificar economicamente os impactos da nivelção de terrenos e, portanto, dos níveis de uniformidade a atingir. Porém, tendo-se recorrido a polinómios do 3º grau, os resultados não são extrapoláveis.

Direcção diferente, mais promissora, corresponde ao uso de sistemas de apoio à decisão (SAD), como se aplicou ao caso do Mondego (Gonçalves et al., 1998, Gonçalves e Pereira, 1999). O modelo utilizado consiste essencialmente na combinação de modelos de simulação da rega que geram os atributos de cada opção técnica, nomeadamente a partir da uniformidade e eficiência

simuladas, e de modelos de análise multi-critério para a ordenação e escolha das soluções satisfatórias, incluindo critérios de natureza económica.

Na aplicação ao Norte da China (Li, 1999) optou-se por criar informação caracterizando os sistemas de rega existentes, tipificar tais características e utilizar iterativamente os modelos de simulação de forma a conceber o melhoramento dos sistemas respondendo a objectivos de poupança de água representados através do par uniformidade e eficiência.

Por outro lado, Santos (1998) aplicou o conceito de uniformidade para comparar diversos sistemas de rega de superfície recorrendo às relações entre produção e uniformidade. De referir igualmente a adopção por Losada et al (1990) do coeficiente de uniformidade para estabelecer critérios de projecto em rega de superfície.

Rega por aspersão

Na rega por aspersão, a uniformidade pode representar-se pela relação funcional

$$DU = f(P, \Delta P, S, d_n, WDP, WS) \quad (6)$$

que mostra que a uniformidade depende essencialmente das variáveis de projecto, nomeadamente P , pressão de funcionamento, ΔP , variação da pressão dentro do sistema, S , espaçamentos entre aspersores, d_n , dimensão do bocal, WDP, forma de distribuição da água pelo aspersor, e WS, velocidade e direcção do vento que, apesar da sua variabilidade, deve ser considerada ao realizar o projecto.

Quanto à eficiência de aplicação, a relação funcional é

$$e_a = f(P, \Delta P, S, d_n, WDP, WS, I_c, i_a, t_i, SWD) \quad (7)$$

Constata-se que a eficiência depende das mesmas variáveis de projecto que DU, a que agora se juntam I_c , a infiltrabilidade do solo e i_a , a taxa de aplicação, e das variáveis de controlo t_i , duração da rega, e de gestão SWD, défice hídrico na zona radicular.

Verifica-se, portanto, que o desempenho dos sistemas de rega por aspersão depende, de forma marcante, da concepção dos sistemas, isto é, dos equipamentos escolhidos e das opções de projecto, tanto mais que as opções de gestão deixadas ao agricultor são condicionadas pelas informações de projecto que lhe são fornecidas, a que se deve juntar a manutenção dos sistemas.

Em aspersão, seguindo o trabalho pioneiro de Hart e Reynolds (1965), desenvolveram-se critérios de projecto satisfazendo objectivos de uniformidade (Seginer, 1987; Warrick e Yates, 1987), com realce para Keller e Bliesner (1990). Seguindo estes últimos, e recorrendo à simulação dos aspersores em quadrícula, desenvolveu-se o modelo AS-*PER* (Correia, 1997), cuja capacidade se deverá alargar, inclusive em termos económicos.

Os indicadores de uniformidade em aspersão têm sido utilizados na perspectiva económica: Mantovani et al. (1995) avaliaram os impactos do preço da água e da uniformidade sobre o uso da água, enquanto Tarjuelo et al. (1996) simularam diferentes opções de uso do solo quando influenciadas pela uniformidade.

Microrrega

Nos desempenhos em rega localizada ou microrrega passa-se algo de semelhante aos da aspersão. Assim, a relação funcional relativa à uniformidade

$$DU = f(P, \Delta P, x, Ec, Cv, FI) \tag{8}$$

indica a sua dependência exclusiva em relação às variáveis de projecto P, pressão de funcionamento, ΔP , variação da pressão no sistema, x, indicador do regime de escoamento do emissor, Ec, características dos emissores, Cv, coeficiente de variação de fabrico e FI, filtragem.

Quanto à eficiência, tem-se

$$e_a = f(P, \Delta P, x, Ec, Cv, FI, K_s, SW, t_i, \Delta t_i) \tag{9}$$

que mostra ser dependente das variáveis de projecto K_s , condutividade hidráulica do solo, e das mesmas variáveis que determinam DU, e das variáveis de gestão e controlo SW, teor de humidade do solo, t_i , duração da rega e Δt_i , intervalo entre regas.

Como para a aspersão, os desempenhos em microrrega dependem decisivamente da qualidade dos equipamentos e da qualidade dos projectos dos sistemas. A influência do regante é relativamente pequena, limitando-se à condução da rega, em geral seguindo os conselhos do projectista, e à manutenção.

À semelhança da aspersão, também em microrrega se desenvolveram critérios de projecto em conformidade com objectivos de uniformidade (Bralts et al., 1987; Warrick e Yates, 1987; Keller e

Bliesner, 1990). Também seguindo estes conceitos se desenvolveu um modelo de simulação e projecto para gota-a-gota e micro-aspersão (Pedras, 1997). A relação entre uniformidade, produção e rendimento foi explorada por Santos (1996) para o tomate de indústria.

Como se pode constatar desta análise, é vasto o campo a explorar para uso dos indicadores de desempenho dos sistemas de rega da parcela, nomeadamente se puderem ser interpretados integrando critérios físicos, económicos e ambientais.

DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE REGA COLECTIVOS

Aspectos gerais

Durante muito tempo, usou-se o conceito de eficiência como principal indicador do uso da água em sistemas de condução e distribuição. Definiram-se assim as eficiências de transporte, de distribuição e do projecto, ou do sistema, pelas relações entre as quantidades de água fornecidas pelas redes, a jusante, e as quantidades fornecidas às redes, a montante (Wolters, 1992). Um exemplo de aplicação à rede do Sorraia consta de Rijo e Pereira (1987). Este conceito foi, porém, utilizado de forma menos apropriada ao considerar-se serem perdas as quantidades representadas pelas fracções não utilizadas. De facto, em muitos casos, tais fracções são utilizadas ou utilizáveis a jusante dos sistemas considerados, como é o caso do sistema do Sorraia acima referido, e, portanto, não são perdas.

Este facto levou Jensen (1996) a propor a adopção do termo fracção de uso consumptivo para designar a relação entre a quantidade de água consumida pelas culturas e a quantidade mobilizada por um sistema de rega. Allen et al. (1997) e Burt et al. (1997) foram mais longe e propuseram nova terminologia, definindo:

- A fracção evaporada como a razão entre a quantidade de água evaporada pelas culturas, a partir do solo ou evapotranspirada pelos ecossistemas naturais que usam água de rega, Q_{ET} , e a quantidade mobilizada para o sistema de rega, Q_{DIV}

$$EF = Q_{ET} / Q_{DIV} \tag{10}$$

- A fracção não reutilizável, indicador do potencial para conservação, como a relação entre a quantidade de água perdida no sistema por ter sido adicionada a águas superficiais ou subterrâneas sa-

linas ou degradadas e, por isso, não reutilizável, Q_{NR} , e a quantidade mobilizada

$$NRF=Q_{NR}/Q_{DIV} \quad (11)$$

- A fracção reutilizável, razão entre a quantidade de água não consumida no sistema mas reutilizável a jusante por não ter sido degradada, Q_{RU} , e a quantidade mobilizada

$$RF=Q_{RU}/Q_{DIV} \quad (12)$$

- A fracção consumida, ou tornada indisponível, da responsabilidade do utilizador, razão entre as quantidades evaporada, não reutilizável e exportada da bacia e a quantidade mobilizada

$$CF=(Q_{ET}+Q_{NR}+Q_{EXP})/Q_{DIV} \quad (13)$$

que corresponde à soma das fracções evaporada e não utilizável ($CF=EF+NRF$).

A adopção dos indicadores acima referidos está ainda por fazer já que envolve métodos de avaliação algo difíceis. Porém, deverá permitir uma melhor formulação dos problemas em gestão e planeamento de recursos hídricos, deverá ser útil para cálculos económicos, e permite relacionar os sistemas da parcela com os sistemas colectivos.

Outros indicadores têm sido frequentemente utilizados em redes de rega de superfície, quer para traduzir condições de serviço, tais como a fiabilidade e a equidade, que referimos abaixo, ou servindo para a comparação entre sistemas de rega, como se ensaiou para diversos sistemas portugueses (Frazão e Pereira, 1993).

Sistemas de distribuição em baixa pressão

A tendência actual nas redes de distribuição para rega de gravidade é a de substituição das condutas em superfície livre por condutas em baixa pressão dadas as vantagens que lhe estão associadas: melhor operabilidade dos sistemas, mais rápida resposta hidráulica, maior flexibilidade e capacidade de responder às variações da procura, interferência mínima com as operações culturais e o tráfego agrícola e melhor ambientalidade, nomeadamente em relação com a qualidade de serviço e a poupança de água.

Desenvolveu-se uma nova metodologia de projecto (Douieb et al. 1998) constando de: (a) geração dos hidrogramas horários de procura pela realização do balanço hídrico das áreas servidas por

cada tomada tomando em conta as combinações solo-cultura-método de rega; (b) optimização das condutas para múltiplos regimes de escoamento utilizando os caudais horários gerados para o período de ponta; (c) simulação do desempenho das redes para as configurações de tomadas abertas correspondentes a cada hora durante o período de ponta e eventual redimensionamento da rede quando os indicadores calculados revelem insuficiências no serviço simulado.

Adoptaram-se três indicadores: fiabilidade, regularidade e equidade no fornecimento dos caudais nas tomadas. O seu cálculo baseia-se na comparação entre os caudais simulados fornecidos nas tomadas (Q_j) e os caudais nominais (Q_n) das mesmas tomadas. Assim, se for H_j a carga disponível na tomada j ($j = 1, 2, \dots, N$) e se for H_{min} a carga mínima requerida para que possa ser fornecido o caudal nominal, ter-se-á:

$$\begin{aligned} Q_j &= Q_n & H_j &\geq H_{min} & (14) \\ Q_j &= K_{j,o} H_j & (K_{j,o} < 1) & & 0 < H_j < H_{min} \\ Q_j &= 0 & & & H_j \leq 0 \end{aligned}$$

Então, para o período de ponta, para o qual se conhece o hidrograma horário de procura e que corresponde ao intervalo de tempo T (horas), pode simular-se o funcionamento da rede para um número T de regimes de escoamento com R tomadas abertas em cada regime e, conseqüentemente, comparar os caudais fornecidos com os caudais nominais pretendidos. De tal comparação resulta a definição dos indicadores de desempenho:

- **Fiabilidade:** probabilidade de os caudais fornecidos Q_j serem iguais aos caudais nominais Q_n referida a todo o período de ponta e, para cada configuração da rede quanto a tomadas abertas, a todas as tomadas em funcionamento simultâneo.

- **Equidade:** probabilidade de os caudais fornecidos Q_j em qualquer local da rede serem iguais aos caudais nominais Q_n para cada configuração da rede que possa ocorrer.

- **Regularidade:** probabilidade de os caudais fornecidos Q_j em qualquer instante para cada tomada j serem iguais aos caudais nominais Q_n dessa tomada.

Os indicadores de desempenho podem ser calculados tanto para uma rede em projecto como para uma rede em funcionamento. Neste caso a ge-

ração dos hidrogramas de procura deve ser realizada com base na ocupação cultural e nas práticas de rega existentes. Tal procedimento pode servir para identificar a necessidade de reabilitação ou modernização de uma rede e, subseqüentemente, para projectar a nova rede.

Na Fig. 1 apresenta-se um exemplo de avaliação dos desempenhos de uma rede de distribuição em baixa pressão do sistema de rega do vale do Sorraia. A Fig. 1 a) revela que a fiabilidade dos fornecimentos é menos boa durante as horas diurnas de funcionamento, isto é que a rede actual responde dificilmente à procura durante as horas normais de rega. De facto, não seria capaz de tal resposta se larga fracção da área servida não estivesse ocupada com arroz, cuja rega ocorre predominantemente no período nocturno. Logicamente, o indicador equidade (Fig. 1 b) revela que, durante as horas diurnas, a distribuição se faz de forma diferente entre as diversas tomadas, enquanto o indicador regularidade (Fig. 1 c) mostra que a variabilidade dos caudais fornecidos é elevada em determinados troços da rede, cujas condutas requerem quer novos traçados, quer redimensionamento apropriado.

Sendo os indicadores acima definidos em termos de probabilidade, a questão que se põe é a de associar aos indicadores um valor económico ou, por outras palavras, reconhecer os benefícios associados a desempenhos elevados e/ou os custos associados a desempenhos menos bons. Sendo que os custos da rede são conhecidos e objecto do processo de optimização, o problema põe-se na avaliação dos impactos sobre o rendimento da exploração agrícola, que necessitará de formulação apropriada.

Sistemas de rega sob pressão

Durante os últimos anos, entre as principais inovações contam-se o aperfeiçoamento dos métodos de optimização das redes de condução e distribuição, recorrendo à programação linear e a procedimentos iterativos de busca dos diâmetros mais económicos, e o uso de indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço.

Desenvolvimentos recentes na concepção e avaliação das redes de rega, apontam para o uso de modelos de geração de hidrogramas de procura, utilização dos caudais assim gerados para definição de múltiplas combinações de tomadas em funcionamento simultâneo - designadas configurações de tomadas abertas - a utilizar no cálculo de optimização das condutas e na simulação do funcionamento

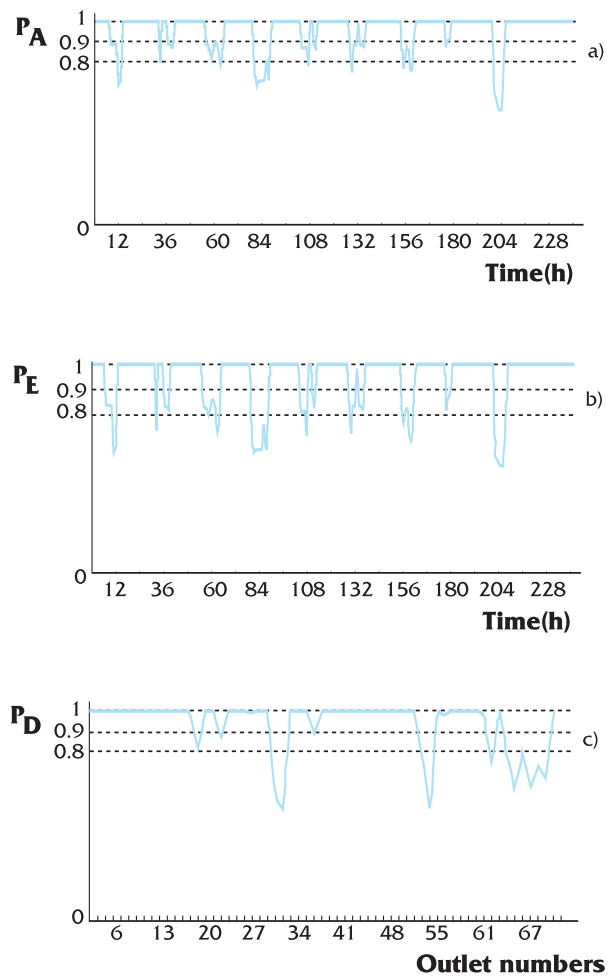


Figura 1. Fiabilidade (a), equidade (b) e regularidade (c) no fornecimento de caudais nas tomadas da rede de distribuição em baixa pressão do sector 11 do sistema de rega do Vale do Sorraia durante o decêndio de ponta (as linhas horizontais referem-se aos limites de desempenhos considerados muito bom e bom). Fonte: Douieb et al. (1998).

das redes, quer se trate de redes em projecto, quer de redes em exploração.

A avaliação do desempenho de uma rede de rega em pressão faz-se recorrendo a dois indicadores, o défice relativo de pressão e a fiabilidade do serviço nas tomadas (Lamaddalena e Pereira, 1998).

Considere-se uma rede concebida para funcionar com o caudal total Q_r e em que o caudal nos tomadas é d . Nestas condições, qualquer configuração deverá ter um número $Kr = Q_r/d$ de tomadas abertas. Dir-se-á que uma qualquer configuração r de Kr tomadas abertas num total de N tomadas da rede é satisfeita quando a carga em qualquer das tomadas abertas não for inferior à carga mínima re-

querida, isto é $H_{j,r} \geq H_{\min}$ ($r = 1, 2, \dots, C; j = 1, 2, \dots, N$) Define-se então o défice relativo de pressão em cada tomada:

$$\Delta H_{j,r} = (H_{j,r} - H_{\min}) / H_{\min} \quad (15)$$

Recorrendo ao mesmo conceito de satisfação dos fornecimentos em qualquer tomada j e para qualquer configuração r , o indicador fiabilidade define-se através da relação

$$\alpha_{j,r} = \sum I_{h_{j,r}} I_{p_{j,r}} / \sum I_{h_{j,r}} \quad (16)$$

em que $I_{h_{j,r}} = 1$ para cada tomada aberta e $I_{h_{j,r}} = 0$ para as tomadas fechadas, sendo $I_{p_{j,r}} = 1$ sempre que se verificarem condições de satisfação e $I_{p_{j,r}} = 0$ no caso contrário.

Como se pode observar na Fig. 2, o défice relativo de pressão permite identificar quais as tomadas deficitárias e a grandeza de tais défices, bem como os troços de rede em que os problemas se verificam. Quando utilizado na fase de projecto, este indicador permite reformular as redes aceitando uma determinada probabilidade para tais défices bem como fixar limiares para o valor máximo aceitável para os défices de acordo com o equipamento a utilizar na parcela. Por seu lado, a fiabilidade do serviço em termos de satisfação das cargas disponibilizadas nas tomadas (Fig. 3) complementa a informação dada pelo indicador anterior ao fornecer informação clara sobre a qualidade do serviço nas tomadas. Como se exemplifica na Fig. 3, constata-se que, no sistema avaliado, são numerosas as to-

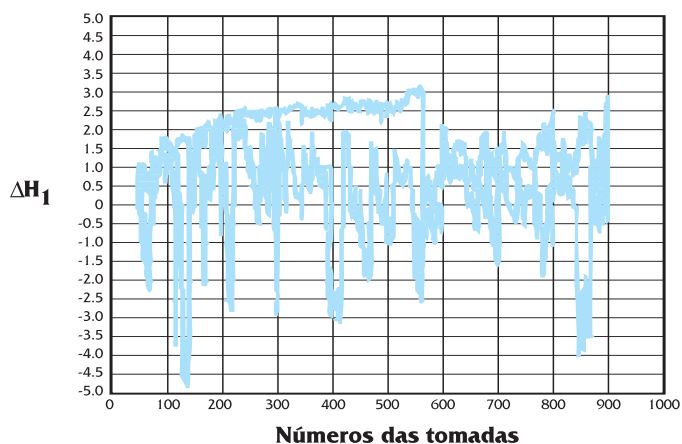


Figura 2. Curvas envolventes dos défices de pressão relativa simulados para as tomadas do sistema de rega de Sinistra Ofanto, Capitanatta, Foggia, Itália, para um caudal total $Q_r = 1200 \text{ l s}^{-1}$. As simulações foram realizadas com geração aleatória da procura e recorrendo a 1000 configurações de 120 tomadas abertas em simultâneo. Fonte: Lamaddalena e Pereira (1998).

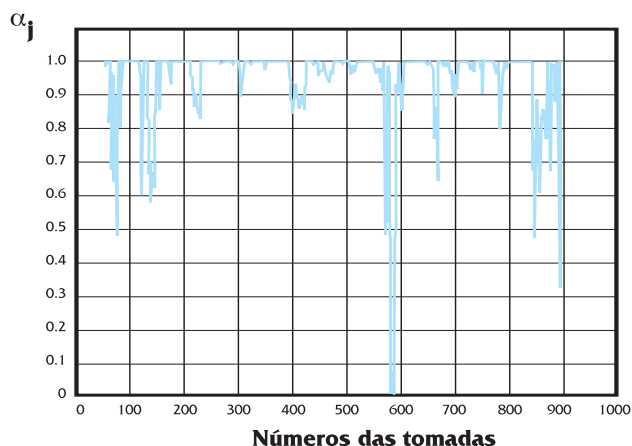


Figura 3. Fiabilidade do serviço nas tomadas do sistema de rega de Sinistra Ofanto, projecto de rega de Capitanatta, Foggia, Itália (cf. Fig. 2). Fonte: Lamaddalena e Pereira (1998).

madas em que a fiabilidade do serviço é baixa, inferior a 0.8, ocorrendo troços em que o serviço é quase sempre deficitário, requerendo por isso reformulação da rede.

Sendo que o próximo passo será o de integrar estes modelos de cálculo num sistema de apoio à decisão, o próximo problema a resolver é o da formulação dos atributos económicos e ambientais que estarão associados a cada solução gerada.

CONCLUSÃO

A revisão de alguns indicadores de desempenho dos sistemas de rega da parcela e de condução e distribuição mostra a sua utilidade como ferramentas de avaliação, tanto para projecto como para gestão dos sistemas de rega.

No caso dos indicadores dos sistemas de rega na parcela, mostrou-se existir uma relação evidente entre tais indicadores e os benefícios económicos ligados à utilização de sistemas de rega possuidores de bons desempenhos. Identificou-se, no entanto, a necessidade de novas aproximações que permitam concretizar a valorização dos benefícios em relação com os indicadores de desempenho, nomeadamente para basear decisões de projecto e decisões de melhoramento dos sistemas de rega.

Quanto aos indicadores relativos a redes de rega, analisaram-se indicadores recentemente propostos que podem ser úteis para o planeamento e gestão de recursos hídricos, para a valorização da água, e que permitem reconhecer a qualidade do serviço de fornecimento de água aos regantes.

Também nestes casos se constata vir a ser benéfico relacionar os indicadores com outros quantificadores económicos de forma a melhor basear as decisões de gestão e de projecto.

LISTA DE SÍMBOLOS

C	número total de configurações de tomadas abertas
CF	fracção consumida
CU	coeficiente de uniformidade (%)
C_v	coeficiente de variação de fabrico dos emissores (%)
D	dotação bruta aplicada (mm)
d	caudal nas tomadas (l/s)
d_n	diâmetro do bocal (mm)
DU	uniformidade de distribuição (%)
e_a	eficiência de aplicação (%)
Ec	índice relativo às características dos emissores
EF	fracção evaporada
F_a	índice de forma
FI	índice relativo às características de filtragem
H_j	carga hidráulica disponível na tomada j (m)
H_{j,r}	carga hidráulica na tomada j na configuração r (m)
H_{min}	carga mínima nas tomadas (m)
i_a	taxa de aplicação (mm/h)
i_c	infiltrabilidade (mm/h)
ih_{j,r}	indicador de abertura da tomada j
ip_{j,r}	indicador de condições de satisfação na tomada j
j	designação das tomadas
K_{j,o}	coeficiente característico da regulação da pressão
K_r	número de tomadas abertas
K_s	condutividade hidráulica do solo (m/dia)
L	comprimento (m)
m	média das observações Z _i (mm)
N	número total de tomadas da rede
n	número de observações rugosidade hidráulica
NRF	fracção não reutilizável
P	pressão de funcionamento (kPa)
Q_{DIV}	quantidade mobilizada para o sistema de rega (mm)
Q_{ET}	quantidade de água evaporada ou evapotranspirada (mm)
Q_{EXP}	quantidade de água exportada da bacia (mm)
q_{in}	caudal unitário (l/s/m)
Q_j	caudais simulados fornecidos nas tomadas (l/s)
Q_n	caudais nominais das tomadas (l/s)
Q_{NR}	quantidade de água não consumida mas não reutilizável (mm)

Q_r	caudal total fornecido à rede (l/s)
Q_{RU}	quantidade de água não consumida reutilizável (mm)
R	número de tomadas abertas em cada regime de escoamento
r	designação de uma configuração de K _r tomadas abertas
RF	fracção reutilizável
S	espaçamentos entre aspersores (m)
S_o	declive (m/m)
SW	teor de humidade do solo ao regar (mm/mm)
SWD	défice hídrico na zona radicular na ocasião da rega (mm/mm)
T	número de regimes de escoamento
t_{co}	tempo para o corte (h)
t_I	tduração da rega (h)
WDP	índice relativo à forma de distribuição da água pelo aspersor
WS	velocidade do vento (m/s)
x	expoente característico do regime de escoamento dos emissores
X_i	desvio absoluta das observações à média (mm)
Z_{avg}	quantidade média infiltrada na área regada (mm)
Z_i	alturas de água observadas (mm)
Z_{lq}	quantidade média infiltrada no menor quartil da área regada (mm)
Z_{rlq}	quantidade média adicionada ao armazenamento na zona radicular no menor quartil da área regada (mm)
α_{j,r}	indicador de fiabilidade
ΔH_{j,r}	défice relativo de pressão
ΔP	variação da pressão dentro do sistema (%)
Δt_I	intervalo entre regas (dias)

BIBLIOGRAFIA

- Allen, R.G., Willardson, L.S., Frederiksen, H.D. (1997). Water use definitions and their use for assessing the impacts of water conservation. In: J.M. de Jager, L.P. Vermes, e R. Ragab (eds.) Sustainability Irrigation in Areas of Water Scarcity and Drought (Proc. ICID Workshop, Oxford), British Nat. Com. ICID, Oxford, pp. 72-81.
- Bralts, V.F., Edwards, D.M., Wu, I-Pai (1987). Drip irrigation design and evaluation based on the statistical uniformity concept. In: D. Hillel (ed.) Advances in Irrigation (vol. 4), Academic Press, Orlando, pp. 67-117.
- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E. (1997). Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. J. Irrig. Drain. Engng. 123: 423-442.
- Christiansen, J.E. (1942). Irrigation by sprinkling. Calif. Ag.

- Exp. Sta. Bull. 670. University of California, Berkeley.
- Correia, S. (1997). Modelo de simulação de rega por aspersão em instalações em quadrícula. Tese de Mestrado, ISA, Lisboa.
- Douiéb, A., Bounoua, R., Pereira, L.S., Sousa, P.L., Lamadadena, N. (1998). New approaches to design and performance analysis of low pressure distribution systems. In: L.S. Pereira e J.W. Gowing (eds.) *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage*, E & FN Spon, London, pp. 256-265.
- Frazão, F.F., Pereira, L.S. (1993). Application of indicators to compare the performance of irrigation systems, In: Proc.15th. Int. Congress ICID, The Hague, Q44, R29, pp. 365-376.
- Gonçalves, J.M., Pereira, L.S. (1999). Design of sustainable on-farm surface irrigation systems with a decision support system. In: A. Musy, L.S. Pereira e M. Fritsch (eds.) *Emerging Technologies for Sustainable Land Use and Water Management*. CD-ROM, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., Sousa, P.L. (1998). Environmental criteria in a decision support system for surface irrigation design. In: L.S. Pereira e J.W. Gowing (eds.) *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage*, E & FN Spon, London, pp. 111-119.
- Hart, W.M., Reynolds, W.N. (1965). Analytical design of sprinkler systems. *Transactions of the ASAE* 8 (1): 83-85, 89.
- Israelsen, O. W. (1932). *Irrigation Principles and Practices*. John Wiley & Sons, New York.
- Jensen, M. E., 1996. Irrigated agriculture at the crossroads. In: L. S. Pereira, R. A. Feddes, J. R. Gilley, e B. Lesaffre (eds.) *Sustainability of Irrigated Agriculture*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp. 19-33.
- Keller, J. and Bliessner, R. D. (1990). *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Lamadadena, N. e Pereira, L.S. (1998). Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. In: L.S. Pereira e J.W. Gowing (eds.) *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage*, E & FN Spon, London, pp. 247-255.
- Li, Y.N. (1999). Basin Irrigation in North China: Evaluation, Modelling and Design for Improvement. Tese de Doutoramento. ISA, UTL, Lisboa.
- Losada, A., Juana, L., Roldán, J. (1990). Operation diagrams for irrigation management. *Agric. Water Manage.* 18: 289-300.
- Mantovani, E. C., Villalobos, F.J., Orgaz, F., Fereres, E. (1995). Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agri. Water Manage.* 27: 243-257.
- Merriam, J. L., Keller, J. (1978). *Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management*. Dept. Agri. and Irrig. Engng, Utah St. University, Logan.
- Pedras, M.C. (1997). Modelo de simulação de uma rede de rega localizada. Tese de Mestrado, ISA, Lisboa.
- Pereira, L. S. (1996). Inter-relationships between irrigation scheduling methods and the on-farm irrigation systems. In: M. Smith, L.S. Pereira, J. Berengena, B. Itier, J. Goussard, R. Ragab, L. Tollefsone e P. van Hoffwegen (eds.) *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice*. FAO Water Reports 8, ICID and FAO, Rome, pp. 91-104.
- Pereira, L. S. (1999). Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agric. Water Manage.* 40 (2): 153-169.
- Pereira, L.S., Sousa, P.L. (1998). Irrigation de surface. In: J.R. Tiercelin (ed) *Traité d'irrigation*. Lavoisier, Paris, pp. 450-471.
- Pereira, L.S. e Trout, T.J. (1999). Irrigation methods. In: H.N. van Lier, L.S. Pereira, e F.R. Steiner (eds.) *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, vol. I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 297-379.
- Rijo, M. Pereira, L.S. (1987). Measuring conveyance efficiencies to improve irrigation water management. *Irrig. Drain. Syst.* 1:267-276.
- Santos, F.L. (1996). Quality and maximum profit of industrial tomato as affected by distribution uniformity of drip irrigation system. *Irrig. Drain. Syst.* 10: 281-294.
- Santos, F.L. (1998). Evaluation of alternative irrigation technologies based upon applied water and simulated yields. *J. Agric. Engng. Res.* 69: 73-83.
- Seginer, I. (1987). Spatial water distribution in sprinkler irrigation. In: D. Hillel (ed.) *Advances in Irrigation* (vol. 4), Academic Press, Orlando: 119-168.
- Smith, M., Pereira, L.S. Berengena, J., Itier, B., Goussard, J., Ragab, R., Tollefson, L., Van Hoffwegen, P. (eds), (1996). *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice*. FAO Water Report 8, ICID and FAO, Rome.
- Sousa, P. L., Dedrick, A. R., Clemmens, A. J., Pereira L. S. (1993). Benefits and costs of laser-controlled leveling, A case study. In: Proc.15th. Int. Congress ICID, The Hague, Q44, R97, pp. 1237-1247.
- Sousa, P. L., Dedrick, A. R., Clemmens, A. J., Pereira L. S. (1995). Effect of furrow elevation differences on level-basin performance. *Transactions of the ASAE* 38 (1): 153-158.
- Tarjuelo, J. M., de Juan, J. A., Valiente, M., Garcia, P. (1996). Model for optimal crop patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. II. A case study of irrigation scheduling in Albacete, Spain. *Agricultural Water Management* 31: 145-163.
- Warrick, A.W., Yates, S.R. (1987). Crop yield as influenced by irrigation uniformity. In: D. Hillel (ed.) *Advances in Irrigation* (vol. 4), Academic Press, Orlando, pp. 169-180.
- Wolters, W. (1992). Influences on the Efficiency of Irrigation Water Use. ILRI Public. N° 51, ILRI, Wageningen.