

# SIMULAÇÃO DA PROCURA NUMA REDE DE REGA OPERANDO A PEDIDO: O MODELO IRDEMAND

**M.J. Calejo**

GCOBA SA, Lisboa, Portugal  
mcalejo@coba.pt

**J. L. Teixeira, L. S. Pereira**

ISA-UTL, Lisboa, Portugal

**N. Lamaddalena**

IAM, Bari, Italia

**Resumo:** O conhecimento da procura para a rega é fundamental no projecto e na gestão dos sistemas colectivos de regadio. Os caudais e o padrão do hidrograma da procura variam de sistema para sistema e dependem do modo de distribuição da água, do clima, das culturas e de factores sociais. Nas redes operando a pedido, a procura é tradicionalmente estimada através da 1<sup>a</sup> Fórmula de Clément, que é um modelo puramente estatístico. Diversos autores têm questionado algumas das suas hipóteses de base e têm sido propostos modelos alternativos tendo por base a simulação do balanço hídrico do solo para uma determinada estratégia de rega. A análise das séries cronológicas dos caudais horários pedidos mostra que a procura é representada por dois processos não correlacionados, um determinístico e outro aleatório. Com o objectivo de modelar estas duas componentes, foi desenvolvido o modelo IRDEMAND que adopta a seguinte metodologia: (1) simulação do balanço hídrico do solo, através do modelo ISAREG, para determinação das datas de rega; (2) fixação da hora de abertura das tomadas de rega considerando quer a função densidade de probabilidade dos caudais médios horários pedidos quer as frequências relativas dos caudais horários dum hidrograma sintético gerado por um processo autoregressivo com reposição da sazonalidade; e (3) determinação do hidrograma e dos regimes de caudal agregando ao nível do sistema os pedidos à escala da parcela. O modelo proposto considera a aleatoriedade espacial das seguintes variáveis: culturas, sistemas de rega, data de sementeira, eficiência de aplicação e dotação. Este modelo foi aplicado à rede de rega em presão do Luceficit e testado por comparação dos caudais horários simulados com os observados e através da análise dos volumes distribuídos para rega. A metodologia seguida revelou-se adequada na caracterização da procura.

## INTRODUÇÃO

A análise e o dimensionamento dos sistemas de distribuição de água não podem ser adequadamente efectuados sem se conhecer ou prever a procura. Numa rede de rega, os caudais e o padrão do hidrograma da procura variam de sistema para sistema e dependem do modo de distribuição de água, do clima, das culturas, dos sistemas de rega e de factores sociais. Na análise do desempenho das redes de distribuição, a melhor fonte para estimar a procura provém dos registos de caudal, quando existam e sejam fiáveis. No dimensionamento dos sistemas a procura tem de ser sempre estimada. De um modo geral no projecto a procura é carac-

terizada a partir de um único regime de caudal. Esta aproximação é adequada nas redes com modo de distribuição contínuo ou por rotação. No entanto, nas redes com modo de distribuição a pedido, esta aproximação é bastante redutora, não permitindo caracterizar de forma adequada o funcionamento real daquelas redes.

Clément (1966) propôs um modelo estatístico, conhecido por 1<sup>a</sup> Fórmula de Clément, largamente utilizado em projecto para o cálculo do caudal de dimensionamento de cada troço da rede. Apesar de teoricamente bem formulado, constata-se que as hipóteses assumidas na determinação dos parâmetros da fórmula não têm em conta o funcionamento real de uma rede de rega pressurizada operando a pedido (CTGREF,

1974; CTGREF, 1977; Béthery, 1990; Lamaddalena e Ciollaro, 1993). Clément (1966) desenvolveu um modelo alternativo, cuja base é o processo estocástico das cadeias de Markov aplicado aos processos de nascimento e morte. Devido à sua maior complexidade, este modelo nunca foi utilizado de forma generalizada, ao contrário do que acontece com a 1<sup>a</sup> fórmula de Clément.

Em alternativa às 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> fórmulas de Clément, têm sido propostas várias aproximações que combinam a simulação de estratégias de rega através de modelos de balanço hídrico do solo com modelos estatísticos (Maidment e Hutchinson, 1983; Abdellaoui, 1986; Walker *et al.*, 1995; Lamaddalena, 1997). Os modelos propostos por Abdellaoui, (1986) e Walker *et al.* (1995) recorrem à teoria das filas de espera para obterem o hidrograma ao nível do sistema, não podendo por isso ser utilizados para estimar a procura em redes operando a pedido (Lamaddalena, 1997). Este autor propôs que a hora de abertura de uma boca de rega seja fixada aleatoriamente a partir da função dos pedidos médios horários no período de ponta. Mais recentemente, D'Urso (2001) apresentou um modelo integrado e determinístico para calcular a procura num sistema de rega operando a pedido, admitindo que o hidrograma da procura é limitado pela capacidade hidráulica da rede e utilizando técnicas de detecção remota para avaliar a variabilidade espacial do défice hídrico dos sistemas culturais.

A análise das séries temporais dos caudais pedidos para rega (Lamaddalena 1997, Calejo *et al.*, 2006) mostram que a procura num dado instante  $t$  tem essencialmente duas componentes: uma determinística e uma estocástica. A componente determinística pode ser estimada realizando o balanço hídrico do solo para o cálculo das necessidades de água para a rega. A componente estocástica da procura pode ser considerada admitindo a aleatoriedade das seguintes variáveis:

- data de sementeira da cultura;
- dotação útil de rega;
- eficiência de aplicação;
- hora de abertura das tomadas.

Nesta linha, Pereira *et al.* (2003) propuseram uma metodologia para as redes em baixa pressão operando por acordo, que combina as necessidades úteis de rega no período de ponta (componente determinística) com a incerteza associada

à distribuição espacial das culturas, métodos de rega, frequência de regas e eficiência de aplicação. Tratando-se de redes operando por acordo, a teoria das filas de espera foi utilizada na agregação dos pedidos à escala da parcela para determinação da procura ao nível do sistema.

Embora a grande maioria destes modelos atribua um único caudal a cada troço da rede, na análise e dimensionamento de redes de rega operando a pedido, é necessário considerar a noção de múltiplos regimes de caudal (Lamaddalena, 1997; Lamaddalena e Pereira, 1998; Lamaddalena e Sagardoy, 2000) para representar múltiplas combinações de tomadas de água abertas simultaneamente. Neste artigo apresenta-se um modelo, IRDEMAND, para simular a procura para rega em redes com distribuição a pedido, que toma em consideração a componente determinística e a componente aleatória da procura.

## MODELO IRDEMAND

### Estrutura do modelo

A estrutura de base (Figura 1) do modelo IRDEMAND consiste, numa primeira fase, na realização do balanço hídrico do solo ao nível de cada uma das unidades de rega (área regada por um sistema de rega) com objectivo de determinar as datas das regas e, em seguida, proceder ao cálculo do hidrograma horário da procura no período de ponta, para o qual é necessário definir a hora de abertura das tomadas de água.

O modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Liu *et al.*, 1998) foi utilizado para simular o balanço hídrico de cada parcela de acordo com uma determinada estratégia de rega definida em função da cultura e das características do sistema de rega. A relação entre os valores real e máximo da evapotranspiração,  $ET_a/ET_m$ , é utilizado para a definir a oportunidade de rega, permitindo simular adequadamente as condições que se observam na prática (Teixeira *et al.*, 1995; 1996).

Nas culturas mais rentáveis, de um modo geral, o agricultor opta por uma estratégia de rega em que a cultura não é sujeita a stress hídrico, fazendo regas de pequena dotação e de frequência quase diária; a oportunidade de rega é quase sempre definida bastante acima da linha do limite da reserva facilmente utilizável,  $LRFU$  [mm]. Quando a rega das culturas não tem como objectivo a máxima produção, o agricultor rega quando a cultura já apresenta alguns sinais de stress hídrico; a oportunidade de rega é então definida para uma razão  $ET_a/ET_m < 1$ .

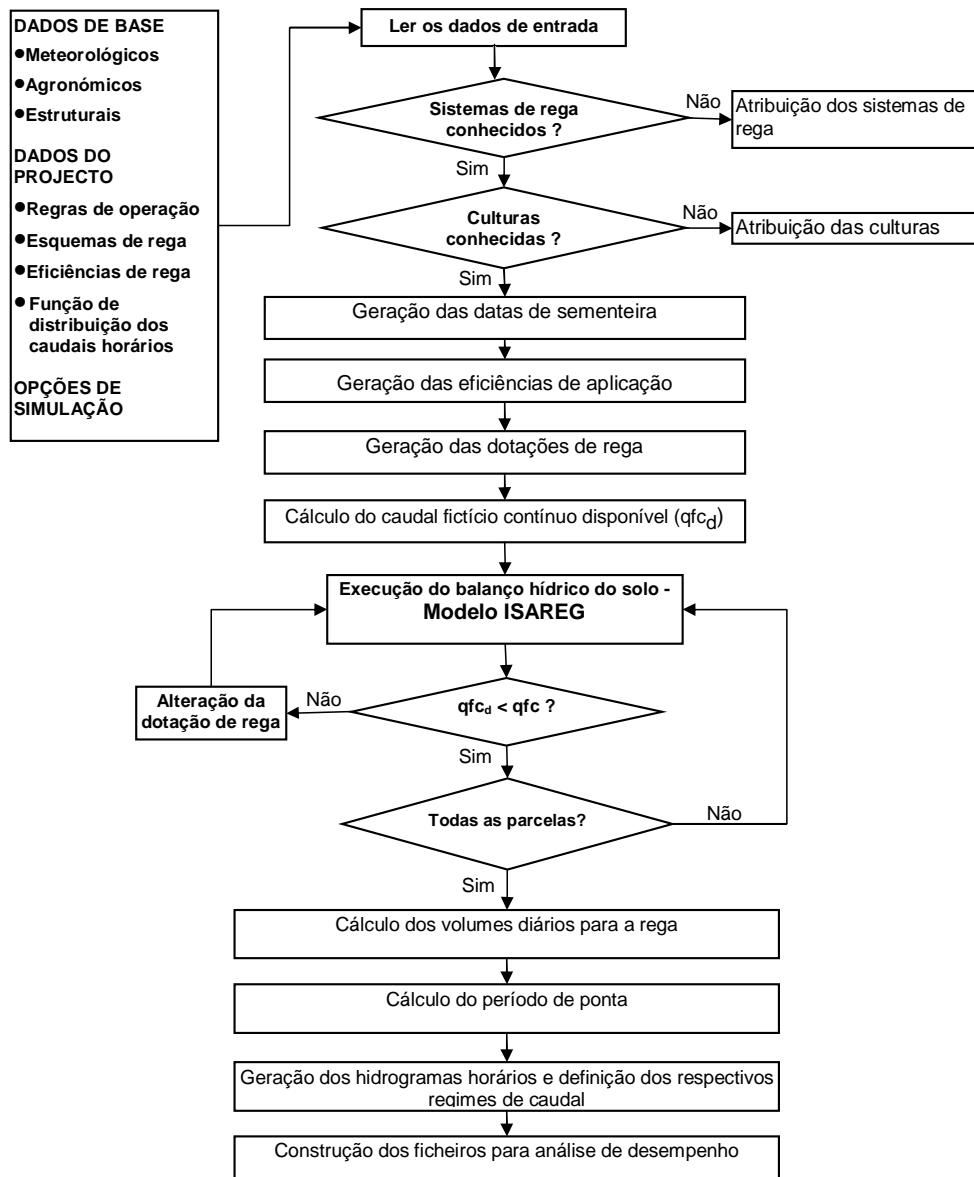


Figura 1. Esquema simplificado do modelo IRDEMAND

No modelo, os valores de ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> são definidos por cultura e para cada sistema de rega. A integração dos resultados da simulação do balanço hídrico do solo de cada uma das unidades de rega, permite calcular os volumes diários pedidos para a rega e determinar o período de ponta.

O hidrograma da procura para o período de ponta é calculado a partir dos calendários de rega obtidos para cada parcela. A hora de abertura duma boca de rega é fixada a partir da função de distribuição dos pedidos médios horários (Lamaddalena, 1997) ou a partir de um hidrograma sintético gerado por um processo estocásti-

co autoregressivo (Calejo, 2003; Calejo *et al.*, 2006). O caudal no início do sistema é dado pelo somatório dos caudais nominais das tomadas em funcionamento simultâneo. Os hidrogramas horários assim obtidos podem ser utilizados quer no dimensionamento da rede quer na análise do desempenho e no cálculo dos indicadores fiabilidade e resiliência.

#### Atribuição dos sistemas de rega e cultura

A aplicação IRDEMAND permite ao utilizador definir nos dados de entrada o sistema de rega e a cultura de cada parcela; caso contrário são definidos por um processo aleatório. Quan-

do o sistema de rega é tratado como variável aleatória, a sua definição para cada unidade de rega (parcela) é feita a partir da percentagem de ocorrência de cada um dos sistemas de rega,  $S_I$  [%], em toda a área beneficiada. O processo de atribuição dos sistemas de rega começa por fixar aleatoriamente as parcelas com rampas pivotantes do seguinte modo:

1. o valor mínimo da área regada por um rampa pivotante,  $A_{RP}$ , é fixado pelo utilizador nas opções de simulação ou a aplicação assume  $A_{RP} = 10$  ha;
2. o programa recorre a um procedimento aleatório para gerar um número entre 0 e 1, com distribuição uniforme, que é multiplicado pelo número de unidades de rega do aproveitamento, NUR, e transformado num número inteiro, que é o identificador da unidade de rega seleccionada. Se a área da unidade de rega for superior ou igual a  $A_{RP}$ , então este sistema é atribuído àquela unidade; caso contrário, é retirado um novo número aleatório. O processo continua até que a percentagem da área simulada regada por rampas pivotantes seja igual ao  $S_I$  das rampas pivotantes considerada a tolerância admitida. Para todos os sistemas de rega, a tolerância é de  $\pm 5\%$ .

O processo continua com a atribuição dos sistemas de rega às restantes unidades de simulação, com base num procedimento de geração de números aleatórios de 0 a 100, com distribuição uniforme. Assume-se que a cada frequência acumulada  $S_I$  [%] corresponde uma quantidade igual no intervalo de 0 a 100, o que permite fazer corresponder a cada número aleatório um sistema de rega. Obviamente, se o número aleatório cair dentro do intervalo da percentagem regada por rampas pivotantes, é retirado outro número aleatório até que seja atribuído outro sistema de rega.

Para as culturas é também assumido que a probabilidade de ocorrência da cultura K em cada unidade de rega é dada pela percentagem dessa cultura na área do projecto  $C_K$  [%]. A partir de um procedimento para geração de números aleatórios entre 0 e 1 com distribuição uniforme, assumindo que a cada frequência acumulada  $C_K$  corresponde uma quantidade igual no intervalo de 0 a 1, é possível atribuir aleatoriamente a cultura K a cada unidade de rega. Quando a cultura atribuída não é compatível com o sistema

de rega, SR, atribuído ou existente na unidade, é retirado outro número aleatório.

Depois do processo estar concluído é verificado se o padrão cultural simulado é idêntico ao padrão definido nos dados de entrada. Quando se verificam diferenças superiores à tolerância de  $\pm 5\%$  o processo é repetido até se obter um ajustamento razoável.

#### *Geração das datas de sementeira*

A data de sementeira, DS [dia juliano] é também uma variável aleatória. Nos dados de entrada, o utilizador tem apenas que introduzir o primeiro e o último dia do período de sementeira de cada uma das culturas, os quais são convertidos em dias julianos, respectivamente:  $DJ_1$  e  $DJ_N$ , sendo  $N$  o número de dias entre o início e o fim do período de sementeira. É assumido que a variável aleatória DS tem uma função de distribuição que pode ser aproximada à função Normal com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$  dados por:

$$\mu = \sum_{j=1}^N RDJ_j + RDJ_{N+1}/(N+1) \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left( N + 1 \sum_{j=1}^{N+1} RDJ_j^2 + \left( \sum_{j=1}^{N+1} RDJ_j \right)^2 \right)}{N + 1(N)}} \quad (2)$$

onde

$$RDJ_j = DJ_j - 0,5 \quad \text{com } j = 1 \dots N \quad (3)$$

$$RDJ_{N+1} = DJ_N + 0,5 \quad (4)$$

$RDJ_j$  é, assim, uma variável aleatória real, contínua, obtida pelo processo de correcção de continuidade que consiste em considerar que todo o inteiro  $DJ_j$  é representado pelo intervalo  $[DJ_j - 0,5; DJ_j + 0,5]$ . Esta transformação é necessária uma vez que DS é uma variável discreta e a distribuição Normal se refere a variáveis aleatórias contínuas.

Considerando a variável aleatória normal reduzida  $XDJ$  dada por:

$$XDJ_j = (RDJ_j - \mu)\sigma \quad (5)$$

com  $j = 1 \dots N + 1$ , é calculada a probabilidade acumulada da distribuição Normal correspondente a cada valor de  $XDJ_i$ . Os valores da probabilidade acumulada da distribuição normal reduzida são obtidos através da função

ANORDF (IMSL v3.0, STAT/Library). É utilizado um gerador de números aleatórios para gerar um número entre 0 e 1. Este número define a probabilidade acumulada da variável aleatória reduzida  $XDJ$ , à qual corresponde um dia Juliano da data de sementeira. Todos os números aleatórios inferiores a:

$$\begin{aligned} P[XDJ \leq RDJ_{1-\mu} / \sigma] &= \\ P[XDJ \leq (DJ_1 - 0,5 - \mu) / \sigma] & \end{aligned} \quad (6)$$

e superiores a:

$$\begin{aligned} P[XDJ \leq RDJ_{N+1-\mu} / \sigma] &= \\ P[X \leq (DJ_N + 0,5 - \mu) / \sigma] & \end{aligned} \quad (7)$$

são rejeitados. A variável aleatória DS (dia da sementeira) fica assim definida entre a data inicial e final indicadas pelo utilizador para cada cultura.

#### *Geração das eficiências de aplicação e das dotações de rega*

O conceito de eficiência de aplicação deve tomar em consideração os excessos de água devidos à falta de uniformidade de distribuição, à percolação profunda, à evaporação e arrastamento pelo vento, e também, às fugas nas condutas do sistema de rega. A eficiência de aplicação deve então ser definida pela relação (Pereira, 1999):

$$e_a = 100 \times (Z_{r,lq} / I) \quad (8)$$

onde  $Z_{r,lq}$  [mm] é a quantidade de água adicionada ao armazenamento na zona radical no menor quartil e  $I$  [mm] é a dotação bruta aplicada. Tendo em consideração as relações funcionais da  $e_a$  para rega por aspersão e microrregaa (Pereira, 1999), é fácil perceber que num perímetro de rega os valores de  $e_a$  podem variar significativamente de parcela para parcela, mesmo que o sistema de rega seja o mesmo. Trata-se, portanto, de uma variável a que está associado um elevado grau de incerteza. No modelo IRDEMAND,  $e_a$  é uma variável aleatória descrita por uma função densidade de probabilidade (fdp). O utilizador tem que definir essa função e os seus parâmetros para cada sistema de rega.

O procedimento para a atribuição dos valores de  $e_a$  consiste na geração de um número aleatório entre 0 e 1 e na determinação do valor da  $e_a$  que corresponde à frequência acumulada dada pelo número aleatório, considerando a fdp e os parâmetros escolhidos. Os valores de  $e_a$  inferiores a 30% e superiores a 90% são rejeitados; quando tal sucede, é retirado outro número

aleatório entre 0 e 1. Aqueles limites foram fixados com base nos valores observados nos sistemas de rega avaliados no Lucefecit e Vigia (Pereira, et al. 2002, Calejo 2003).

Tal como acontece com os valores de  $e_a$ , os valores de dotação bruta de rega,  $I$  [mm], são também gerados aleatoriamente a partir da fdp e dos seus parâmetros definidos para a dotação de rega aplicada por cada um dos sistemas. Antes de proceder à atribuição da dotação de rega, o programa calcula a dotação máxima,  $I_{\max}$  [mm], que pode ser fornecida à zona radical do solo considerando a reserva utilizável deste e atendendo ao valor da fracção  $p$  da água utilizável que pode ser extraída sem causar stress hídrico à cultura na fase mais susceptível.  $I_{\max}$  define o limite superior do intervalo dos valores de  $I$  susceptíveis de serem atribuídos. O valor mínimo,  $I_{\min}$ , foi fixado em 8 mm, atendendo que a aplicação de dotações brutas de rega inferiores a este valor não é viável na prática, se tomarmos em consideração a eficiência de aplicação, a evapotranspiração de referência e da cultura, e a quase ausência de precipitação no período de rega. Os valores de  $I$  são gerados por um processo igual ao descrito para  $e_a$ , em que são rejeitados os valores  $I < I_{\min}$  e  $I > I_{\max}$ .

#### *Balanço hídrico do solo*

A simulação do balanço hídrico é feita com o modelo ISAREG através da sub-rotina ISREG.dll que é chamada pela aplicação IRDEMAND. Toda a informação anteriormente gerada relativamente às culturas, sistema de rega, datas de sementeira, eficiência de aplicação e dotações de rega é utilizada na modelação do balanço hídrico do solo de cada unidade de rega. Na aproximação utilizada, as condições iniciais da água do solo na data de sementeira dependem das condições meteorológicas anteriores; para sua estima, o balanço hídrico é simulado para duas culturas sucessivas, em que a segunda é a cultura em causa e a primeira é uma cultura fictícia, com parâmetros culturais constantes, para a qual o balanço hídrico é simulado sem rega.

No fim da execução do balanço hídrico, o caudal fictício contínuo calculado pelo modelo ISAREG,  $qfc [ls^{-1} ha^{-1}]$  é comparado com o caudal fictício contínuo disponível,  $qfc_d [ls^{-1} ha^{-1}]$ . O caudal fictício contínuo é o valor máximo da razão entre o volume de cada rega e o intervalo de tempo que a separa da rega seguinte, representa, assim, o caudal mínimo necessário no período de ponta para o esquema de rega simulado. O valor de  $qfc_d$  de cada unidade de

regas é dado por:

$$qfc_d = d \times (e_a/100)/(A \times CR) \quad (9)$$

onde  $d$  é o caudal do sistema de rega [ $ls^{-1}$ ],  $A$  é a área da unidade de rega [ha],  $e_a$  é a eficiência de aplicação [%] e  $CR$  é um parâmetro de correção da área efectivamente regada.  $CR = 1$  para rega por aspersão e  $CR = P_w/100$  para a microrrega, onde  $P_w$  é a percentagem da área molhada.

Quando a condição  $qfc_d < qfc$  é verdadeira, o caudal nominal atribuído à unidade de rega não é suficiente para se fornecer a dotação útil de rega no período de ponta nas condições simuladas. Aumentando  $e_a$  é possível aumentar  $qfc_d$  e a dotação útil de rega pelo que o balanço hídrico do solo é simulado de novo para estas condições. O processo de ajustamento das condições do esquema de rega é efectuado até se verificar a condição:  $qfc_d < qfc$ . Porém, se  $e_a \geq 95\%$ , o valor da dotação útil de rega é calculado apenas em função do  $qfc_d$ .

#### *Cálculo dos volumes diários para a rega e identificação do período de ponta*

Após a execução do balanço hídrico para cada unidade de rega são conhecidas as datas de rega e as respectivas dotações. É então possível calcular os volumes diários, para a rega  $V_d$  [ $m^3$ ]:

$$V_d = \sum_{i=1}^{NUR} I_i \times A_i \times 10 \times IR_i \quad (10)$$

onde  $NUR$  é o número de unidades de rega;  $I_i$  é a dotação real de rega [mm] da unidade de rega  $i$ ;  $A_i$  é a área efectivamente regada [ha] da unidade de rega  $i$ ; e  $IR_i$  é um parâmetro que descreve a programação da rega do agricultor:  $IR_i = 1$  se regar no dia  $d$ , caso contrário  $IR_i = 0$ .

O período de ponta (com uma duração de 5, 7, 10 ou 30 dias) é identificado aplicando o método das médias móveis com sobreposição aos volumes diários calculados pela Equação [10].

#### *Geração dos hidrogramas horários*

O balanço hídrico do solo permite conhecer as datas de rega. No entanto este resultado, por si só, não é suficiente para o dimensionamento ou análise dumha rede de rega pressurizada operando a pedido. É necessário obter informação sobre os caudais horários pedidos no início da rede. O caudal no início do sistema corresponde à soma dos caudais das tomadas que estão simultaneamente abertas. Por outro lado, o conhecimento do conjunto de tomadas que estão

abertas permite também definir os regimes de caudais, para os quais a rede de rega deve ser dimensionada ou analisada. Assim, para gerar o hidrograma horário e os respectivos regimes de caudais é necessário fixar a hora de abertura e fecho de cada uma das tomadas,  $hd_o$  e  $hd_f$ . A hora de fecho é definida a partir da hora de abertura da tomada e da duração da rega,  $t_i$  [horas]:

$$hd_f = hd_o + t_i \quad (11)$$

A duração da rega é calculada pela seguinte equação:

$$t_i = (I \times A \times 10)/d \quad (12)$$

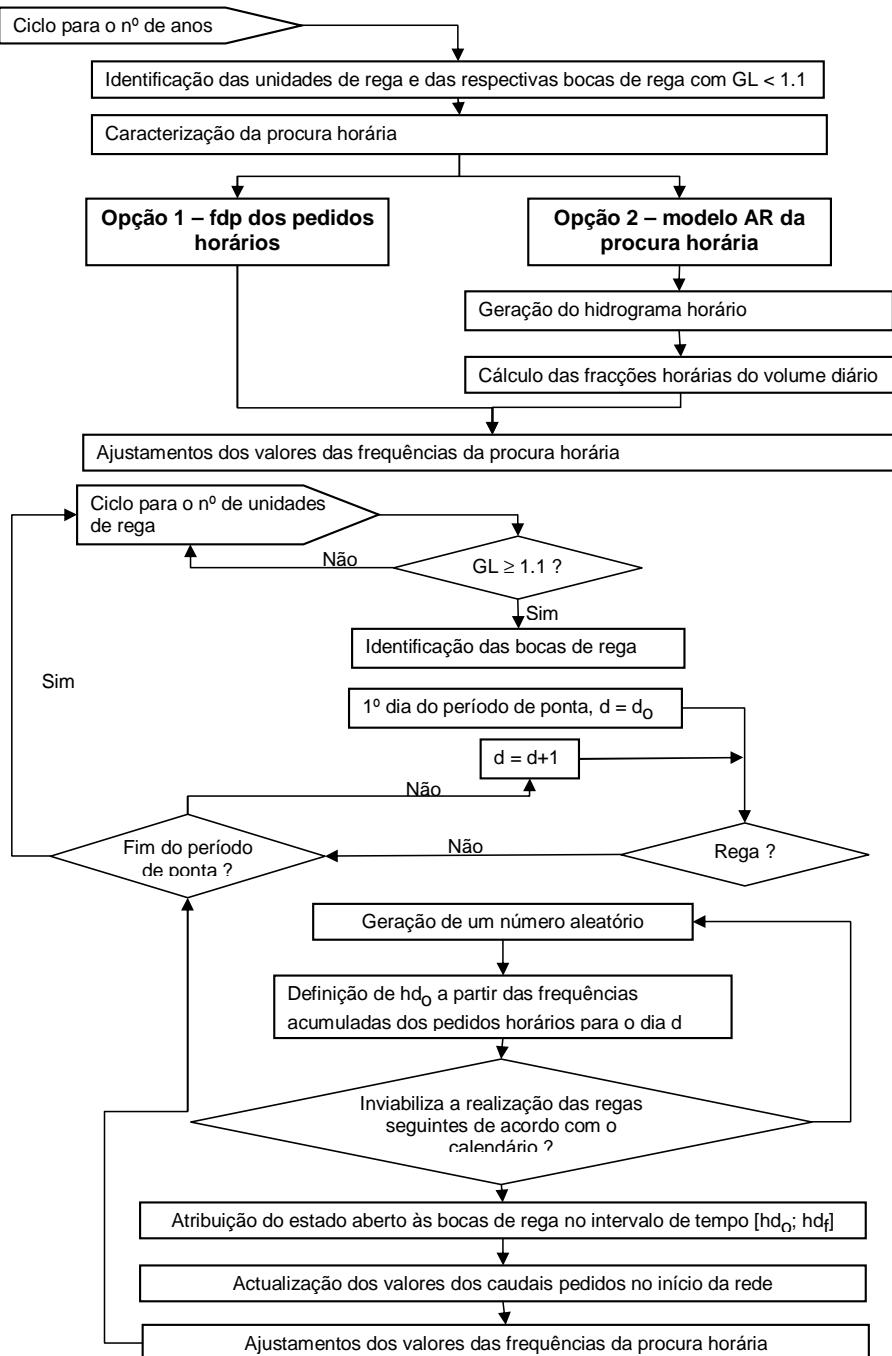
sendo  $I$  [mm] a dotação de rega,  $A$  [ha] a área regada; e  $d$  [ $m^3 h^{-1}$ ] o caudal nominal da(s) tomada(s).

Lamaddalena (1997) definiu a hora de abertura de uma tomada através da função densidade de probabilidade dos pedidos (caudais) médios horários, os quais caracterizam o comportamento do agricultor. Esta abordagem foi utilizada por no modelo GENERA (Lamaddalena, 1997). Calejo (2003) concluiu que as sucessões dessazonalizadas das fracções horárias dos volumes diários pedidos podiam ser simuladas através de um processo estocástico autoregressivo (AR). De facto, associada à componente determinística da procura existe uma componente aleatória (ruído branco). Assim, a hora de abertura de uma tomada pode ser definida a partir da frequência relativa dos caudais horários dum hidrograma horário sintético gerado por um processo AR.

A aplicação desenvolvida apresenta como opções para a definição da hora de abertura: (1) a definição da fdp dos pedidos médios horários; (2) a geração dum hidrograma horário sintético a partir dum processo estocástico autoregressivo. Na Figura 2 representa-se um esquema simplificado do algoritmo desenvolvido para a geração da hora de abertura das tomadas, cuja aproximação é a seguinte:

1. Identificação das tomadas que estão continuamente abertas (24 horas por dia) ao longo de todo o período de ponta. Um sistema de rega apresenta funcionamento praticamente contínuo quando, para o período de ponta, o grau de liberdade,  $GL$  [adim.], é inferior a 1.1, com  $GL$  dado por:

$$GL = (T_p \times 24)/(NI_{T_p} \times t_i) \quad (13)$$



**Figura 2.** Esquema simplificado do algoritmo para gerar o hidrograma horário da procura

sendo  $T_p$  [dias] a duração do período de ponta,  $NI_{T_p}$  o número de regas durante o período de ponta; e  $t_i$  [h] a duração de cada rega.

2. Cálculo da nova função de frequências relativas para o conjunto das restantes tomadas, retirando à função original, que descreve a procura do sistema, os pedi-

dos identificados no ponto 1). Isto é, se existe um determinado número de tomadas que estão sempre em funcionamento, a probabilidade de as restantes tomadas estarem abertas a determinadas horas não corresponde à função de distribuição dos pedidos horários obtida para o conjunto de todos as tomadas.

3. Definição da hora de abertura das tomadas com um grau de liberdade igual ou superior a 1,1. Para estes é gerado um número aleatório entre 0 e 1. A hora de abertura da tomada corresponde à frequência acumulada dada pelo número gerado, considerando a função de distribuição dos pedidos horários. Em seguida, é verificado se hora de abertura não coloca problemas no cumprimento do calendário de regas fornecido pelo modelo ISAREG e no horário de funcionamento da rede. Se a hora determinada inviabilizar as regas seguintes é gerado um novo número aleatório e todo o processo anterior é repetido até que a hora de início da rega não coloque problemas na definição das próximas das regas. A função de frequências relativas dos pedidos horários é actualizada em função dos horários fixados para a tomada em análise.

Na geração de um hidrograma a partir de um processo AR é preciso conhecer os valores do processo nos instantes anteriores ( $x_{t-1}, \dots$ ). O número de valores necessários é igual ao número de ordem do processo. Uma vez que aqueles não são conhecidos, assume-se, numa primeira fase, que são iguais a zero. Esta simplificação introduz um erro que é parcialmente anulado rejeitando os primeiros 72 valores do processo AR. Segundo Salas (1992) cerca de 50 valores são suficientes para anular o efeito de viés introduzido pela simplificação  $x_t = 0$  para  $t \leq 0$ .

## CASO DE ESTUDO - APROVEITAMENTO HIDROAGRÍCOLA DO LUCEFECIT

### Caracterização da Rede de Rega

Como exemplo de aplicação do modelo IRDEMAND apresenta-se o caso de estudo do Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit (Calejo, 2003). Este regadio localiza-se no sul de Portugal, na região do Alto Alentejo, e beneficia uma área de 950 ha a partir de uma rede de rega colectiva em pressão, com origem na estação elevatória EE1, localizada junto à barragem. O sistema tem 107 hidrantes mas o número de tomadas é de 204. Existe ainda uma unidade sobrepressora, EE2, que serve 14 tomadas de água que se encontram a cotas mais elevadas. O dimensionamento hidráulico da rede de rega foi feito para um único regime de caudal, obtido através da 1<sup>a</sup> Fórmula de Clément.

Com o objectivo de conhecer o hidrograma da procura, foi instalado à saída da estação

elevatória EE1 um medidor de caudal electro-magnético de inserção (sonda Aquaprobe, calibrado nos laboratórios de hidráulica da empresa Hydrex) ligado a um registador de dados (Octopus). Foi instalado um segundo medidor de caudal no troço T232, a jusante da EE2. Durante as campanhas de rega de 2000 a 2002 foi realizado trabalho de campo que permitiu obter informação para a caracterização das estratégias de rega dos agricultores e do desempenho dos sistemas de rega na parcela. O aproveitamento tem uma estação meteorológica automática ( $38^{\circ} 37' 34''$  N;  $7^{\circ} 25' 16''$  W) cujos registos foram utilizados para calcular a evapotranspiração de referência pelo método da FAO-PM (Allen *et al.*, 1998) e para caracterizar a precipitação diária.

A partir das inscrições dos agricultores nas campanhas de rega, foi possível identificar a cultura de cada unidade de rega. No exemplo que se apresenta, a cultura e o sistema de rega não são variáveis aleatórias mas dados de entrada do modelo. Os dados culturais, como sejam as datas de sementeira, duração dos ciclos e datas de colheita foram obtidos junto aos agricultores. No que se refere ao parâmetros culturais, coeficientes culturais ( $K_c$ ) e reserva facilmente utilizável, seguiu-se a metodologia proposta por Allen *et al.* (1998). A intercepção da carta de solos com as unidades de rega permitiu identificar as manchas de solo em cada unidade e calcular as respectivas áreas, como descrito por Fortes *et al.* (2005). Com base nesta informação foi possível identificar a mancha predominante em cada unidade de rega.

### Caracterização dos Esquemas de Rega

O esquema de rega de um sistema é caracterizado pela dotação de rega,  $I$  [mm], e pela frequência de rega. As dotações aplicadas pelas rampas pivotantes e pelos sistemas de aspersão estacionários são bastante pequenas, quase sempre inferiores a 10 mm. Os valores de  $I$  aplicados pelos sistemas estacionários e com enroladores indicam curvas de frequências assimétricas positivas. No caso da microrrega, os dados disponíveis referem-se à dotação média na área humedecida,  $D_{aw}$  [mm], (Pedras, 2003). O valor médio de  $D_{aw}$  é de 9,0 mm, variando entre 3,4 e 25,7 mm. No entanto, a dispersão interquartil é apenas de 2,3 mm.

A partir dos dados disponíveis e da informação obtida junto dos agricultores foram adoptadas as fdp para a variável aleatória  $I$  indicadas na Tabela 1 e representadas na Figura 3. Foi seleccionada a distribuição LogNormal para a descrição da

variável I dos sistemas estacionários e dos sistemas com enrolador com o objectivo de descrever a assimetria positiva indiciada pelos dados disponíveis.

No que se refere à frequência de rega, apenas a cultura do milho-grão é quase sempre regada com objectivo de obtenção do rendimento máximo. Esta cultura é a que maior impacto tem nos resultados da modelação porque representa 70 % da área regada. Na Tabela 2 é indicada para cada cultura a razão ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> para definição da oportunidade de rega em função do sistema de rega.

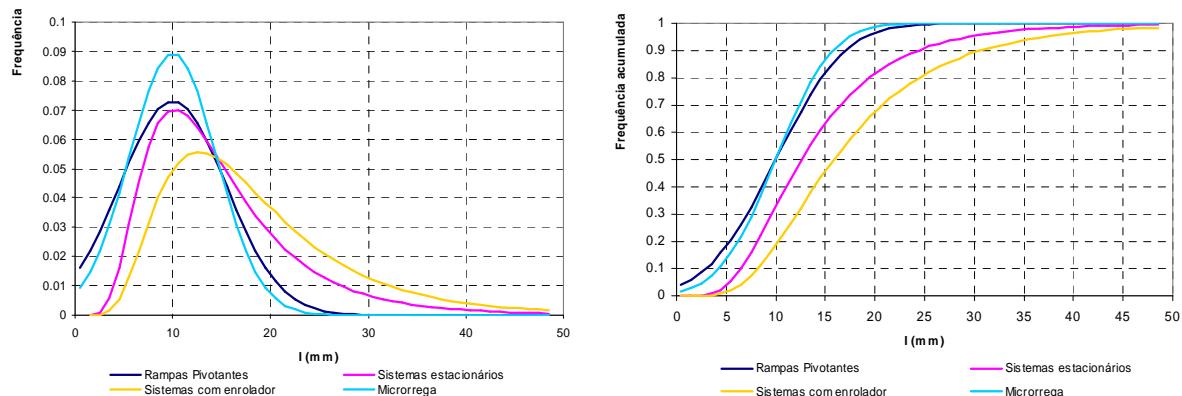
### Caracterização das Eficiências de Rega

As avaliações de campo (Pereira *et al.*, 2002) efectuadas nos sistemas de rega por aspersão e microrregaa no Lucefecit e Vigia, dada que as do-

tações utilizadas eram demasiado pequenas, não permitiram estimar  $e_a$  mas apenas a eficiência potencial. No entanto, as relações funcionais da  $e_a$  (Pereira, 1999) mostram que este parâmetro é fortemente dependente da uniformidade de distribuição (UD). Assim, uma  $fdp$  para  $e_a$  requer, numa primeira etapa, a análise dos dados relativos a UD: Os dados de campo mostraram que o desempenho dos sistemas estacionários e dos enroladores era mau, com 75 % dos casos com UD  $< 65\%$ . A estes sistemas correspondeu a maior dispersão quartal. Os resultados das rampas pivotantes e da microrregaa são bastante melhores, tendo-se obtido para o 1<sup>a</sup> quartil uma UD de 66 e 71 % respectivamente. O coeficiente de assimetria da UD é negativo para todos os sistemas. Face ao exposto, foram adoptadas as  $fdp$  indicadas na Tabela 3 e representadas na Figura 4.

Sistema de rega	Distribuição	Média	Desvio padrão
Sistemas estacionários	LogNormal	1,1	0,2
Sistemas com enrolador	LogNormal	1,2	0,2
Rampas pivotantes	Normal	10	5,5
Microrregaa	Normal	10	4,5

**Tabela 1.** Função densidade de probabilidade da dotação de rega I [mm] dos sistemas de rega por aspersão e microrregaa



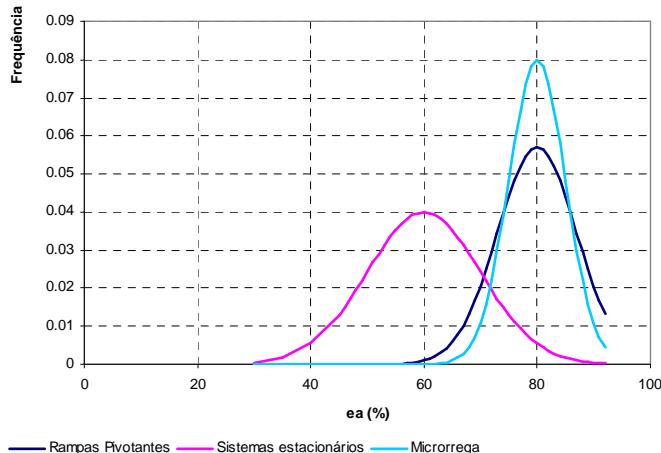
**Figura 3.** Função densidade probabilidade e função de distribuição da variável aleatória dotação de rega, I [mm]

Cultura	Sistema de rega			
	Rampas pivotantes	Sist. estacionários	Enroladores	Microrregaa
Milho	1,0	0,8	0,7	1,0
Girassol	—	0,6	0,6	—
Melão	—	—	—	1,0
Olival	—	—	—	1,0
Prado	—	0,6	0,6	—
Sorgo	1,0	0,9	0,8	—
Vinha	—	—	—	1,0

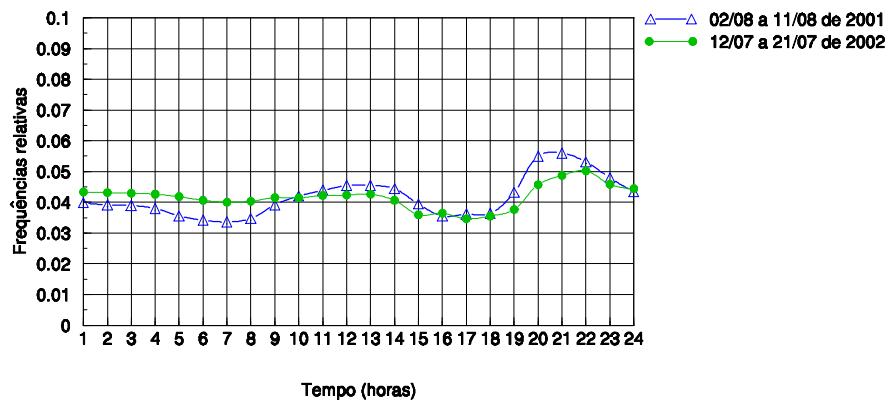
**Tabela 2.** Razão ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> na definição da oportunidade de rega segundo a cultura e o sistema de rega

Sistema de rega	Distribuição	Média	Desvio padrão
Sistemas estacionários	Normal	60	10
Rampas pivotantes	Normal	80	7
Microrrega	Normal	80	5

**Tabela 3.** Função densidade de probabilidade da eficiência de aplicação ea [%] dos sistemas de rega por aspersão e microrrega



**Figura 4.** Função densidade de probabilidade da eficiência de aplicação  $e_a$  dos sistemas de rega por aspersão e microrrega

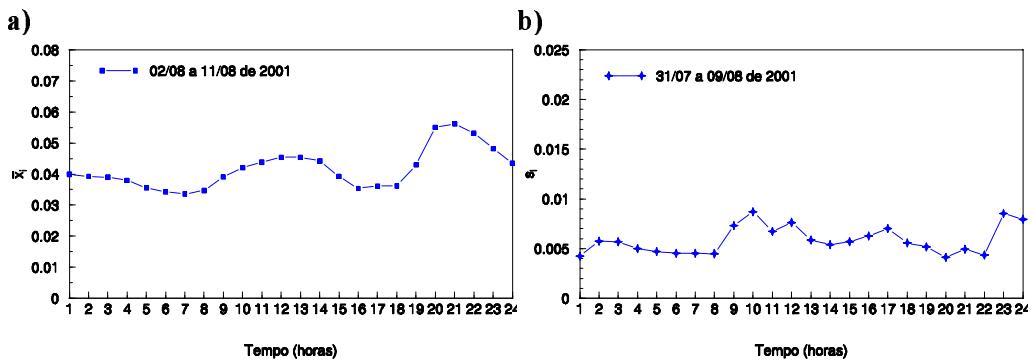


**Figura 5.** Função das frequências relativas dos pedidos médios horários. Rede de rega do Lucefecit

### Caracterização da Procura Horária

A caracterização da procura horária foi feita a partir dos registos horários de caudal medidos à saída da EE1 (Calejo, 2003, Calejo *et al.*, 2006). Na Figura 5 apresentam-se as funções das frequências relativas dos pedidos médios horários do Lucefecit, considerando as séries dos caudais horários observados durante o período de ponta (com duração de 10 dias) nos anos de 2001 e 2002. A Figura 5 mostra que é entre as 18 e as 21-22 horas que se verifica a maior procura.

ra ao longo de todo o dia, o que significa que muitos agricultores regam depois de terminado o trabalho fora da agricultura. O caudal pedido durante a noite corresponde aos sistemas de rega automatizados que, durante o período de ponta, têm um funcionamento quase contínuo. A procura mantém-se quase constante entre as 23-24 horas e as 6 horas da manhã. A partir das 8-9 horas da manhã até às 13-14 horas verifica-se um aumento da procura mas a partir desta hora há uma diminuição progressiva até às 16 horas.



**Figura 6.** Sazonalidade das fracções horárias do volume diário bombado para rega na EE1 do Lucefecit no período de ponta: a) sazonalidade na média e b) sazonalinade na variância

Relativamente à opção do modelo AR(p), os dados correspondem aos parâmetros obtidos para a rede do Lucefecit (Calejo 2003; Calejo *et al.*, 2006), considerando o período de ponta de 10 dias:

Modelo AR(2):  $x_t = 0,96x_{t-1} - 0,193x_{t-2} + \varepsilon_t$

Variância dos resíduos: 0,342

A sazonalidade na média e na variância estão representadas na Figura 6.

## Resultados da Aplicação

A capacidade do modelo IRDEMAND simular o hidrograma horário da procura pode ser avaliada a partir:

- do ajustamento dos caudais horários simulados aos observados;
- do ajustamento dos caudais médios horários simulados aos observados; e
- do ajustamento das frequências relativas dos pedidos simulados aos observados.

Esta informação é complementada pelo cálculo dos seguintes parâmetros estatísticos relativamente aos caudais, aos caudais médios e às frequências relativas:

- i) Coeficiente de regressão,  $b$ , forçada à origem, entre os valores observados e simulados, dado por:

$$b = \sum_{i=1}^N x_{obs_i} - x_{est_i} / \sum_{i=1}^N x_{est_i}^2 \quad (14)$$

onde:  $N$  é o número de observações,  $x_{obs_i}$  o iésimo valor observado e  $x_{est_i}$  o iésimo valor estimado.

- ii) Erro médio absoluto,  $EMA$ :

$$EMA = (1/N) \times \sum_{i=1}^N |x_{obs_i} - x_{est_i}| \quad (15)$$

- iii) Erro médio relativo,  $EMR$ :

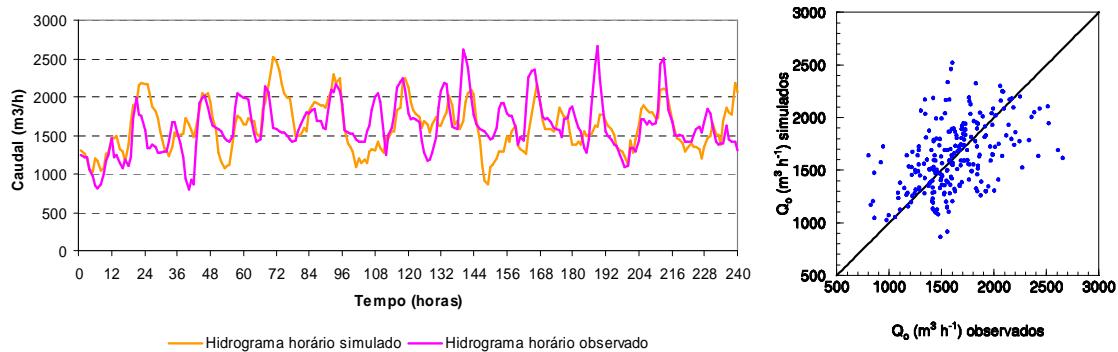
$$EMR = (1/N) \times \sum_{i=1}^N |x_{obs_i} - x_{est_i}| / x_{obs_i} \quad (16)$$

## Opção 1 - Definição da hora da abertura a partir da fdp dos pedidos médios horários

Na Figura 7 está representado um hidrograma horário gerado com o modelo IRDEMAND e o hidrograma observado no ano 2001, a partir do qual foram obtidas as frequências relativas dos pedidos médios horários (Figura 5) que foram utilizadas na definição da hora de abertura das tomadas. A Figura 7 mostra que o hidrograma gerado tende a reproduzir o hidrograma observado, mas verifica-se que os caudais máximos gerados são sempre inferiores aos observados enquanto que os caudais mínimos simulados são superiores aos observados. Isto deve-se ao facto de a fdp dos pedidos ser obtida a partir dos caudais médios horários.

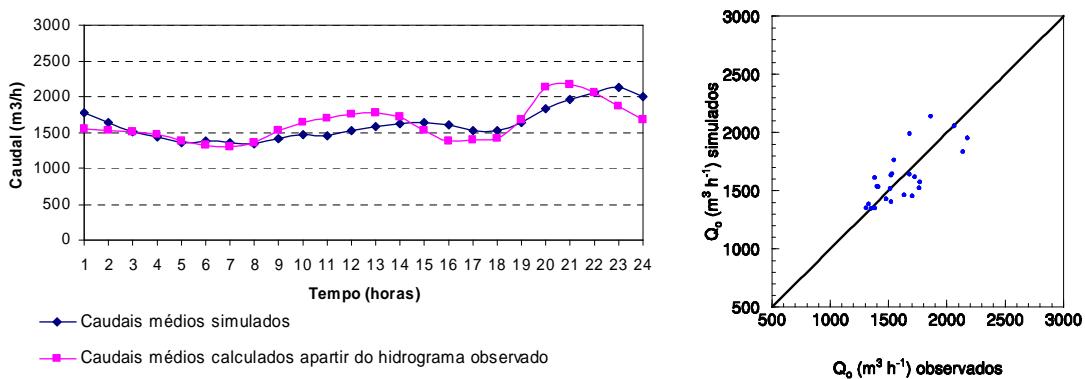
A análise dos parâmetros estatísticos de ajustamento permite verificar que o valor do coeficiente de regressão  $b$  é próximo de 1 e  $EMR < 20\%$  mas superior a 15 %.

A Figura 8 compara os caudais médios horários do hidrograma simulado com os caudais médios horários do hidrograma observado. O  $EMR$  nos caudais médios horários é quase sempre inferior a 10 %. Os maiores desvios relativamente aos valores observados verificam-se com os caudais máximos. O valor do coeficiente de regressão é muito próximo de 1.0.



Parâmetros estatísticos de ajustamento:  $b = 0,976$ ; EMA =  $257,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ; EMR = 16,6 %

**Figura 7.** Hidrograma dos caudais horários simulados com a opção 1 e observados para um período de ponta com duração de 10 dias



Parâmetros estatísticos de ajustamento:  $b = 0,992$ ; EMA =  $139,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ; EMR = 8,4%

**Figura 8.** Caudais médios horários de um hidrograma simulado com a opção 1 e hidrograma observado num período de ponta de 10 dias na rede de rega do Lucefecit

A análise conjunta dos resultados apresentados nas Figuras 7 e 8 mostra que a procura só pode ser convenientemente caracterizada quando são feitas diversas simulações com o modelo IRDEMAND, obtendo-se então um número suficiente de regimes simulados que permitem caracterizar o sistema relativamente aos caudais máximos observados.

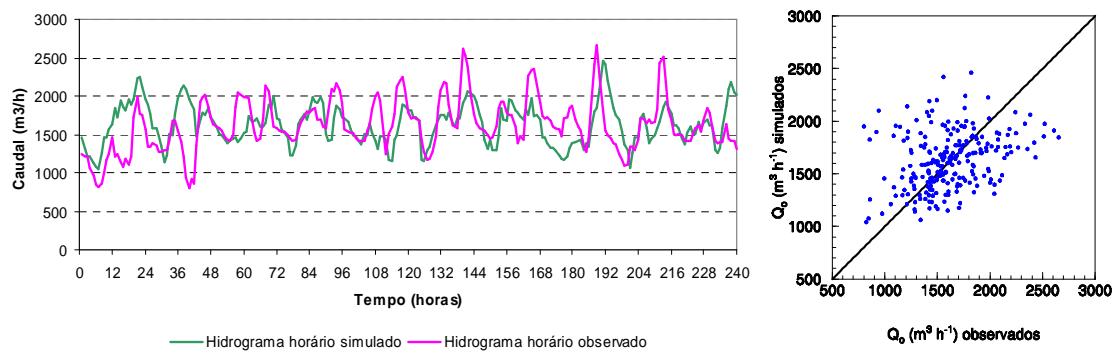
#### Opção 2 - Definição da hora de abertura a partir de um hidrograma sintético gerado através de um processo estocástico autoregressivo

No modelo IRDEMAND foi incluída a opção de definição da hora de abertura de uma boca de rega a partir de um hidrograma sintético gerado por um processo AR com o objectivo de melhorar o ajustamento dos caudais máximos simulados aos observados.

Na Figura 9, é comparado um hidrograma

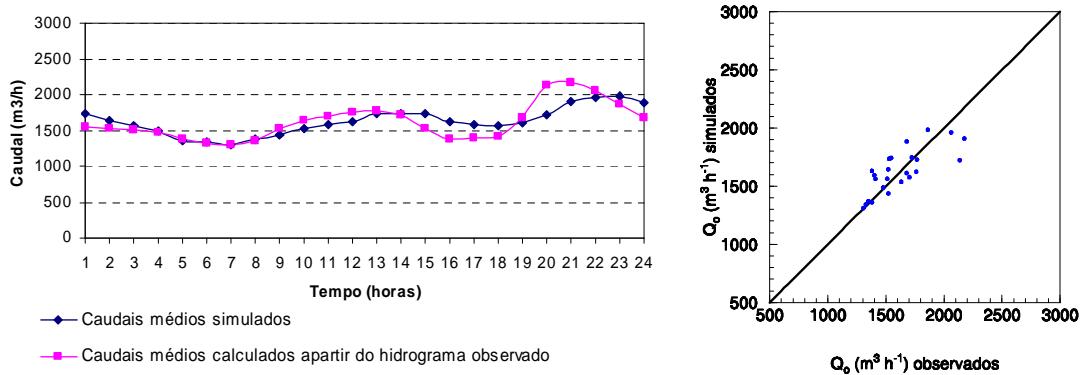
horário simulado considerando a opção 2 com o hidrograma observado. Os resultados mostram que a opção 2 permite, de um modo geral, simular melhor os caudais máximos na rede. Comparativamente com os resultados obtidos na opção 1, não se verificam diferenças nos parâmetros estatísticos de ajustamento. O EMR varia entre 15 e 20 % e o EMA é da mesma ordem de grandeza, entre  $250$  e  $280 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . A análise dos gráficos de regressão entre os valores simulados e observados mostra que, por vezes, o menor erro nem sempre corresponde ao melhor ajustamento dos caudais máximos simulados aos observados.

Os caudais médios horários simulados são comparados com os observados na Figura 10. O EMR varia entre 7 e 9 %. O melhor ajustamento dos caudais médios horários simulados aos observados deve-se ao facto dos hidrogramas construídos, utilizando a metodologia referida na opção 2, conseguirem simular melhor os caudais máximos e mínimos observados.



Parâmetros estatísticos de ajustamento:  $b = 0,974$ ; EMA =  $267,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ; EMR = 17,8 %

**Figura 9.** Hidrograma dos caudais horários simulados com a opção 2 e observados para o período de ponta de 10 dias, Luceficit



Parâmetros estatísticos de ajustamento:  $b = 0,996$ ; EMA =  $121,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ; EMR = 7,3 %

**Figura 10.** Caudais médios horários do hidrograma simulado com a opção 2 e do hidrograma observado no período de ponta de 10 dias na rede de rega do Luceficit

Embora a geração dum hidrograma sintético, através do processo AR para a definição da hora de abertura das tomadas, permita simular melhor os caudais máximos e mínimos, continua a verificar-se uma subestimação dos caudais médios horários máximos observados, que ocorrem entre as 20 e as 22 horas. Porém, a frequência relativa destes caudais é bastante pequena, não sendo representativos do funcionamento da rede de rega mesmo no período de ponta.

## CONCLUSÕES

Os resultados da aplicação do modelo IRDEMAND mostram que a metodologia seguida é adequada para a modelação da procura numa rede de rega operando a pedido. O modelo agrupa as componentes determinística e aleatória

da procura, que representa o comportamento do agricultor. Este pode ser definido a partir da função densidade de probabilidade dos pedidos ou a partir dum hidrograma horário gerado através de um processo estocástico autoregressivo.

A utilização da função densidade de probabilidade dos pedidos para gerar a hora de abertura das tomadas, comparativamente com o hidrograma simulado a partir do processo estocástico autoregressivo AR, tem a vantagem de requerer um número de parâmetros de entrada consideravelmente menor. Saliente-se ainda que a metodologia para obtenção da função densidade é consideravelmente mais simples do que a resultante da análise cronológica das séries dos caudais para a obtenção do modelo AR que simula a série registada.

---

**LISTA DE SÍMBOLOS**


---

$A$  Área regada;  
 $A_{RP}$  Área regada por uma rampa pivotante;  
 $AR$  Modelo auto-regressivo;  
 $b$  Coeficiente de regressão;  
 $CR$  parâmetro de correção da área efectivamente regada;  
 $C_K$  Percentagem de ocorrência de cada uma das culturas;  
 $d$  Caudal nominal da tomada de rega;  
 $DJ$  Dia Juliano definido dentro do período da sementeira;  
 $D_{aw}$  Dotação média na área humedecida;  
 $DS$  Dia da sementeira (dia juliano);  
 $e_a$  eficiência de aplicação;  
 $EMA$  Erro médio absoluto;  
 $EMR$  Erro médio relativo;  
 $ETa$  Evapotranspiração real da cultura;  
 $ETm$  Evapotranspiração máxima da cultura;  
 $GL$  Grau de liberdade;  
 $hdf$  Hora de fecho de uma tomada de rega;  
 $hdo$  Hora de abertura de uma tomada de rega;  
 $I$  Dotação de rega;  
 $I_{max}$  Dotação de rega máxima permitida;  
 $I_{min}$  Dotação de rega mínima permitida;  
 $IR$  Parâmetro que descreve a programação da rega na parcela;  
 $Kc$  Coeficiente cultural;  
 $LRFU$  Limite da reserva facilmente utilizável;  
 $N$  Número de observações;  
 $NI_{T_p}$  Número de regas no período de ponta;  
 $NUR$  Número de unidades de rega;  
 $p$  Fracção de água utilizável que pode ser extraída sem causar stress;  
 $P_w$  Percentagem da área humedecida a 30cm de profundidade;  
 $qfc$  caudal fictício contínuo;  
 $qfc_{cd}$  caudal fictício contínuo disponível;  
 $Si$  Percentagem de ocorrência dos sistemas de rega na parcela;  
 $UD$  Uniformidade de distribuição;  
 $ti$  duração da rega;  
 $T_p$  duração do período e ponta;  
 $V_d$  volumes diários pedidos para rega;  
 $x_{obsi}$  iésimo valor observado;  
 $x_{esti}$  iésimo valor estimado;  
 $XDJ$  Variável aleatória reduzida;  
 $Z_{r,lq}$  quantidade de água adicionada ao armazenamento na zona radical no menor quartil.

---

**REFERÊNCIAS**


---

Abdellaoui R., (1986). Irrigation system design capacity for on-demand operation. Ph.D

- Dissertation, Utah State University, Logan, 204p.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D e Smith M, (1998). Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrig, Drain, Pap. 56, FAO, Rome, 300p.
- Béthery, (1990). Réseaux Collectifs d'irrigation. Calcul et fonctionnement des réseaux ramifiés sous pression, Guide du projecteur, Cemagref, pp. 135.
- Calejo, M.J., (2003). Projecto e Análise do Funcionamento de Redes de Rega em Pressão. Modelação da Procura. Dois Casos de Estudo. Lucefecit e Vigia, Tese de Doutoramento, ISA-UTL, Lisboa.
- Calejo M.J., Teixeira J.L., Matias. P. e Pereira L.S., (2006). Modelação Estocástica da Procura. 8 Congresso da Água, (Figueira da Foz, Março de 2006), APRH, Lisboa, CD-ROM.
- Clément R., (1966). Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. La Houille Blanche, 5, pp. 553–575.
- CTGREF, (1974). Lois de probabilité des débits de pointe d'un réseau d'irrigation collectif par aspersion. Loi de Clément. Verification a partir d'enregistrements, Note Technique n°2.
- CTGREF, (1977). Ajustement expérimental de la formule de Clément pour un réseau collectif d'irrigation par aspersion. Note Technique n°4.
- D'Urso G., (2001). Simulation and Management of On-Demand Irrigation Systems: A combined agrohydrological and remote sensing approach. Tese de doutoramento, Wageningen University, The Netherlands.
- Fortes P.S., Platonov A.E. e Pereira L.S., (2005). GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. Agric. Water Manage, 77, 159–179.
- Lamaddalena N., (1997). Integrated simulation model for design and performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. Tese de doutoramento, Instituto Superior de Agromonia, Universidade Técnica de Lisboa.
- Lamaddalena N. e Ciollaro, G., (1993). Taratura della formula di Clément in un distretto

- irriguo dell'Italia meriodinale. In Atti del V Convegno Nazionale A.I.G.R. su "Il ruolo dell'ingegneria per l'agricoltura del 2000", Maratea, 7-11 Junho, Potenza, pp. 101-110.
- Lamaddalena N. e Pereira L.S., (1998). Performance analysis of on-demand pressurised irrigation systems. In: Pereira LS and Gowing JW (eds.) Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage, E& FN Spon, London, 247-255.
- Lamaddalena N. e Sagardoy J.A., (2000). Performance Analysis of On-Demand Pressurized Irrigation Systems. FAO Irrig, Drain. Pap. 59, FAO, Roma.
- Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J. e Pereira, L.S., (1998). Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. Agric. Water Manage. 36, pp. 233-246.
- Maidment D.R. e Hutchinson P.D., (1983). Modeling water demands of irrigation projects. J. Irrig. Drain. Engng, 109(4), pp. 405-418.
- Martin D.L., Stegman E.C. e Fereres E., (1990). Irrigation scheduling principles. In: G.J. Hoffman, T.A. Howell e K.H. Solomon (eds.) Management of Farm Irrigation Systems, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 155-203.
- Pedras, C., (2003). Sistema de apoio à decisão para projeto e análise de funcionamento de sistemas de rega sob pressão (rega localizada). Tese de Doutoramento, UALG, Faro
- Pereira L.S., (1999). Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: A discussion. Agric. Water Manage., 40(2-3), 153-169.
- Pereira L.S. (coordenador), (2002). Diagnóstico dos Sistemas de Rega em Pressão. Relatório final de PEDIZA. Projecto nº 1999.64.006326.1, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Pereira L.S., Calejo M.J., Lamaddalena, N., Douieb A. e Bounoua R., (2003). Design and performance analysis of low pressure irrigation distribution systems. Irrigation and Drainage Systems, 17, 305-324.
- Salas J.D., (1992). Analysis and modeling of hydrologic time series. In Maidment D.R. (Ed.), Handbook of Hydrology, McGraw-Hill.
- Teixeira J.L., (1994). Programa ISAREG. Guia do utilizador. Dep. Eng. Rural, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Teixeira J.L. e Pereira L.S., (1992). ISAREG, an irrigation scheduling simulation model. ICID Bulletin, 41(2), 29-48.
- Teixeira J.L., Farrajota M.P. e Pereira L.S., (1995). PROREG: a simulation software to design demand in irrigation projects. In Pereira L.S., van den Broek B.J., Kabat P. and Allen R.G. (eds.), Crop-Water-Simulation Models in Practice, Wageningen Pers, Wageningen, 273-285.
- Teixeira J.L., Paulo A.M. e Pereira L.S., (1996). Simulation of irrigation demand hydrographs at sector level. Irrigation and Drainage Systems, 10, 159-178.
- Walker, W.R., Prajamwong S., Allen R.G. e Merkley G.P., (1995). USU command area decision support model - CDASM. In Pereira, L.S., van der Broek B.J., Kabat P., Allen, R.G. (Eds.), Crop-Water-Simulation Models in Practice, Wageningen Pers, Wageningen, pp. 231-271.