

PROBLEMAS DE CONTROLE: IRRIGAÇÃO BASEADO EM ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Um pomar de laranjeiras utiliza um sistema automatizado de irrigação por gotejamento. O objetivo é manter as plantas em condições hídricas ideais, monitorando continuamente um índice de vegetação (por exemplo, NDVI ou NDRE), que reflete o estado fisiológico e o vigor da copa.

A irrigação, controlada automaticamente, ajusta a vazão de água, em L/h, por linha de gotejo. Para obter um índice de vegetação médio $y(t)$ que expressa a saúde das plantas, entre 0 e 1 (adimensional), obtido por sensores óticos de dossel ou por processamento de imagens de drones ou satélites.

Do ponto de vista biológico e físico, sabe-se que o solo responde à irrigação como um reservatório de água já que a entrada (água aplicada) aumenta a umidade e a saída ocorre por evaporação, transpiração e drenagem. De forma que tal comportamento é bem descrito por um sistema linear de 1ª ordem.

Já a planta responde à umidade do solo com atraso fisiológico, uma vez que alterações na umidade do solo influenciam gradualmente o teor de água nas folhas, a abertura estomática e o acúmulo de biomassa. O que também pode ser modelado como um sistema de 1ª ordem.

Assim, o processo $G(s)$ solo–planta pode ser representado por duas dinâmicas de 1ª ordem em cascata:

- $G_s(s)$ resposta da umidade do solo à irrigação;
- $G_p(s)$ resposta do índice de vegetação à umidade do solo.
- K_s é o ganho entre irrigação e umidade do solo;
- K_p é o ganho entre umidade do solo e índice de vegetação;
- τ_s e τ_p são constantes de tempo associadas ao solo e à planta. Com base em estudos sobre dinâmica de água no solo sob irrigação localizada, admita que a umidade do solo responde em escala de 1–3 dias, sendo aqui adotado $\tau_s=2$ dias. Estudos sobre defasagem entre umidade do solo e resposta da vegetação indicam atrasos médios entre 19 e 35 dias; adote τ_p 25 dias como valor típico.

Com base no modelo acima, pretende-se avaliar e comparar o desempenho das ações de controle proporcional, integral e derivativa, estudando os seguintes tipos de ação em realimentação unitária negativa:

- Controle proporcional (P): K_c
- Controle proporcional–integral (PI): $K_c(1+T_{is}1)$
- Controle proporcional–derivativo (PD): $K_c(1+T_{ds})$
- Controle proporcional–integral–derivativo (PID): $K_c(1+T_{is}1+T_{ds})$

De modo que, o agricultor ou algoritmo de manejo define um NDVI de referência dentro da faixa considerada saudável para a planta e o controlador então tenta ajustar a irrigação para que a planta não

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO- TEORIA DE CONTROLE

entre em estresse hídrico, mantenha boa área foliar, sustente fotossíntese elevada, e produza vigor dentro da faixa desejada.

1. Modelagem e diagrama de blocos sem controle, com controle P, PI, PD e PID
 - a) Desenhe o diagrama de blocos do sistema em malha fechada, indicando as variáveis do fenômeno que representam: o sinal de referência $r(t)$, o erro $e(t)$, controlador $C(s)$, a função de transferência do processo $G(s)$, saída $y(t)$, eventual distúrbio $d(t)$ devido a variações de iluminação e limitações dos sensores.
2. Considere uma ação proporcional:
 - a) Escreva a função de transferência de malha fechada para esse caso.
 - b) Usando o Lugar das Raízes (LGR) determine o intervalo de valores de ganho proporcional para o sistema estável.
 - c) Projete o ganho proporcional para o sistema irrigações–solo–planta descrito, de forma a atender simultaneamente às recomendações agronômicas para citros, sendo 0,75 um NDVI de referência, a resposta ao degrau em uma faixa de NDVI mínimo em regime permanente $\geq 0,65$ e NDVI máximo durante o transitório $\leq 0,85$, e tempo de acomodação compatível com a fisiologia da planta, menor do que 30 dias.
 - d) Plote a resposta temporal ao degrau de referência sem ação de controle e com controle usando os valores calculados.
3. Considere um controlador proporcional-integral:
 - a) Escreva a função de transferência de malha fechada para esse caso.
 - b) Projete os parâmetros do controlador para um erro nulo em regime permanente e o tempo de acomodação (critério de 2%) da resposta ao degrau menor ou igual a 35 dias.
 - c) Plote a resposta temporal ao degrau de referência sem ação de controle e com controle usando os valores calculados.
 - d) Mostre qualitativamente como a ação integral move o LGR, com a inserção de um polo na origem e discuta o impacto na margem de estabilidade (correlacione com Bode), na tendência a oscilações, e no tempo de acomodação
4. Considere uma ação proporcional-derivativo:
 - a) Escreva a função de transferência de malha fechada para esse caso.
 - b) Em comparação com uma ação apenas proporcional previamente ajustada, a ação PD deve reduzir o tempo de acomodação (2%) em pelo menos 20%, mantendo o sobressinal máximo da saída menor que 0,85.

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO- TEORIA DE CONTROLE

- c) Explique por que o termo derivativo tende a amplificar o ruído presente na medida de NDVI e comente a possibilidade de usar uma outra forma filtrada do derivativo.
 - d) Partindo do LGR mostre como o zero introduzido pela ação derivativa desloca a curva para no plano-s, e afeta o amortecimento e tempo de acomodação.
 - e) Mostre e explique o porquê, para um PD com valor de constante derivativa muito grande, a margem de fase diminui.
5. Considere uma ação proporcional-integral-derivativo:
- a) Escreva a função de transferência de malha fechada para esse caso.
 - b) Projete a ação de modo que, para um degrau de referência em 0,75, o erro em regime permanente seja nulo e o NDVI permaneça em uma faixa fisiológica segura entre 0,70 e 0,85 com sobressinal máximo em torno do valor de referência limitado a 5%, e um tempo de acomodação de menor que 25 dias.
 - c) Plote a resposta temporal ao degrau de referência sem ação de controle e com controle usando os valores calculados.
 - d) Discuta o impacto do termo integral na fase usando o diagrama de Bode e explique por que evitar oscilações de irrigação pode ser benéfico para as plantas.
 - e) Qual ação apresenta o melhor compromisso biológico entre evitar estresse hídrico e minimizar consumo de água?