**ABSTRACT**

**Sistemas Automáticos de Rega:**

**Estado da Arte e Tendências**

César Miguel Penha

cesar.penha@sapo.pt

Instituto Politécnico de Beja

Beja – Portugal

A disponibilidade de água doce é uma das condições elementares para a vida na Terra, no entanto a água é um recurso limitado, encontrando-se sob uma pressão sem precedentes pelo crescimento da população global, mudanças climáticas e demanda de vários setores económicos, como turismo, indústria e agricultura. Apenas 2,5% do total da água do planeta é água doce, e nem toda está acessível aos seres humanos. A agricultura, os grandes espaços verdes como é o caso dos campos de golf, dos estádios de futebol e outros, são dos principais setores consumidores deste elemento essencial à vida de todos nós e, a sua rega leva muitas vezes ao desperdício.

As questões acima mencionadas justificam a necessidade de um uso sustentável e racional da água na rega, o que motiva a implementação de novas tecnologias na rega automática baseadas na teoria de controlo.

O objetivo do presente artigo é fazer um *overview* sobre o estado da arte destas tecnologias e conjuntamente, das redes de comunicação sem fios utilizadas na comunicação entre os nós sensores. Estas são tecnologias bastante promissoras em várias áreas tais como a monitorização ambiental, agricultura de precisão, ou rastreabilidade.

**PALAVRAS CHAVE**

Rega automática; Redes de comunicação sem fios; Teoria de controlo;

**1.INTRODUÇÃO**

**1.1 A necessidade de uma melhor gestão da água**

A água é um recurso cada vez mais escasso [15], e o seu uso racional é mais do que nunca, vital. Os problemas relacionados com a falta de água aumentarão se as previsões a longo prazo sobre as mudanças climáticas globais se confirmarem. Os registos meteorológicos sugerem aumentos significativos da temperatura média e decréscimos na precipitação anual, o que implicará a redução dos recursos hídricos disponíveis no século XXI [18]. A indústria e o turismo, entre outras atividades produtivas, competem por esse recurso de forma a aumentarem a sua rentabilidade e produtividade. Atualmente, o setor económico que mais consome água é a agricultura: Cerca 70% dos recursos totais, contra os 20% utilizados pela indústria e os 10% para uso doméstico [29]. A somar ao consumo, temos o desperdício no uso da água. A nível nacional, o setor com mais desperdício é a agricultura. Cerca de 35% de desperdício, seguido pelo setor urbano com 20% e do industrial com 15%. A somar a esse problema e considerando o aumento esperado na população mundial, [30] é urgente encontrar soluções para assegurar o fornecimento suficiente da água a toda a população e evitar ao máximo desperdícios. Isso pode ser alcançado aumentando a eficiência da rega, incutindo práticas e hábitos de poupança, e sobretudo uma maior consciencialização de todos nós sobre esta temática. Uma das abordagens de forma a otimizar a irrigação de campos agrícolas e espaços verdes é o uso de controladores automáticos de rega. A automatização de processos foi aplicada praticamente em todos os campos da engenharia com enorme sucesso; podemos observar um histórico dessas aplicações em Bennett (1996) [26], embora a sua implementação na agricultura, e de uma forma particular na rega de precisão, seja algo limitada. A ideia-chave por detrás do controlo automático é o uso de *feedback[[1]](#footnote-1)*. No campo da rega autónoma, as medições das variáveis​​ do solo, das plantas e das condições climatéricas, relacionadas com as necessidades hídricas das culturas, podem fornecer a informação das consequências das ações anteriores para calcular a próxima irrigação.

**2.TEORIA DE CONTROLO**

Na engenharia e na matemática, a teoria de controlo lida [22] com o comportamento de sistemas dinâmicos. Em geral, quando uma ou mais variáveis ​​de saída de um sistema necessitam de seguir uma certa referência durante um período de tempo, um controlador manipula as entradas do sistema de forma a obter o efeito desejado nas saídas desse sistema.

Uma forma simples de implementar um controlador é o chamado controlador de malha aberta (Fig.1), no qual nenhuma medição das saídas do sistema é usada para modificar as entradas, ou seja, nenhum *feedback* é usado de forma a alterar os parâmetros de entrada. Neste tipo de controladores, as decisões são tomadas prioritariamente com base em heurísticas[[2]](#footnote-2). A principal desvantagem dos controladores de malha aberta é que estes não são capazes de reagir a mudanças nas perturbações reais ou no sistema.

Um bom exemplo de um controlo de malha aberta é um *sprinkler[[3]](#footnote-3)* de rega programado para ser ativado a determinadas horas. Se o sistema não medir a humidade do solo como forma de *feedback*, mesmo estando a chover, o *sprinkler* será ativado no horário programado, levando ao desperdiçando de água.

**Sistema S**

ENTRADA

(

SAÍDA

X

Y

Fig. 1. Esquema de um controlador de malha aberta em que “X” é a entrada “S” é o sistema (operações realizadas) e “Y” é a saída do sistema.

Em controladores de circuito fechado (Fig. 2), o *feedback* é usado para evitar os problemas dos controladores de malha aberta; isto é, os controladores usam as informações das consequências das suas ações anteriores para calcular a próxima ação. Nesse caso, sensores apropriados são necessários para fechar o ciclo.

Tomemos como exemplo o controlador de malha aberta acima descrito, mas neste caso, adicionamos um sensor de humidade do solo como *feedback* do sistema.

**PROCESSO**

**SENSOR DE HUMIDADE DO SOLO**

**CONTROLADOR**

HUMIDADE DO SOLO DETERMINADA PELO UTILIZADOR

+

-

ERRO

ABASTECIMENTO DE ÁGUA & VÁLVULA SELENOIDE

PULSO DE CONTROLO & RELÉ

PLANTAS EM REGA

*FEEDBACK*

Fig. 2. Um esquema de um controlador de malha fechada mostrando o sistema de irrigação de circuito fechado consistindo em: uma entrada com ponto de ajuste de humidade do utilizador, processamento do sinal de erro, válvula do atuador de fornecimento de água e sensor de humidade do solo fornecendo o sinal de feedback.

A indústria moderna tem assentado extensivamente em sistemas de controlo automatizados. Essa constatação tem motivado uma extensa pesquisa sobre o desenvolvimento de estratégias avançadas de operação e controlo, baseadas em modelos para alcançar culturas de qualidade, ambientalmente corretas e economicamente otimizadas [16]. Sistemas de controlo clássicos, como o controle PID[[4]](#footnote-4), utilizam medições de uma única variável de saída (ex. temperatura, pressão, nível, humidade, etc.) para calcular a ação de controlo necessária a ser implementada por um atuador de controlo, (ex. válvula selenoide, relé, etc.) de forma a que esta variável de saída possa ser regulada num valor de *set-point[[5]](#footnote-5)* desejado. Esta classe de controladores não precisa de um modelo do sistema controlado; são baseados apenas nas informações recolhidas pelos sensores. Os sistemas de controlo devem ser avaliados quanto à sua eficiência no cumprimento do objetivo, mas em geral, as leis de controlo podem ser potencialmente melhoradas incluindo um bom modelo do sistema, as chamadas “estratégias baseadas em modelos” [13].

É importante observar que o controlo automático é uma disciplina vasta e uma revisão exaustiva está além do escopo deste documento. Existe documentação relevante que aborda esta temática. Uma das mais referenciadas é Love (2007) [20], que abrange uma ampla gama de tópicos, desde sistemas de instrumentação e controlo, até tecnologias avançadas de controlo, como o controlo de lógica difusa, redes neuronais, algoritmos genéticos, modelos de controlo preditivo e controlo não linear.

Em breve conclusão, podemos afirmar que os controladores de malha fechada apresentam vantagens significativas em relação aos modelos de malha aberta, pois permitem alterar os *inputs[[6]](#footnote-6)* mediante a recolha de informação (*feedback*) proveniente dos sensores, com o objetivo final de produzir um resultado o mais aproximado possível da referência introduzida pelo utilizador.

**2.1 Teoria de controlo nas práticas de irrigação**

Em geral, o controlo automático é ainda pouco usado na irrigação de campos e espaços verdes. As soluções comerciais disponíveis no mercado exigem que a rega seja realizada manualmente pelos utilizadores (agricultores, jardineiros, etc.). Só estes podem ligar ou desligar a bomba de irrigação e abrir ou fechar as válvulas para aplicar as doses de irrigação em todos os diferentes setores de rega. Uma técnica popular de irrigação consiste numa forma de calcular a dose de irrigação necessária baseando-se numa estratégia de alimentação. Essa estratégia consiste em aplicar a irrigação para reabastecer a quantidade de água usada pelas plantas no dia anterior. Para o efeito usa-se o método da evapotranspiração[[7]](#footnote-7) do potencial da cultura ou mudanças na quantidade de água no solo. Esse método é na verdade, um controlador de malha aberta e, consequentemente, apresenta algumas limitações que podem ser superadas com o uso de *feedback*, modelos matemáticos e informações adicionais fornecidas pelas medições da estrutura da planta.

Existem vários controladores automáticos no mercado tais como (*Acclima[[8]](#footnote-8), Iroometer-WATERMARK[[9]](#footnote-9), Rain Bird[[10]](#footnote-10), Hunter[[11]](#footnote-11)*) que regulam o conteúdo de água do solo (*SWC)[[12]](#footnote-12)* com base nas medições realizadas pelos sensores e como tal, operam como controladores de malha fechada. Esses controladores aplicam a irrigação quando os sensores detetam que as medições (ex. humidade do solo) estão abaixo de um certo limite mínimo predefinido pelo agricultor ou jardineiro até que outro limite superior predefinido seja superado (controlo on/off). Estes sistemas comerciais foram comparados pelo Dr. Cristian E. Cardenas-Lailharcar*[[13]](#footnote-13)*, professor e investigador na área da energia, da eficiência energética, ambiente, sustentabilidade entre outros, da Universidade da Florida. Os resultados podem ser consultados nas suas publicações, nomeadamente em Cardenas-Lailhacar et al., 2008[2], e Cardenas-Lailhacar et al., 2010[3]. O mesmo concluiu que, quando um limite adequado é definido, todos esses sistemas têm o potencial de economizar água quando comparados a uma tradicional base de tempo (controladores de malha aberta). Os autores também mostraram que, mesmo sob condições de tempo seco, a incorporação de sensores de chuva como *feedforward[[14]](#footnote-14)* pode economizar quantidades substanciais de água na rega.

Se fizermos uma pesquisa por sistemas comerciais, podemos verificar que são escassos aqueles que usam controladores PID, tais como os mencionados na seção 1.2. Esses controladores poderiam ser aplicados não apenas para seguir um valor constante de referência de humidade do solo como supracitado, mas também para controlar e otimizar a quantidade de água no solo, (SWC)[[15]](#footnote-15) tendo como objetivo as reais necessidades de água das plantas. De uma forma geral, pode ser difícil encontrar um modelo baseado apenas no SWC para maximizar os objetivos de um determinado agricultor (rendimento, eficiência no uso da água, lucro agrícola). A inclusão de variáveis ​​relativas às plantas propriamente ditas (folhas, caule, tamanho, etc.) como sinais de *feedback* poderia melhorar o desempenho dos controladores, uma vez que essas medidas envolvem a resposta da planta a mudanças no solo e na atmosfera [5] [27] [8].

Na figura 3 podemos observar um conjunto de variáveis de feedback que podem ser utilizadas na otimização de um controlador de rega.

**Microcontrolador**

*feedback*

**Clima**

**Solo**

**Planta**

Prev. Meteorológica

Temperatura

Humidade relativa

Índice UV

Tamanho

Diâmetro do tronco

Tamanho das folhas

Temperatura da planta

Humidade

Capacid. de campo

Cf. de emurchecimento

Fig. 3. Variáveis que podem ser usadas para controlo numa rega automática.

Concluindo, apesar da pesquisa efetuada, não foram encontrados controladores de rega que utilizem todas as potenciais variáveis em relação ao clima, às plantas e ao solo como *feedback* do sistema.

Os controladores de rega existentes no mercado ficam ainda muito aquém do ideal de otimização. A sua maioria não possui outros controlos que não sejam o básico on/off, no entanto, já existem estudos e projetos que visam implementar um número substancialmente superior de sensores que irão permitir um acréscimo na eficiência do consumo da água, não descurando a saúde das plantas.

**3. CONTROLO AUTOMÁTICO DE REGA: ESTADO DA ARTE**

O controlo automático de rega não é propriamente novo.

*A subirrigação tem sido usada desde pelo menos 1895, quando foi descrita por investigadores na Ohio Experimental Station (Green and Green, 1895) [17]. O desenvolvimento subsequente da hidroponia durante a década de 1920 (Gericke, 1921, 1922) [14] e técnicas de cultura de areia na década de 1930 (Biekart e Connors, 1935 [4]; Eaton, 1931 [7] ajudaram a estabelecer os princípios subjacentes aos sistemas modernos de subirrigação. Sistemas de subirrigação concebidos de forma independente também estavam em uso nas estações experimentais agrícolas da Universidade de Nova Jersey e Purdue durante a década de 1930 (Withrow e Biebel, 1937) [32]. [24]*

Apesar do tema já ser debatido desde meados do século passado, tem havido um crescente interesse da comunidade científica acerca deste problema. Seguidamente, é apresentada uma revisão de algumas contribuições que tratam não só de como aplicar uma determinada quantidade de água no solo de uma forma eficiente, mas também de como decidir a quantidade, de forma a otimizar o uso da água e os objetivos da cultura.

A aplicação de técnicas de controlo de processo à irrigação de taxa variável foi recentemente revista por McCarthy et al. (2011) [1].

Na tabela 1 podemos observar a maioria dos artigos que relatam controladores automáticos de irrigação na última década. Podemos observar que a maioria baseia-se na regulação da quantidade de água no solo (SWC) ou numa variação de tensão da água no solo (SWT)[[16]](#footnote-16) com estratégias on/off baseadas em *feedback* (Luthra et al., 1997, Miranda et al., 2005, Cáceres et al., 2007, Boutraa et al., 2011) [28][9][23]. Esses dispositivos são relativamente baratos e fáceis de usar, mas as medições de águas no subsolo implicam certas limitações: exigem um grande número de sensores e não levam em conta o estado e a resposta das plantas às regas efetuadas.

Tabela 1. Um sumário dos artigos que referem sistema de rega automáticos na última década

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estratégia de Controlo** | **Medição** | **Referência.** | **Tipo Sensor** | **Cultura** |
| On/Off | *SWC* | Boutraa et al. (2011) | Não descrito | Trigo |
|  | *SWC* | [Cardenas-Lailhacar et al., 2008](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412001746" \l "bib0045), Cardenas-Lailhacar et al., 2010 | TDT, resistência elétrica, condutividade elétrica, impedância | Grama Bermuda |
|  | *SWC* | Miranda et al. (2005) | Resistência elétrica (Watermark) | Grama Bermuda |
|  | *SWC/LT* | Abraham et al. (2000) | Condutividade elétrica  Resistências variável | Quiabo |
|  | *SWC/CT* | Evett et al. (2000) | Sonda de neutrões /par termoelétricos termómetros infravermelhos | Milho Rebentos de Soja |
|  | *CT* | O'Shaughnessy and Evett (2010) | Termómetros infravermelhos | Algodão |
|  | *CT* | Peters and Evett (2008) | Termómetros infravermelhos | Rebentos de Soja |
|  | *SMP* | Luthra et al. (1997) | Tensímetro |  |
|  | *WD/SMP* | Cáceres et al. (2007) | Método de tabuleiro modificado / eletrotensímetro | Laurustinus |
|  | *SWC/W* | Romero et al. (2009) | FDR / Estação meteorológica  (Enviroscan) | Amêndoas |
| *On/off modificado* | *SF* | Fernandez et al., 2008a, [Fernandez et al., (2008](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412001746" \l "bib0100)) | Sensores de pulso de fluxo de seiva | Oliveiras |
| *Rede neuronal* | *SWC* | Capraro et al. (2008) | Capacitativo | Vinha |
| Controlo Fuzzy | SWC/AT/LI | Xinjian (2011) | STHO01/DS1802B/P9003 (datasheet referencies) | Vinha |
| Sistema inteligente | SWC/W | Zhu and Li (2011) | Não descrito | Não descrito |
| Sistema inteligente | AT/AH | Zhou et al. (2009) | Não descrito | Orelha de judeu |
| PID | SWC | Romero (2011) | FDR (Enviroscan) | Amêndoa |
| MPC | SWC | Romero (2011) | Simulado | Amendoa |

AH: humidade do ar, AT: temperatura do ar, CT: temperatura da copa, FDR: reflectométrica no domínio da frequência, LI: intensidade luminosa, LT: temperatura das folhas, SF: fluxo de seiva, SMP: potencial matricial do solo, SWC: Quantidade de água no solo, TDT: transmissometria no domínio do tempo, W: previsão meteorológica, WD: drenagem da água.

Existe uma panóplia de controladores de irrigação de vários tipos e utilizando sensorização diversa no entanto, todos os controladores listados na tabela 1, nenhum é completo, pois medem apenas alguns parâmetros como *feedback*. Existem controladores mais eficientes do que outros, dependendo do número de sensores e da sua capacidade de análise do meio envolvente.

Os últimos estudos revelam um interesse pelo desenvolvimento de modelos mais complexos representando a movimentação da água no solo, na planta e na atmosfera (SPA)[[17]](#footnote-17). Essa movimentação depende essencialmente de um conjunto de fatores tais como: radiação solar, velocidade do vento, temperatura do ar, da quantidade do vapor de água na atmosfera e, finalmente, com a interação destes elementos com a cultura. Desta forma, é possível usar modelos para testar os controladores de rega primeiramente em simulações de computador antes de usá-los em experiências de campo. Existem estudos sobre diversos modelos. Os modelos mais referenciados são DSSAT (Hoogenboom et al., 2004) [12], WOFOST (van Diepen et al., 1989) [6], SWAP (van Dam, 2000, van Dam et al., 2008) [19], MACRO (Stenemo e Jarvis, 2010) [11].

Os controladores baseados em modelos, tal como o modelo de controlo preditivo (MPC)[[18]](#footnote-18), insere-se numa classe de algoritmos de controlo computacional que utiliza um modelo de processo explícito para prever a resposta futura de uma planta. Em cada intervalo de controlo, um algoritmo de controlo preditivo ajusta-se de forma a otimizar o comportamento futuro da planta, realizando uma sequência de futuros ajustes nas variáveis ​​manipuladas. A primeira entrada na sequência ótima é então enviada para a planta e todo o cálculo é repetido nos intervalos de controlo subsequentes.

Como um MPC é na sua essência, um modelo preditivo, estes controladores podem usar esse conhecimento para otimizar a irrigação, incluindo também a estimativa de alterações futuras ou distúrbios nos sistemas como por exemplo a previsão meteorológica. Estes controladores, foram originalmente desenvolvidos para atender às necessidades de controlo especializado de centrais de produção de energia e refinarias de petróleo. A tecnologia MPC pode agora ser encontrada numa ampla variedade de áreas de aplicação, incluindo aplicações em produtos químicos, processamento de alimentos, automóvel e aeroespacial [25] encontrando-se a dar os primeiros passos na agricultura de precisão.

Podemos então concluir que, os sistemas de rega automáticos existentes assentam sobretudo em modelos não preditivos, ou seja, estes reagem aos *inputs* gerados por sensores dos mais diversos tipos, alimentando o *feedback* dos controladores. Por sua vez, os controladores ao receberem esse *feedback*, ajustam os parâmetros da próxima rega com o intuito de chegar ao valor de referência. No entanto, já existem controladores “inteligentes”. Estes controladores conseguem antecipar estados e/ou situações em que não é necessária irrigação, mediante a análise de diversos modelos/parâmetros como por exemplo o estado do tempo.

**4. TECNOLOGIAS SEM FIOS APLICADAS NA IRRIGAÇÃO**

Na agricultura moderna, o aumento da produtividade impõe-se muito por culpa do aumento populacional.

De forma a atingir este objetivo, novas tecnologias e novas soluções estão a ser aplicadas de forma a otimizar métodos de recolha de informação vital ao aumento da produção. Além disso, devido aos problemas climáticos referenciados na secção 1 deste trabalho, a demanda pela automatização e pela decisão inteligente, são fatores cruciais de forma a atingir os objetivos propostos. Desta forma, as redes ad-hoc e as redes de sensores possuem um papel cada vez mais importante na melhoria dos métodos de rega e monitorização das diferentes culturas.

Devido principalmente ao fator “distância”, grande parte das redes de sensores usadas na agricultura e na irrigação de grandes espaços verdes são redes sem fios.

**4.1 Redes de sensores sem fios**

No campo da irrigação, as redes de sensores sem fios têm como objetivo a monitorização do solo e do ambiente através de sensores, recolhendo os dados enviando-os para um computador, onde serão guardados em bases de dados e posteriormente analisados. Segundo Loureiro et al. (2003) [21], as redes de sensores sem fios (WSN)[[19]](#footnote-19), diferem das redes tradicionais devido principalmente ao número de sensores, ao baixo consumo, aos mecanismos de autoconfiguração e à necessidade de reorganização caso um dos nós falhe ou esteja danificado.

As WSN são, na sua essência, uma subclasse das redes *ad hoc[[20]](#footnote-20)*, pois são descentralizadas em relação ao envio e receção de dados, ou seja, qualquer nó pode enviar ou receber dados alterando o seu estado conforme seja solicitado Verona et. al. (2010) [31].

Os nós que compõem uma WSN são constituídos por sensore(s), microcontrolador, emissor/recetor rádio e geralmente por uma bateria.

Por sua vez, e além de comunicarem entre si, os nós que compõem a rede comunicam com o *gateway[[21]](#footnote-21)* que faz a interligação entre a rede e um computador que por sua vez pode estar ligado à Internet.

Uma das preocupações com uma rede sem fios é, sem dúvida, a sua autonomia. Geralmente as WSN são alimentadas por baterias com maior ou menor capacidade. Existem, no entanto, alternativas como o uso de pequenos painéis fotovoltaicos, que permitem uma extensão da sua autonomia ou mesmo a sua independência energética.

Além disso, os protocolos de comunicação podem auxiliar nessa tarefa dependendo do tipo de uso a dar à rede: monitorização continua, com intervalos pré-estabelecidos ou as que recolhem dados quando solicitado.

**4.2 Módulos de comunicação sem fios**

Os avanços na tecnologia sem fios estimularam a aplicação de sensores e/ou atuadores sem fios em experiências de controlo ou monitorização de rega.

Por um lado, consequência dos custos decrescentes das tecnologias wireless, por outro uma padronização dos protocolos de comunicação.

Dependendo dos requisitos de distância ou potência, uma ampla gama de protocolos de comunicação pode ser aplicada nas infraestruturas de rede. Protocolos *wireless* de baixo consumo tais como o Zigbee e LoRa estão a tornar-se populares pois permitem a comunicação entre sensores sem grandes preocupações energéticas podendo ser alimentados com pequenos painéis solares ou baterias.

Estas tecnologias têm atraído muitos esforços de pesquisa durante os últimos anos, impulsionadas pela crescente maturidade e adoção de padrões ISO[[22]](#footnote-22), como as tecnologias Bluetooth, ZigBee e LoRa para WSN. Atualmente estas tecnologias são muito promissoras em vários campos tais como, monitorização ambiental, irrigação, pecuária ou estufas.

Os sistemas são geralmente compostos por alguns concentradores e uma grande quantidade de pequenos nós de sensores. Normalmente, esses nós sensores consistem em três componentes: deteção (sensores), processamento (microcontrolador) e comunicação (módulo *wireless*). Cada nó sensor sem fios comunica com uma unidade de *gateway* ou com um concentrador (dependendo do protocolo) que, por sua vez, pode comunicar com outros computadores através de outras redes, tais como redes LAN[[23]](#footnote-23), WLAN[[24]](#footnote-24), CAN[[25]](#footnote-25), WWAN[[26]](#footnote-26) ou a internet.

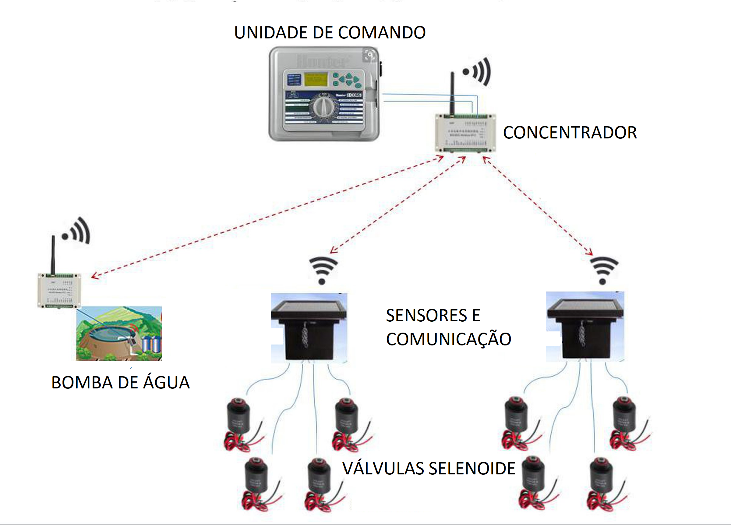


Fig.4. Exemplo de um sistema de rega baseado numa rede WLAN.

Existem no mercado diversas marcas que comercializam módulos (Fig. 5) sem fios que oferecem um variado número de periféricos integrados incluindo por exemplo ADC[[27]](#footnote-27), DAC[[28]](#footnote-28), Timers[[29]](#footnote-29), protocolos de barramento UART[[30]](#footnote-30), controladores DMA[[31]](#footnote-31), entre outros. Normalmente estes módulos assentam no padrão IEEE 802.15.4[[32]](#footnote-32) que especifica a camada física e efetua o controlo de acesso para redes sem fios pessoais com baixas taxas de transmissão.



Fig, 5. Exemplo de um módulo sensor wireless (IMote2).

No entanto, estes módulos podem ser construídos à medida das necessidades de determinado projeto, utilizando plataformas de desenvolvimento programáveis (Fig.6) tais como o Arduino[[33]](#footnote-33) ou o MSP430[[34]](#footnote-34)*.* Se quisermos reduzir os consumos e os custos podemos ainda usar estas plataformas no formato *barebone[[35]](#footnote-35)*.

Nestes casos os sensores necessários são adquiridos separadamente, bem como os módulos de comunicação sem fios, tornando as opções de quase ilimitadas e mantendo os custos reduzidos.

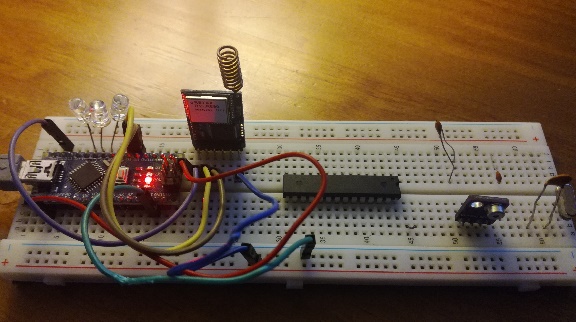
****

Fig. 6. Plataforma de Desenvolvimento Arduíno na sua versão Nano com modulo de comunicação LoRa REYAX890 em testes colocados numa *breadboard*.

**4.3 Protocolos de comunicação sem fios**

O padrão IEEE 802.15.4 oferece as bases para as camadas inferiores de uma rede LR-WPAN[[36]](#footnote-36) e é mantido pelo mesmo grupo de trabalho do protocolo IEEE 802.15. Este padrão incide no baixo custo e na comunicação de baixa velocidade omnipresente entre os diversos dispositivos utilizados nos sistemas de rega automatizada (em contraste com outros, mais orientadas ao utilizador final, tal como o WiFi[[37]](#footnote-37) (IEEE 802.11).

Seguidamente serão numerados alguns dos protocolos de comunicação mais utilizados no mundo do IoT, e que servem também o propósito das comunicações *wireless* usadas nos sistemas de rega automatizada.

4.3.1 ZigBee

O ZigBee surgiu em 1998 e é definido pelo *Standard* IEEE 802.15.1 e mantido pela ZigBee *Aliance*. É um protocolo de rede local de *mesh* (LAN)[[38]](#footnote-38) que utiliza a banda ISM[[39]](#footnote-39) dos 2,4 GHz. Foi originalmente projetado para automação e controlo nomeadamente no campo da domótica e possui um alcance até cerca de 100m. Utiliza uma tipologia de rede em estrela com 3 tipos de nós: coordenador, router e endpoint. Este protocolo possui uma velocidade de transmissão até 250Kbps e o seu consumo é bastante baixo, sendo estas as suas principais vantagens. Sensores de temperatura sem fios e sistemas de iluminação costumam usar ZigBee.

4.3.2 NB-IoT

NB-IoT[[40]](#footnote-40), é outra forma de lidar com dispositivos M2M[[41]](#footnote-41) de baixa potência. É baseado numa modulação DSSS[[42]](#footnote-42) e usa uma variante do padrão LTE, mas limita a largura de banda a 200kHz. A Huawei, a Ericsson e a Qualcomm são defensoras ativas deste protocolo e estão envolvidas no seu desenvolvimento. O NB-IoT concentra-se na cobertura indoor, baixo custo, baixo consumo de energia e com uma velocidade máxima de 250Kbits/s

4.3.3 SigFox

A SigFox é uma operadora de rede global de IoT fundada em 2009. Usa o DBPSK[[43]](#footnote-43) ou seja, numa direção e o GFSK[[44]](#footnote-44) na outra direção. A Sigfox emprega uma tecnologia proprietária que permite a comunicação usando a banda de rádio ISM, que usa a frequência de 868MHz para a Europa e 902MHz nos EUA. A tecnologia utiliza um sinal de longo alcance que passa livremente através de objetos sólidos, chamado de "*ultra narrowband*" e requer pouca energia, sendo denominada LPWAN[[45]](#footnote-45). A rede é baseada na topologia de estrela de um salto e requer que uma operadora móvel transmita o tráfego gerado pela rede. O sinal pode ser usado para cobrir grandes áreas e alcançar objetos subterrâneos. Sigfox suporta até 140 mensagens de hiperligação ascendente por dia. O tamanho da mensagem varia entre 0 a 12 bytes. Embora o tamanho seja reduzido, uma mensagem de 12 bytes é o suficiente para a maioria das aplicações de IoT. As antenas usadas pelo SigFox são instaladas em torres (tal como as antenas das redes móveis) e podem receber transmissões de dados de dispositivos como sensores de estacionamento ou contadores de água.

4.3.3 LoRa

LoRa é uma tecnologia rádio que permite comunicações entre dois dispositivos a grandes distâncias. Dependendo da geometria do terreno (urbano ou rural), o seu alcance pode ir até ás dezenas de quilómetros e, tudo isto, com consumo mínimo e velocidades de 0.3 Kbps até 50 Kbps. As principais aplicações são sistemas IoT como sensores e atuadores remotos (pressão, luminosidade, relés on/off, temperatura, etc.), sobretudo aqueles alimentados por baterias, e com *payloads[[46]](#footnote-46)* curtos. É uma tecnologia muitas vezes implementada em locais remotos, de difícil acesso e sem energia elétrica da rede. O protocolo que define a arquitetura do sistema é o LoRaWAN. Este protocolo define também os parâmetros de comunicação, o funcionamento, a segurança, o QoS[[47]](#footnote-47) e até a potência dos módulos de forma a maximizar a duração da bateria, tudo isto usando a tecnologia LoRa que assenta em MAC[[48]](#footnote-48).

Esta tecnologia tem revelado grandes vantagens especialmente pela cobertura e pelo baixo consumo de energia.

4.3.4 WiMAX

O padrão IEEE para WiMAX[[49]](#footnote-49) é o 802.16 e enquadra-se na categoria das redes sem fios de área metropolitana (*WMAN)[[50]](#footnote-50).* O WiMAX opera em duas bandas de frequência, de 2 a 11 GHz e 10 a 66 GHz, e possui um alcance de 40 a 50 quilómetros com velocidades de até 80 Mbp/s. Isso permite que LANs sem fios menores sejam interligadas pelo WiMAX, criando uma grande MAN[[51]](#footnote-51) sem fios. A rede entre cidades pode ser alcançada sem a necessidade de passagem de cabos que se revela dispendioso. Também é capaz de fornecer acesso de banda larga sem fios de alta velocidade aos utilizadores. Como a tecnologia pode operar em duas bandas de frequência, o WiMAX pode funcionar por LOS[[52]](#footnote-52) ou não. Na faixa de frequência de 2 a 11 GHz, a tecnologia funciona em modo NLOS[[53]](#footnote-53), onde um computador dentro de um edifício comunica com uma torre / antena fora do edifício. Transmissões de curta frequência não são facilmente interrompidas por obstruções físicas. Transmissões de frequência mais elevadas são usadas para serviços NLOS. Isso permite que as torres / antenas comuniquem umas com as outras a uma distância maior. Devido à infraestrutura e aos custos envolvidos, seria mais adequado fornecer os serviços de *backbone[[54]](#footnote-54)* para ISPs[[55]](#footnote-55) e grandes corporações, fornecendo acesso à Internet e a redes sem fios. Tem como principais vantagens a cobertura de grandes distâncias, mas com um custo e um consumo de energia elevado.

4.3.5 GPRS 3G e 4G

O 3G foi a primeira rede móvel de “alta velocidade” e é um nome que se refere a várias tecnologias aos padrões IMT-2000. 4G é a geração de padrões de rede móvel que surgiu após a 3G, e é o mais comummente usado para dados móveis. Podemos usar 3G e 4G para dispositivos IoT, mas o dispositivo necessita de uma fonte de alimentação constante ou que possa ser recarregada regularmente. As velocidades de transmissão variam conforme a geração, mas situam-se entre 100Kbps (GPRS) e 1Gbps (4G). Tem como principal vantagem a cobertura da rede.

Estes são alguns dos protocolos mais utilizados hoje em dia nas redes *wireless*, no entanto, existem muitos mais que ficam fora deste grupo e que dariam certamente para um outro trabalho.

O importante é reter que existe uma panóplia de protocolos, cada um com as suas especificações que nos permitem hoje em dia selecionar o mais adaptado a determinada tarefa de comunicação *wireless*.

**5. TRABALHO FUTURO**

Existe muito potencial na aplicação de controladores de rega mais eficientes e de sistemas de monitorização baseados em WSNs. Estas duas tecnologias estão interligadas pela necessidade de uma maior eficiência na rega de culturas e espaços verdes. A maior cooperação entre estas duas tecnologias encontra-se na irrigação de campos.

No entanto existem aspetos que requerem melhorias tanto da parte dos controladores, como da parte das WSNs, as quais são listados seguidamente.

* Custo: Uma solução de baixo custo é sempre desejável para aumentar o escopo e alcance dos aplicativos.
* Inteligência: uma inteligência que irá permitir a soluções futuristas reagir dinamicamente a múltiplos desafios desde a otimização energética até à resposta em tempo real.
* Facilidade de operação: normalmente, os utilizadores finais destes sistemas são pessoas não formadas, ou com pouca formação. Estes dispositivos necessitam de ser simples e fáceis de usar.
* Operação autónoma: as futuras soluções devem incluir uma maior independência e eficiência energética de forma a possuírem uma maior autonomia.
* Portabilidade: Para facilitar a aplicação, a portabilidade do sistema é essencial. Avanços recentes em sistemas embebidos, como o SiP[[56]](#footnote-56) ou o SoC[[57]](#footnote-57), poderão ajudar nesse sentido.
* Interoperabilidade: Interoperabilidade entre os diferentes componentes do sistema e as diferentes tecnologias de comunicação irão incrementar a funcionalidade geral do sistema.
* Baixa manutenção: é essencial projetar um sistema que requeira um esforço mínimo de manutenção. Certamente irá minimizar o custo médio a longo prazo.
* Arquitetura robusta: uma arquitetura robusta e tolerante a falhas são necessárias para garantir sustentabilidade.

**6. CONCLUSÃO**

A otimização do uso da água na irrigação de culturas e de grandes espaços verdes tem recebido bastante atenção por parte da comunidade científica. O uso de técnicas avançadas de controlo é uma possibilidade promissora de forma a incrementar a eficiência da irrigação. Nesta pesquisa, apresenta-se uma revisão do estado da arte dos controladores de rega, das WSNs e o impacto que estas tecnologias podem ter no incremento da eficiência e na modernização da rega.

Os resultados relatados na literatura mostram que o uso dessas ferramentas pode ter um grande impacto na melhoria dos sistemas de rega, na sensorização das culturas, dos solos e no uso eficiente dos recursos hídricos.

O levantamento das obras existentes, levou-me a tirar algumas conclusões. O estado da arte destas tecnologias oferece soluções promissoras, mas muitas vezes ainda não implementadas pela maioria dos interessados nestes sistemas.

Os fatores por detrás destas não implementações são muitas vezes o desconhecimento destas tecnologias, e a contradição entre as várias funcionalidades requeridas pelos sistemas. Outro obstáculo a ter em conta é o custo económico da rede e dos nós sensores; esta é uma questão de grande relevância para melhorar a sustentabilidade e o desempenho de forma a incrementar a implementação de redes *wireless* nas infraestruturas de rega.

De futuro deverá ser desenvolvido um esforço suplementar para demonstrar as vantagens destes avanços técnicos na irrigação (rendimento e eficiência do uso da água, robustez e precisão), afim de impulsionar o desenvolvimento e a comercialização de novos produtos, o que por fim levará a um uso mais sustentável e racional da água.

**AGRADECIMENTOS**

O autor agradece ao Professor e amigo José Carlos Gil pela revisão do texto e sugestões apresentadas.

**REFERENCIAS**

[1] A. McCarthy, N. Hancock, S. Raine. Advanced process control of irrigation: the current state and an analysis to aid future development Irrigation Science (2011), pp. 1-10. Agriculture and Biology Journal of North America, 2 (1) (2011), pp. 80-88. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/257392019>; consultado em 3 de Novembro de 2018.

[2] B. Cardenas-Lailhacar, M.D. Dukes, G.L. Miller Sensor-based automation of irrigation on bermudagrass, during wet weather conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134 (2008), pp. 120-128. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/277891370>; consultado em 8 de novembro de 2018.

[3] B. Cardenas-Lailhacar, M.D. Dukes, G.L. Miller Sensor-based automation of irrigation on Bermuda grass, during dry weather conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136 (2010), p. 184 Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228481009>; consultado em 7 de novembro de 2018.

[4] Biekart, H.M., Connors, C.H. (1935) The greenhouse culture of carnations in sand. New Jersey Agr. Expt. Sta., New Brunswick, NJ.

[5] Colaizzi, Paul & Evett, Steve & O'Shaughnessy, Susan & Howell, Terry. (2012). Using plant canopy temperature to improve irrigated crop management. Proceedings of the 24th Annual Central Plains Irrigation Conference Colby. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/267370632>; consultado em: 3 de novembro de 2018.

[6] Diepen, C.A. & Wolf, J & van keulen, Herman & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: A simulation model of crop production. Soil Use & Management 5 (1989). - ISSN 0266-0032. 5. 10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x. Disponível em <https://eurekamag.com/research/002/001/002001682.php>; consultado em 11 de novembro de 2018.

[7] Eaton, F.M. (1931) A large sand culture apparatus. Soil Sci. 31:235–241.

[8] [Evett, s. R.](https://reeis.usda.gov/lmd4/projects/search?cols=Director&search_string=Evett,%20S.%20R.) Increasing crop water use efficiency through scada control of variable rate irrigation systems using plant and soil sensor feedback. Agricultural Research Service (2016). Disponível em <https://reeis.usda.gov/web/crisprojectpages/1007216-increasing-crop-water-use-efficiency-through-scada-control-of-variable-rate-irrigation-systems-using-plant-and-soil-sensor-feedback.html>; consultado em 2 de novembro de 2018.

[9] F.R. Miranda, R.E. Yoder, J.B. Wilkerson, L.O. Odhiambo An autonomous controller for site-specific management of fixed irrigation systems. Computers and Electronics in Agriculture, 48 (2005), pp. 183-197. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/222813681>; consultado em 3 de novembro 2018.

[10] Fiebig, A. and Dodd, I.C. (2016). Feedback regulation of irrigation via soil moisture monitoring and its effects on plant growth and physiology. Acta Hortic. 1112, 9-16 DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1112.2 Disponível em <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1112.2>; consultado em 4 de novembro de 2018.

[11] Fredrik Stenemo and N. Jarvis, “MACRO 5.2: A model of water flow and solute transport in macroporous soil”. Swedish University of Agricultural Science, 2010. Disponível em <https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/ckb/modeller_dokument/macro-users-guide-2010.pdf> ; consultado em 4 de novembro de 2018.

[12] G. Hoogenboom, J. Jones, P. Wilkens, C. Porter, W. Batchelor, L. Hunt, K. Boote, U. Singh, O. Uryasev, W. Bowen Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0 [CD-ROM], vol. 1, University of Hawaii, Honolulu, HI (2004) pp. 235–265.

[13] G. Pannocchia, N. Laacho, J.B. Rawlings A candidate to replace PID control. Siso-constrained lq control AIChE Journal, 51 (2005), pp. 1178-1189. Disponível em <http://folk.ntnu.no/skoge/puublications_others/2005_pannochio_mpc-pid_aichej.pdf>; consultado em 4 de novembro de 2018.

[14] Gericke, W.F. (1922) “Magnesia injury” of plants grown in nutrient solutions. Bot. Gaz. 74:110–113.

[15] [Global Water Shortage Risk Is Worse Than Scientists Thought](https://www.huffingtonpost.com/entry/water-scarcity-study_us_56c1ebc5e4b0b40245c72f5e). Huffingtonpost.com. 15 February 2016. Disponível em <https://www.huffingtonpost.com/entry/water-scarcity-study_us_56c1ebc5e4b0b40245c72f5e>; consultado em 2 novembro de 2018.

[16] Goodchild, Martin & D Kühn, K & J Burek, A & Jenkins, Malcolm & J Dutton, A. (2015). A Method for Precision Closed-loop Irrigation Using a Modified PID Control Algorithm. Sensors and Transducers. 188. 61-68. Disponível em <https://www.researchgate.net/A-schematic-of-the-PID-controller-showing-the-closed-loop-irrigation-systems-consisting_fig1_314890442>; consultado em 2 de novembro de 2018.

[17] Green, W.J., Green, E. (1895) Sub-irrigation in the greenhouse. Ohio Agr. Expt. Sta. Wooster, OH, Bul. 61. Disponível em <https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/61065/OARDC_bulletin_n061.pdf?sequence=1>. consultado em 11 de novembro de 2018.

[18] H. Turral, J. Burke, J.M. Faures. Climate Change, Water and Food Security, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome (2011). Disponível em <http://www.fao.org/docrep/014/i2096e/i2096e.pdf>; consultado em 8 de novembro de 2018.

[19] J. C. van Dam, Piet Groenendijk, Rob F.A. Hendriks, Joop G. Kroes. Soil Water Atmosphere Plant (SWAP). Disponível em <http://edepot.wur.nl/39776>; consultado em 8 de novembro de 2018.

[20] J. Love. Process Automation Handbook: A Guide to Theory and Practice Springer-Verlag (2007) pp. 155–171.

[21] Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. “Redes de Sensores Sem Fio,” Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – SBRC 2003, pp 179 226, Natal, 2003. Disponível em <https://homepages.dcc.ufmg.br/~linnyer/minicursoSBRC2003.pdf>. consultado em 11 de novembro de 2018.

[22] O. Mayr, The Origins of Feedback Control MIT Press, Cambridge, MA (1975). Disponível em <https://archive.org/details/TheOriginsOfFeedbackControlOttoMayr/page/n13>; consultado em 2 de novembro de 2018.

[23] R. Cáceres, J. Casadesús, O. Marfà Adaptation of an automatic irrigation-control tray system for outdoor nurseries Biosystems Engineering, 96 (2007), pp. 419-425. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/223255523>; consultado em 03 de novembro 2018.

[24][Rhuanito Soranz Ferrarezi](http://horttech.ashspublications.org/search?author1=Rhuanito+Soranz+Ferrarezi&sortspec=date&submit=Submit), [Geoffrey Matthew Weaver](http://horttech.ashspublications.org/search?author1=Geoffrey+Matthew+Weaver&sortspec=date&submit=Submit),[Marc W. van Iersel](http://horttech.ashspublications.org/search?author1=Marc+W.+van+Iersel&sortspec=date&submit=Submit), [Roberto Testezlaf](http://horttech.ashspublications.org/search?author1=Roberto+Testezlaf&sortspec=date&submit=Submit) irrigation: Historical Overview, Challenges, and Future Prospects. Disponível em <http://horttech.ashspublications.org/content/25/3/262.full#xref-ref-53-1>; consultado em 3 de novembro de 2018.

[25] [S. Joe Qin](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066102001867#!) [Thomas A. Badgwellb](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066102001867" \l "!). A survey of industrial model predictive control technology, Department of Chemical Engineering, The University of Texas at Austin. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066102001867>. consultado em 2 de novembro de 2018.

[26] S. Bennett. A brief history of automatic control, IEEE Control Systems Magazine (June) (1996), pp. 17-25 de 2018. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/506394>. consultado em 2 de novembro de 2018.

[27] S.A. O'Shaughnessy, S.R. Evett Canopy temperature-based system effectively schedules and controls center pivot irrigation for cotton, Agricultural Water Management, 97 (2010), pp. 1310-1316. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377410001095>. consultado em 11 de novembro de 2018.

[28] S.K. Luthra, M.J. Kaledhonkar, O.P. Singh, N.K. Tyagi Design and development of an auto irrigation system Agricultural Water Management, 33 (1997), pp. 169-18. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377496012929>; consultado em 11 de novembro de 2018.

[29] UN, 2009. World Water Assessment Programme (2009). “Water in a Changing World: The 3rd United Nations World Water Development Report. UNESCO, Paris”. Disponível em <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001819/181993e.pdf>; consultado em 10 novembro de 2018.

[30] UN, 2008. World Population Prospects: The 2008 Revision. Disponível em <http://un.org/esa/population/publications/wpp2008_highlights.pdf>; consultado em 10 de novembro 2018.

[31] Verona, A. B. “Simulação e Análise de Redes de Sensores Sem Fio Aplicadas à Viticultura,” Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

Disponível em <http://www.din.uem.br/pos-graduacao/mestrado-em-ciencia-da-computacao/arquivos/dissertacoes-1/Andre%20Barbosa%20Verona.pdf>; consultado em 11 de novembro de 2018.

[32] Withrow, R.B., Biebel, J.P. (1936) A subirrigation method of supplying nutrient solutions to plants growing under commercial and experimental conditions. J. Agr. Res. 53:693–701.

1. Reenvio de informação a um computador que, após a ter recebido, pode alterar a sua resposta ou o seu desempenho. [↑](#footnote-ref-1)
2. Regra (ou conjunto de regras) que pretende obter uma aproximação à solução de um problema. [↑](#footnote-ref-2)
3. Aparelho de rega (aspersor). [↑](#footnote-ref-3)
4. *Proportional Integral Derivative.* [↑](#footnote-ref-4)
5. Valor alvo que um sistema de controlo automático tentará alcançar. [↑](#footnote-ref-5)
6. Entradas de um sistema. [↑](#footnote-ref-6)
7. Perda de água do solo por [evaporação](https://pt.wikipedia.org/wiki/Evapora%C3%A7%C3%A3o) e a perda de água da planta por [transpiração](https://pt.wikipedia.org/wiki/Transpira%C3%A7%C3%A3o). [↑](#footnote-ref-7)
8. https://acclima.com/ [↑](#footnote-ref-8)
9. http://www.irrometer.com/ [↑](#footnote-ref-9)
10. https://www.rainbird.eu/ [↑](#footnote-ref-10)
11. https://www.hunterindustries.com/ [↑](#footnote-ref-11)
12. *Soil Water Content* [↑](#footnote-ref-12)
13. https://vivo.ufl.edu/display/n3429 [↑](#footnote-ref-13)
14. Controlo *por ant*ecipação. Orientação preventiva e estratégica com foco no futuro e suas as possibilidades. [↑](#footnote-ref-14)
15. *Soil Water Content* [↑](#footnote-ref-15)
16. *Soil Water Tension* [↑](#footnote-ref-16)
17. *Soil Plant Atmosphere* [↑](#footnote-ref-17)
18. *Model Predictive Controler* [↑](#footnote-ref-18)
19. *Wireless Sensor Networks* [↑](#footnote-ref-19)
20. Redes em que todos os terminais funcionam como [routers](https://pt.wikipedia.org/wiki/Roteador). [↑](#footnote-ref-20)
21. [Nó](https://pt.wikipedia.org/wiki/N%C3%B3_(redes_de_comunica%C3%A7%C3%A3o)) de rede equipado para interligar com outra rede que usa [protocolos](https://pt.wikipedia.org/wiki/Protocolo_(ci%C3%AAncia_da_computa%C3%A7%C3%A3o)) de comunicação diferentes. [↑](#footnote-ref-21)
22. *International Organization for Standards* [↑](#footnote-ref-22)
23. *Local Area Network* [↑](#footnote-ref-23)
24. *Wireless Local Area Network* [↑](#footnote-ref-24)
25. *Control Area Network* [↑](#footnote-ref-25)
26. *Wide Wireless Area Network* [↑](#footnote-ref-26)
27. *Analog Digital Converter* [↑](#footnote-ref-27)
28. *Digital Analog Converter* [↑](#footnote-ref-28)
29. Temporizadores que são utilizados para gerar bases de tempo [↑](#footnote-ref-29)
30. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* [↑](#footnote-ref-30)
31. *Direct Memory Access* [↑](#footnote-ref-31)
32. [*Institute of Electrical and Electronics Engineers*](https://en.wikipedia.org/wiki/Institute_of_Electrical_and_Electronics_Engineers) [↑](#footnote-ref-32)
33. https://www.arduino.cc/ [↑](#footnote-ref-33)
34. http://www.ti.com/microcontrollers/msp430-ultra-low-power-mcus/overview.html# [↑](#footnote-ref-34)
35. Plataforma com os componentes básicos que serve de base a um [computador](https://pt.wikipedia.org/wiki/Computador) ou microcontrolador [↑](#footnote-ref-35)
36. *Low Rate Wireless Personal Area Network* [↑](#footnote-ref-36)
37. *Wireless Fidelity* [↑](#footnote-ref-37)
38. *Local Area Network* [↑](#footnote-ref-38)
39. *Industrial, Scientific and Medical* [↑](#footnote-ref-39)
40. *Narrowband IoT* [↑](#footnote-ref-40)
41. *Machine To Machine* [↑](#footnote-ref-41)
42. *Direct Sequence Spread Spectrum* [↑](#footnote-ref-42)
43. *Differential Binary Phase-Shift Keying* [↑](#footnote-ref-43)
44. *Gaussian Frequency Shift Keying* [↑](#footnote-ref-44)
45. *Low Power Wide Area Network* [↑](#footnote-ref-45)
46. Tamanho de uma transmissão de dados [↑](#footnote-ref-46)
47. *Quality of Service* [↑](#footnote-ref-47)
48. *Media Access Control* [↑](#footnote-ref-48)
49. *Worldwide Interoperability for Microwave Access* [↑](#footnote-ref-49)
50. *Wide Metropolitan Area Network* [↑](#footnote-ref-50)
51. *Metropolitan Area Network* [↑](#footnote-ref-51)
52. *Line of Sight* [↑](#footnote-ref-52)
53. *Non-Line of Sight* [↑](#footnote-ref-53)
54. Rede de transporte [↑](#footnote-ref-54)
55. *Internet Service Providers* [↑](#footnote-ref-55)
56. *System In a Package* [↑](#footnote-ref-56)
57. *System On a Chip* [↑](#footnote-ref-57)