

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO**AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO COM ESP32 UTILIZANDO MQTT E SENSORES AMBIENTAIS EM UM SISTEMA IoT SIMULADO EM NUVEM**

Josiely Aparecida do Espírito Santo Toledo, Laura Luiz Trigo, Rafael Ryan Ramos de Souza, Wagner dos Santos Clementino de Jesus.

Universidade do Vale do Paraíba, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, josielytoledo@univap.br, ltrigo@univap.br, souzaramos2001@gmail.com, wagner@univap.br.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema IoT para automação de irrigação utilizando o microcontrolador ESP32 integrado a sensores ambientais e comunicação via MQTT. O circuito foi inicialmente validado na plataforma de simulação *Wokwi* e posteriormente conectado ao serviço em nuvem *ThingsBoard*, permitindo o envio de telemetria e a visualização dos dados em dashboards interativos. Os resultados demonstraram leituras estáveis de temperatura, umidade do ar, umidade do solo e luminosidade, bem como acionamento automático dos atuadores conforme regras definidas. A transmissão contínua dos dados evidenciou confiabilidade mesmo em situações de reconexão de rede. A arquitetura empregada mostrou-se escalável, possibilitando a inclusão futura de novos sensores e funcionalidades. Conclui-se que a solução atende aos requisitos de monitoramento ambiental e automação de irrigação, representando uma alternativa de baixo custo e grande aplicabilidade para aplicações em agricultura inteligente.

Palavras-chave: IoT, ESP32, MQTT, Automação de Irrigação.

Área do Conhecimento: Engenharias.

Introdução

A Internet das Coisas (IoT) tem se consolidado como uma das tecnologias mais transformadoras da atualidade, permitindo que dispositivos físicos sejam capazes de coletar, processar e transmitir dados de maneira autônoma, com menor intervenção humana (LEE *et al.*, 2017). Desde que o termo *Internet of Things* foi introduzido por Kevin Ashton em 1999, a IoT tem passado por uma rápida expansão, impulsionada pela miniaturização de componentes eletrônicos, pelo avanço das redes sem fio e pela crescente disponibilidade de conectividade global (HEDI *et al.*, 2017). Esse progresso tecnológico permitiu a incorporação de sensores, atuadores e interfaces de comunicação em objetos cotidianos, fazendo com que bilhões de dispositivos estejam hoje interconectados em escala mundial (ATZORI *et al.*, 2010). Essa ampla conectividade possibilita aplicações que abrangem desde cidades inteligentes e automação industrial até sistemas de monitoramento ambiental e agricultura de precisão. A essência da IoT reside na integração de sensores, comunicação em rede e plataformas de nuvem, que permitem monitoramento contínuo e tomada de decisão de forma eficiente (BERTE *et al.*, 2018).

A literatura destaca que a IoT não é apenas um conjunto de dispositivos interconectados, mas um ecossistema estruturado em múltiplas camadas dispositivos, rede, plataforma e serviços que atuam de forma integrada para fornecer automação, inteligência e acessibilidade (BERTE *et al.*, 2018). Nesse contexto, sensores têm papel central ao capturar informações do ambiente, enquanto protocolos leves e de baixa largura de banda, como MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), viabilizam a transmissão eficiente desses dados para plataformas em nuvem responsáveis por armazenamento (KHAN *et al.*, 2021), processamento e visualização por meio de dashboards interativos. Esse modelo arquitetural permite que sistemas IoT operem com eficiência mesmo em ambientes com recursos computacionais limitados (GUBBI *et al.*, 2013).

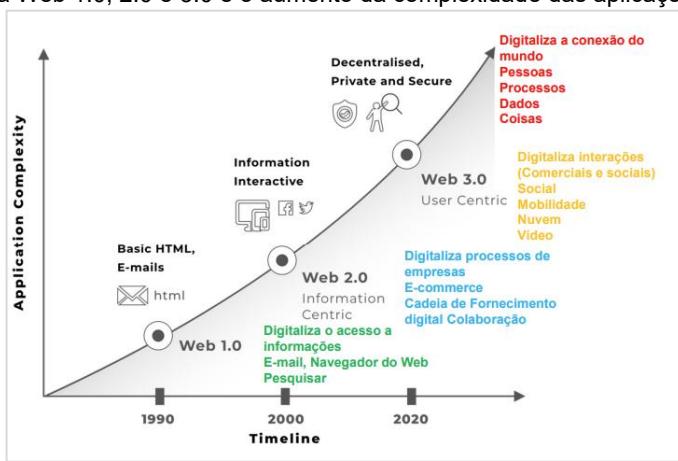
Apesar de seu avanço, o ecossistema IoT enfrenta desafios importantes relacionados à heterogeneidade tecnológica, segurança, escalabilidade e confiabilidade da comunicação. Como apontam estudos, muitos dispositivos operam em redes instáveis ou restritas, exigindo arquiteturas robustas e protocolos tolerantes a falhas capazes de manter a comunicação mesmo em condições

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

adversas. Nesse sentido, microcontroladores como o ESP32 associados a serviços de nuvem tornam-se alternativas viáveis e de baixo custo para aplicações reais, ao oferecerem conectividade Wi-Fi, flexibilidade de programação e suporte integrados a protocolos amplamente utilizados como MQTT (BHAGANAGARE *et al.*, 2025).

A evolução das aplicações web nas últimas décadas contribuiu diretamente para o surgimento da Internet das Coisas. Enquanto a Web 1.0 possibilitou apenas acesso básico à informação e a Web 2.0 introduziu interatividade e serviços conectados, a Web 3.0 ampliou esse cenário ao integrar mobilidade, computação em nuvem, dados em tempo real e conexão entre pessoas, processos e dispositivos (ANWAR, 2022). Esse avanço tecnológico criou o ambiente necessário para o desenvolvimento de sistemas inteligentes baseados em sensores conectados, como os utilizados neste projeto. A Figura 1 apresenta essa evolução tecnológica, destacando o caminho que levou ao surgimento de aplicações IoT.

Figura 1 - Evolução da Web 1.0, 2.0 e 3.0 e o aumento da complexidade das aplicações digitais.



Fonte: Material apresentado em aulas (2025).

O presente projeto desenvolve um sistema IoT para monitoramento ambiental e controle automatizado de irrigação. O protótipo foi inicialmente construído na plataforma de simulação *Wokwi*, possibilitando validar a integração entre sensores de temperatura, umidade do ar, umidade do solo e luminosidade antes da implementação final. O firmware foi aprimorado utilizando *PlatformIO*, configurando a comunicação via Wi-Fi e o envio de telemetria por MQTT para a plataforma *ThingsBoard*, responsável por armazenamento e visualização dos dados. A solução proposta demonstra a arquitetura IoT acessíveis e escaláveis, ao integrar coleta sensorial, processamento local, conectividade em nuvem e visualização em tempo real, contribuindo para aplicações como agricultura inteligente, ambientes monitorados e automação residencial.

Metodologia

Este trabalho foi estruturado em quatro etapas principais: (1) simulação do circuito em ambiente virtual, (2) desenvolvimento do *firmware* embarcado no microcontrolador ESP32, (3) integração com uma plataforma de Internet das Coisas (IoT) baseada em nuvem e (4) visualização e monitoramento remoto dos dados. A primeira etapa consistiu no uso da plataforma *Wokwi*, que permite simular circuitos eletrônicos utilizando componentes reais em ambiente computacional. Essa abordagem reduz custos e facilita a validação rápida do hardware antes da implementação física.

Na segunda etapa, realizou-se o desenvolvimento do *firmware* utilizando a IDE *PlatformIO* integrada ao Visual Studio Code. A lógica de coleta e processamento dos dados foi implementada em linguagem C++, incluindo as leituras do sensor DHT22 (temperatura e umidade do ar), LDR (luminosidade) e sensor capacitivo de umidade do solo. Esses sensores foram escolhidos pela ampla utilização em experimentos de agricultura inteligente e monitoramento ambiental, dada sua precisão e compatibilidade com o ESP32. O *firmware* também incorporou rotinas de pré-processamento, normalização e decisão automática, permitindo ativar atuadores como LEDs, relé e servomotor de acordo com regras pré-definidas, como níveis críticos de umidade do solo.

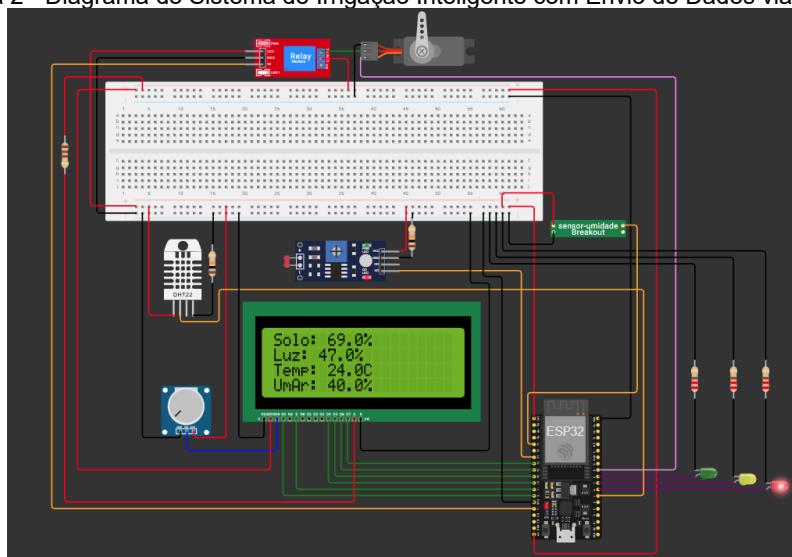
A Ciência do **NANO** e seu *impacto transformador no MACRO*

A conectividade Wi-Fi foi implementada por meio da biblioteca nativa WiFi.h, estabelecendo ligação entre o microcontrolador e a internet para transmissão dos dados. Para comunicação com a nuvem, utilizou-se o protocolo MQTT, conhecido por sua leveza, baixo consumo de banda e aplicação em sistemas IoT distribuídos (BHAGANAGARE *et al.*, 2025). A plataforma *ThingsBoard Cloud* foi selecionada como camada de processamento em nuvem para armazenamento e visualização, possibilitando autenticação via token, envio de telemetria e criação de dashboards interativos. Essa integração segue arquiteturas modernas de IoT baseadas em dispositivos inteligentes, comunicação e serviços em nuvem escaláveis. Na etapa seguinte, os dados coletados eram enviados periodicamente em formato JSON para o endpoint MQTT da *ThingsBoard*, sendo automaticamente armazenados, organizados e exibidos em widgets gráficos. A plataforma permite monitoramento em tempo real, histórico temporal e futura expansão do sistema para atuadores remotos, características alinhadas às principios de projeto de sistemas IoT modulares e escaláveis.

Todo o sistema foi projetado com foco em escalabilidade, confiabilidade e segurança. A arquitetura adotada permite adicionar novos sensores ou atuadores sem reestruturações complexas. Mecanismos de reconexão automática à rede foram implementados para garantir robustez frente a eventuais perdas de sinal, enquanto a plataforma *ThingsBoard* oferece suporte a criptografia TLS/SSL (*Transport Layer Security / Secure Sockets Layer*) conjunto de protocolos responsáveis por criptografar a comunicação entre cliente e servidor, garantindo confidencialidade, integridade e autenticação dos dados transmitidos, (KONESKI, *et al.*, 2018). Para isso, o ESP32 foi configurado com um cliente seguro (WiFiClientSecure) e validou o certificado raiz do servidor, incorporado diretamente no firmware. Esse certificado permite ao microcontrolador verificar a autenticidade do *ThingsBoard* antes de estabelecer a conexão MQTT.

Também foi implementada a sincronização de horário via NTP (*Network Time Protocol*), requisito essencial para a validação correta da cadeia de certificados TLS. Somente após essa verificação criptográfica o dispositivo envia telemetria utilizando MQTT seguro na porta 8883, assegurando que todos os dados trafeguem por um canal criptografado e imune a interceptações. Dessa forma, a metodologia adotada assegura que o protótipo desenvolvido possa ser ampliado, adaptado e aplicado em cenários reais de monitoramento ambiental ou agricultura. A Figura 2 apresenta o diagrama completo do circuito desenvolvido, incluindo microcontrolador, sensores e atuadores integrados.

Figura 2 - Diagrama do Sistema de Irrigação Inteligente com Envio de Dados via MQTT.



Fonte: Autores (2025).

Resultados

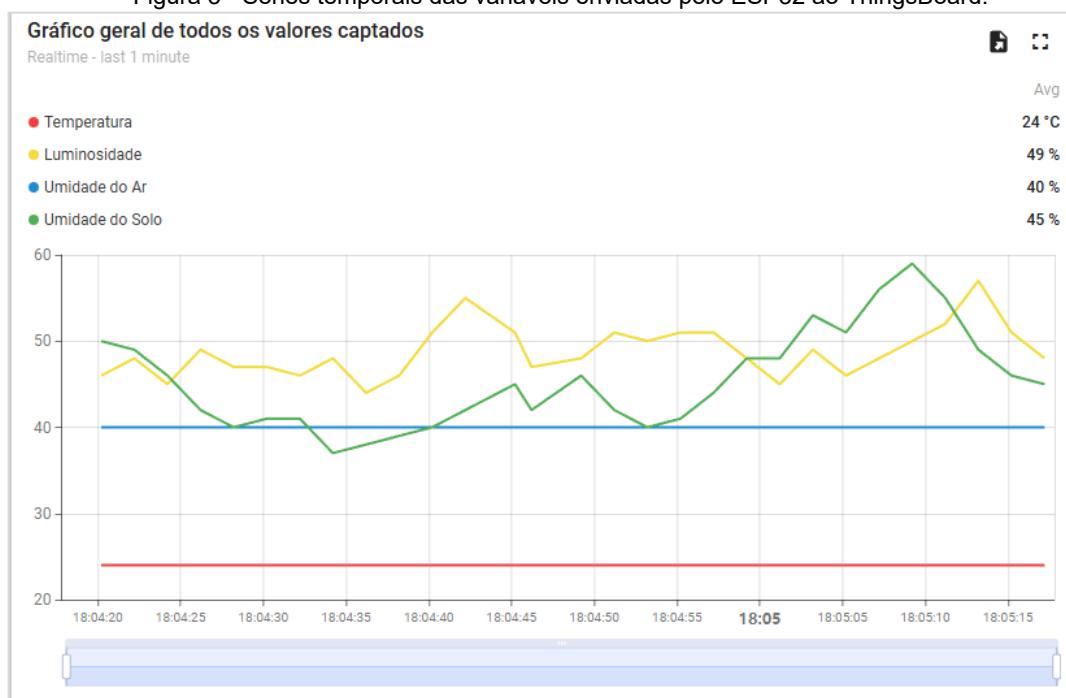
Os testes realizados na plataforma Wokwi demonstraram que o protótipo foi capaz de coletar corretamente os dados dos sensores integrados ao ESP32. As leituras de umidade do solo, luminosidade e temperatura e umidade do ar foram exibidas de forma contínua no display LCD, com atualização aproximada a cada dois segundos. Durante a simulação, os valores variaram conforme os

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

ajustes manuais no potenciômetro e nos sensores simulados, mostrando que o sistema responde adequadamente às mudanças ambientais. A conversão dos valores analógicos para percentuais mostrou-se estável, permitindo interpretar rapidamente as condições do ambiente monitorado.

A integração com a plataforma *ThingsBoard* também apresentou resultados positivos. Após a autenticação via token e estabelecimento da conexão MQTT, o ESP32 enviou telemetria de forma consistente, sem perdas perceptíveis durante os testes. Os dados enviados no formato JSON foram corretamente armazenados e exibidos em *widgets* gráficos no *dashboard*, incluindo séries temporais e indicadores individuais. Essa visualização em tempo real permitiu acompanhar o comportamento das variáveis ambientais simuladas e validar a confiabilidade da transmissão de dados. Para avaliar esse desempenho, foi gerado um gráfico em tempo real no *ThingsBoard*. A Figura 3 mostra as séries temporais recebidas via MQTT, evidenciando estabilidade nas leituras.

Figura 3 - Séries temporais das variáveis enviadas pelo ESP32 ao ThingsBoard.



Fonte: Autores (2025).

O sistema de atuadores apresentou desempenho satisfatório. O servomotor que representa a bomba de irrigação foi acionado automaticamente quando o valor de umidade do solo atingia níveis críticos (inferiores a 20%) ou quando a luminosidade indicava condição de noite. Da mesma forma, o módulo relé e os LEDs indicadores refletiram corretamente os estados de alerta, normalidade e irrigação contínua. Esse comportamento confirma que a lógica embarcada implementada no firmware foi eficaz no controle automatizado, representando um sistema real de irrigação inteligente. Durante os testes prolongados, o mecanismo de reconexão automática demonstrou ser funcional. Sempre que o Wi-Fi era temporariamente desconectado ou o servidor MQTT simulava instabilidade, o ESP32 retomava a conexão sem a necessidade de reiniciar o sistema. Esse resultado é relevante, pois demonstra confiabilidade da solução, característica fundamental para sistemas IoT que operam em ambientes críticos e sujeitos a quedas de comunicação.

De modo geral, observou-se que a arquitetura utilizada permite escalabilidade para futuras expansões. A estrutura de telemetria via MQTT e a organização dos dashboards possibilitam adicionar novos sensores e atuadores sem reconfigurar o sistema central. Assim, os resultados obtidos confirmam que o protótipo atende aos requisitos de coleta de dados, monitoramento remoto e automação, apresentando desempenho consistente e alinhado às expectativas de um sistema IoT voltado para agricultura inteligente.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Discussão

Os resultados obtidos demonstram que o sistema desenvolvido atende aos requisitos fundamentais de um projeto IoT aplicado à agricultura inteligente. A estabilidade na leitura dos sensores e a capacidade do ESP32 de processar e transmitir os dados em tempo real reforçam a viabilidade de soluções de baixo custo para monitoramento ambiental. Esses achados estão alinhados com estudos recentes que destacam o potencial de tecnologias embarcadas para otimizar o uso de recursos hídricos e reduzir desperdícios em pequenos e médios cultivos (ABDELMONEIM *et al.*, 2025).

A integração com a plataforma *ThingsBoard* se mostrou eficaz, evidenciando que sistemas baseados em MQTT oferecem desempenho adequado para aplicações que demandam atualização frequente de dados. A ausência de perdas relevantes na telemetria sugere que o protocolo é apropriado para ambientes com largura de banda limitada, de acordo com análises anteriores que apontam o MQTT como um dos protocolos mais eficientes para IoT por sua leveza e confiabilidade (SHVAIKA *et al.*, 2024). Além disso, a visualização gráfica permitiu interpretar tendências e variações de forma intuitiva, o que contribui para processos decisórios mais rápidos e precisos.

O comportamento dos atuadores reforça o potencial de automação no contexto agrícola. A ativação da bomba (servo) e do relé com base em critérios preestabelecidos de umidade e luminosidade demonstra que o sistema pode operar autonomamente sem necessidade de intervenção constante do usuário. Esse tipo de automação é essencial em cenários reais, nos quais a irrigação depende de fatores dinâmicos, e a eficácia de regras lógicas simples como alternativa a sistemas mais complexos ou de alto custo. Outro aspecto relevante diz respeito à robustez da conexão. A capacidade do ESP32 de reconectar-se automaticamente à rede Wi-Fi e ao servidor MQTT demonstra estabilidade operacional, uma característica frequentemente mencionada como crítica em implementações IoT práticas, onde interrupções temporárias de conectividade são comuns (SHVAIKA *et al.*, 2024). Esse comportamento é fundamental para garantir continuidade na coleta e transmissão de dados, especialmente em áreas rurais com cobertura instável.

Entretanto, os resultados indicam que a arquitetura adotada é escalável e pode ser expandida sem alterações significativas na estrutura central do sistema. Esse aspecto abre caminho para a incorporação de novos sensores e funcionalidades, permitindo sua utilização em diferentes contextos agrícolas. Além disso, a integração com a nuvem possibilita a implementação de recursos como alertas, controle remoto e análise preditiva, aproximando o protótipo de aplicações mais avançadas de agricultura de precisão.

Conclusão

O desenvolvimento do sistema de irrigação automatizada baseado em IoT demonstrou a viabilidade de integrar sensores ambientais, microcontroladores de baixo custo e comunicação via MQTT em uma solução eficiente e escalável. A simulação inicial no *Wokwi*, seguida da implementação do *firmware* no ESP32 e da conexão com a plataforma *ThingsBoard*, permitiu validar todo o fluxo de telemetria, desde a coleta dos dados até sua visualização em *dashboards*. Os resultados evidenciaram que o protótipo é capaz de operar de forma autônoma, reagindo a condições críticas de umidade e luminosidade, ao mesmo tempo em que garante estabilidade na transmissão dos dados mesmo em situações de reconexão de rede. A arquitetura empregada mostrou-se flexível para futuras expansões, permitindo a adição de novos sensores e atuadores sem a necessidade de reestruturações significativas. Além disso, o uso de serviços em nuvem possibilita a incorporação de recursos avançados, controle remoto e análise avançada, ampliando as possibilidades de aplicação do sistema em cenários reais de agricultura inteligente.

Dessa forma, conclui-se que o protótipo atende aos objetivos propostos, demonstrando desempenho consistente em monitoramento ambiental, automação de irrigação e transmissão de dados em tempo real. A solução representa um avanço no uso de tecnologias embarcadas e protocolos de baixa sobrecarga para otimizar o uso de água e auxiliar tomadas de decisão mais precisas em ambientes agrícolas.

Referências

LEE, Suk Kyu; BAE, Mungyu; KIM, Hwangnam. **Future of IoT networks: A survey**. *Applied Sciences*, v. 7, n. 10, p. 1072, 2017.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

HEDI, Ivan; ŠPEH, I.; ŠARABOK, Antonio. **IoT network protocols comparison for the purpose of IoT constrained networks.** In: 2017 40th international convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO). IEEE, 2017. p. 501-505.

ANWAR, Adeem Ali. **A survey of semantic web (Web 3.0), its applications, challenges, future and its relation with Internet of things (IoT).** In: Web Intelligence. Sage UK: London, England: SAGE Publications, 2022. p. 173-202.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. **The internet of things: A survey.** Computer networks, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010.

BERTE, Dan-Radu et al. **Defining the iot.** In: Proceedings of the international conference on business excellence. Pearson Educational, 2018. p. 118-128.

KHAN, Muhammad Almas et al. **A deep learning-based intrusion detection system for MQTT enabled IoT.** Sensors, v. 21, n. 21, p. 7016, 2021.

GUBBI, Jayavardhana et al. **Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.** Future generation computer systems, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013.

BHAGANAGARE, Sakshi et al. **Voice-Controlled Home Automation with ESP32: A Systematic Review of IoT-Based Solutions.** Journal of Microprocessor and Microcontroller Research, v. 2, n. 3, p. 1-13, 2025.

ABDELMONEIM, Ahmed A. et al. **IoT sensing for advanced irrigation management: A systematic review of trends, challenges, and future prospects.** Sensors (Basel, Switzerland), v. 25, n. 7, p. 2291, 2025.

SHVAIKA, Dmytro I.; SHVAIKA, Andrii I.; ARTEMCHUK, Volodymyr O. **Advancing IoT interoperability: dynamic data serialization using ThingsBoard.** Journal of Edge Computing, v. 3, n. 2, p. 126-135, 2024.

SANTOS, Wagner. **Material apresentado em aulas da disciplina de Internet das Coisas (IoT).** UNIVAP, 2025. Não publicado.

ESP32IO. **ESP32 Temperature and Humidity Sensor.** Disponível em: <https://esp32io.com/tutorials/esp32-temperature-humidity-sensor>. Acesso em: 18 nov. 2025.

GARDENING KNOW HOW. **How to Raise Humidity for Houseplants.** Disponível em: <https://www.gardeningknowhow.com/houseplants/hpgen/raise-humidity-for-houseplants.htm>. Acesso em: 18 nov. 2025.

KONESKI, Eduardo de Meireles et al. Ambiente de comunicação segura de Internet das Coisas com a utilização do MQTT e TLS. 2018.