

Avaliação da recomendação W3C Web of Things em um dispositivo IoT

Saymon Castro de Souza*, José Gonçalves P. Filho[†], Lucas G. de P. Salgado[‡] e Rafael B. Pedruzzi[§]

*Instituto Federal do Espírito Santo, Brazil

^{†‡§}Universidade Federal do Espírito Santo, Brazil

Email: *saymon@ifes.edu.br, [†]zegonc@inf.ufes.br, [‡]lucas.gi.salgado@gmail.com, [§]rafaelbelmockpedruzzi@hotmail.com

Resumo—A Internet das Coisas (IoT) vem sendo empregada na construção de aplicações e implantação de serviços em variados domínios e contextos. Atualmente, aplicações e serviços IoT já constituem um aliado importante na automatização de processos e na tomada de decisão. A tendência é que o volume e a importância do uso dos dados coletados dos dispositivos IoT seja cada vez maior e imprescindível no dia-a-dia das organizações. Recentemente, pesquisas em IoT tem sido direcionadas a novos desafios relacionados a estabelecer uma plataforma comum, a fim de atenuar o problema de fragmentação existente neste contexto, em decorrência da ampla heterogeneidade de dispositivos e soluções em IoT, especialmente no que se refere a maneira de descrever as características, as funcionalidades e a forma de interação com um dispositivo IoT. Nesse sentido, a recomendação W3C *Web of Things* tem se destacado como uma abordagem promissora, embora pouco explorada na literatura. Neste trabalho, implementamos a recomendação W3C *Web of Things* em um dispositivo IoT particular, composto por sensores e atuadores. Para validar a implementação, exploramos o uso prático da recomendação e, adicionalmente, foram realizados experimentos de avaliação que simulam cenários distintos de uso deste dispositivo IoT como parte de uma solução, onde foram observados um percentual pequeno, porém significativo de falhas ocorridas durante as requisições realizadas ao dispositivo IoT.

Index Terms—Internet of Things, Web of Things, Interaction Affordance, Thing Description.

I. INTRODUÇÃO

A iniciativa de embarcar inteligência nos objetos do dia-a-dia e posteriormente integrá-los à Internet, inaugura uma nova fase do desenvolvimento da Web, em que a principal promessa é a realização da Internet das Coisas (Internet of Things – IoT). Conceito originado em 2000 no Auto-ID Center do MIT [1], a visão de objetos inteligentes permeando o dia-a-dia das pessoas já era vislumbrado por Mark Weiser, considerado o pai da Computação Ubíqua, em seu famoso artigo “The Computer of 21th Century”[2].

A Internet das Coisas está transformando a visão padrão da Web combinando os mundos cibernético e físico, criando um novo ecossistema com novas oportunidades de programação por meio das interações e interconexões dos dois domínios.

A realização plena da Internet das Coisas e a sua adoção como uma infraestrutura de massa, acessível a todos os setores da sociedade, impõe a superação de uma série de desafios tecnológicos. A escala apresentada pelos ambientes IoT massivos eleva estes desafios a um outro patamar, exigindo preocupações adicionais com eficiência operacional, confiabilidade e disponibilidade. Todavia, como destacado,

reproduzir o cenário real com vistas aos testes das aplicações IoT massivas, pode ser uma tarefa árdua e custosa, dada a diversidade e complexidade do ambiente concreto de operação.

A integração de dispositivos inteligentes requer um esforço considerável e limita as oportunidades de programação para espaços inteligentes. Um sensor por si só tem valor limitado ao domínio de aplicação ao qual ele foi projetado; entretanto, existem enormes oportunidades para mercados abertos de serviços que combinam sensores, atuadores e múltiplas fontes de informação. Segundo [3], este desafio introduz, como primeiro passo, um requisito para uma maneira uniforme de descrever as coisas em espaços inteligentes em termos do que é uma coisa (por exemplo, seus componentes), o que faz (por exemplo, os serviços oferecidos) e como ela se comunica (por exemplo, quais protocolos são suportados). Essa descrição abre o caminho para resolver os desafios de integração, configuração e gerenciamento de coisas, além de permitir interações de forma intuitiva. Nessa direção, a recomendação W3C *Web of Things* (WoT) [4] tem se apresentado como uma proposta com enorme potencial, apesar de ainda ser pouco investigada na literatura [5], [6], [7], padronizando forma de expor as características e as funcionalidades de um dispositivo IoT, incluindo a forma de interação, os protocolos de comunicação, os formatos de dados, e a descrição semântica dos seus componentes, dentre outros. Sendo assim, a proposta deste estudo é realizar a implementação de um dispositivo IoT, em conformidade com a recomendação WoT, a fim de explorar suas principais características e funcionalidades.

Para avaliar a implementação realizada, foram realizados experimentos práticos que ilustram cenários de utilização distintos em que o dispositivo IoT atuaria como parte da solução.

II. W3C WEB OF THINGS

A W3C *Web of Things* (WoT) tem como origem uma iniciativa acadêmica com o objetivo principal de potencializar a interoperabilidade entre diferentes dispositivos e plataformas de IoT, bem como melhorar sua usabilidade. Em 2016, o W3C iniciou o grupo de trabalho WoT para definir um conjunto de mecanismos padrão para descrever as interfaces IoT e permitir que os dispositivos IoT se comuniquem facilmente entre si, independentemente de suas implementações subjacentes [2].

Em [8], reforçado em [9], é apresentada uma visão onde a descrição de um dispositivo (*Thing Description – TD*) de

Internet das Coisas consiste em um recurso semântico que descreve formalmente uma coisa única, com a qual um agente de software pode interagir, tendo como objetivo descrever os metadados e interfaces das Coisas, onde uma “Coisa” é definida como uma abstração de uma entidade física ou virtual que fornece interações e participa da *Web of Things*. As descrições de uma Coisa fornecem um conjunto de interações com base em um pequeno vocabulário que possibilita a integração de diversos dispositivos, potencializando a interoperabilidade de diversas aplicações. As *Thing Descriptions*, por padrão, são codificadas em um formato JSON que também permite o processamento JSON-LD. Este último fornece uma base poderosa para representar o conhecimento sobre as Coisas de uma maneira compreensível por máquina. Uma instância de uma *Thing Description* pode ser hospedada pelo próprio dispositivo ou hospedada externamente quando um dispositivo tem restrições de recursos computacionais.

O *Thing Description WoT* (TD) é um elemento central do *Web of Things* (WoT) [9] e pode ser considerado como o ponto de entrada de uma Coisa, sendo que, por meio da obtenção do *Thing Description*, é possível que aplicações possam conhecer, em mais detalhes, as características e capacidades de uma coisa. Uma instância de TD possui quatro componentes principais: metadados textuais sobre o dispositivo (Thing), um conjunto de formas de acesso à interação, que indicam como a Coisa pode ser usada, esquemas para os dados a ser trocados com o dispositivo, com intuito de facilitar a legibilidade por máquina e, finalmente, links da Web para expressar qualquer relação formal ou informal com outras coisas ou documentos na Web. O Modelo de Interação do W3C WoT define três tipos de recursos de Interação: (i) Propriedades - podem ser usadas para detectar e controlar parâmetros, como obter o valor atual ou definir um estado de uma operação; (ii) Ações - modelam a invocação de processos físicos, mas também podem ser usadas para abstrair chamadas remotas; e (iii) Eventos - usados para o modelo de comunicação por push em que notificações, eventos discretos ou fluxos de valores são enviados de forma assíncrona para o receptor.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção apresenta uma seleção de trabalhos correlatos que propõem o uso da recomendação *W3C Web of Things* em dispositivos IoT. A análise destes trabalhos foi realizada com base nos resultados de experimentos práticos obtidos por meio da adoção desta recomendação.

Em [7] é apresentado um trabalho seminal a respeito do *Thing Description*, sua importância no aspecto de descrição das características de um dispositivo e a interação com os elementos (sensores e atuadores) que o compõe, no qual é enfatizado que este seja aplicável a qualquer “Coisa”, independentemente da sua capacidade computacional ou do domínio de aplicação em que o dispositivo IoT é usado, dentre os hardwares citados como exemplo está o ESP8266. No entanto, embora os autores apresentem uma importante visão sobre o *Thing Description*, este trabalho não realiza experimentos e

avaliações sobre a implementação desta abordagem em um hardware.

O artigo descrito em [6] buscou apresentar os avanços do grupo de trabalho referente ao desenvolvimento da recomendação *W3C Web of things*, onde foi descrito sua arquitetura e o *Thing Description*. Um experimento de interoperabilidade foi brevemente relatado, em que os objetivos centrais eram: desenvolver uma aplicação capaz de analisar e consumir o *Thing Description* e ser apta a trocar dados de sensoriamento e atuação com um dispositivo IoT. Contudo, apesar deste estudo relatar o experimento realizado, nenhuma avaliação prática foi apresentada, detalhes referentes aos dispositivos IoT utilizados não foram discutidos e, por fim, embora o experimento seja descrito como relacionado à interoperabilidade, careceu de uma discussão mais específica, como pode ser visto, por exemplo, em [10].

O trabalho descrito em [11] apresenta o *Virtual-Thing*, uma proposta para simular, por meio de um software baseado em node-wot, um dispositivo IoT em conformidade com a recomendação *W3C Web of Things*. Foi discutido como as funcionalidades fornecidas pelo *Virtual-Thing* facilitam o trabalho de desenvolvimento e integração, tornando possível testar uma aplicação com uma entidade virtual que possui a mesma interface de um dispositivo IoT físico. Embora este estudo tenha apresentado uma contribuição relevante, experimentos do uso do *Virtual-Thing* não foram discutidos, especialmente no que se refere aos aspectos inerentes aos dispositivos IoT físicos, e suas conhecidas limitações de hardware, comuns a este cenário.

Em [5] é apresentado um ambiente de simulação para Internet das Coisas Massiva capaz de gerar um conjunto extenso de dispositivos IoT virtuais, com diversidade de sensores e atuadores. A característica principal deste ambiente é a adoção da recomendação *W3C Web of Things* como estratégia para uniformizar a maneira de expor as funcionalidades de um dispositivo e a forma de interagir com as funcionalidades disponíveis no mesmo. Experimentos de avaliação do dispositivo IoT virtual foram realizados, demonstrando sua funcionalidade e desempenho. No entanto, o dispositivo IoT virtual gerado pelo ambiente proposto não considera as limitações de hardware comumente existentes no contexto de IoT.

A análise de trabalhos relacionados permitiu estabelecer um panorama representativo de como os trabalhos se estruturam em termos de experimentos práticos da implementação da recomendação *W3C Web of Things*, em particular, ficou evidenciado a carência de estudos que explorem a implementação e avaliação em dispositivos IoT físicos, especialmente, em hardwares com capacidade computacional limitada, como o ESP8266, citado em [7]. Adicionalmente, experimentos em dispositivos IoT físicos podem fornecer características importantes que podem ser incorporadas em trabalhos que adotem abordagens de representação virtual de dispositivos IoT como nos trabalhos [11], [5].

IV. DISPOSITIVO IOT PROJETADO

A análise dos trabalhos correlatos mostra que existe uma carência de experimentos práticos referentes a implementação da recomendação *W3C Web of Things* em dispositivos IoT. Nesse sentido, foi realizada uma implementação da especificação *W3C Web of Things* em um dispositivo real, uma atividade de importância fundamental para a avaliação prática do padrão, mas ainda pouco explorada na literatura [6], [7]. A implementação teve a finalidade de investigar e demonstrar as principais características da arquitetura proposta e da linguagem *Thing Description (TD)*. O dispositivo (“*Thing*”) construído para este experimento é composto de um ESP8266 Node Mcu LoLin v3; um *passive buzzer*; um LED; um DHT11 - um sensor de temperatura e umidade com faixa de leitura de 0 a 50°C (com precisão de $\pm 2,0^\circ\text{C}$) e 20 a 90% umidade relativa (com precisão de $\pm 5,0\%$); e um DHT22 - um sensor de temperatura e umidade com faixa de leitura de -40 a 80°C (com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$) e 0 a 100% umidade relativa (com precisão $\pm 2,0\%$). A Figura 1 apresenta um esquema do circuito construído.

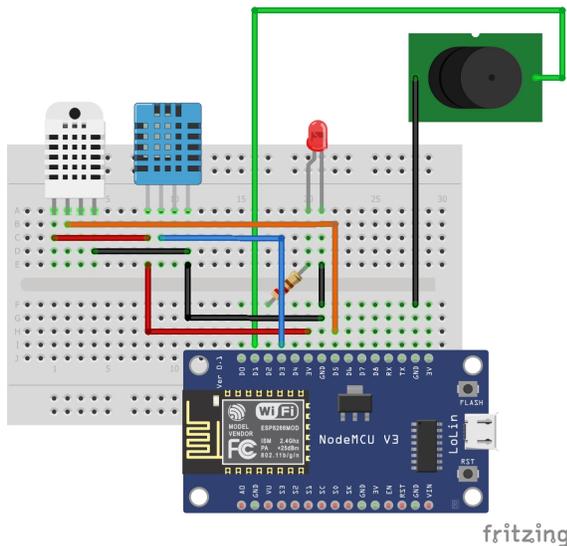


Figura 1. Dispositivo utilizado na implementação da especificação do W3C Thing Description

Conforme já mencionado, o *W3C Thing Description (TD)* tem como objetivo expor as características e funcionalidades de um dispositivo de forma que possa ser interpretado por máquina, adotando como formato o padrão de serialização JSON-LD 1.1. Nesta implementação de um estudo de caso, a especificação do TD foi adotada para prover a descrição geral do dispositivo, incluindo as ações ou atuadores (Led e o Buzzer), as propriedades (sensores de temperatura e umidade) e seus eventos.

O algoritmo presente no NodeMCU, além da implementação da lógica necessária para prover o funcionamento de seus componentes (ações, propriedades e eventos), tornando-os acessíveis por meio de um protocolo conhecido, também possui a capacidade de compor e expor

o TD. A exposição do *Thing Description* ocorre por meio do protocolo HTTP; assim, quando o usuário desejar conhecer todas as características do dispositivo, basta realizar uma requisição utilizando o método GET do protocolo HTTP no endereço do mesmo.

Ao receber o *WoT Thing Description*, o usuário é capaz de compreender a maneira pelo qual será possível interagir com as funcionalidades presentes no dispositivo. As ações descritas no TD possuem suas características e métodos de interação descritas, além de informar qual componente é controlado e quais são as ações disponíveis. A Figura 2 apresenta um trecho do *WoT Thing Description*, exposto pelo dispositivo construído, que ilustra uma ação que permite ao usuário interagir e realizar a mudança de estado do LED. Este trecho explicita a descrição da ação, os estados possíveis, o protocolo, método e o endereço onde é possível invocar a funcionalidade disponibilizada.

```
"toggle": {
  "description": "Turn on or off the led",
  "contentType": "string",
  "enum": [
    "on",
    "off"
  ],
  "forms": [
    {
      "href": "coap://IP:5683/lightled",
      "cov:methodName": "POST"
    }
  ]
}
```

Figura 2. Fragmento do WoT Thing Description - Action.

A Figura 3 apresenta um diagrama de sequência que descreve, em mais detalhes, o fluxo de atividades realizadas do usuário para o dispositivo, conforme a implementação executada. O controle de estado do LED, no estudo de caso, é utilizado para demonstrar o conceito de ação: o usuário pode controlar o estado de um LED utilizando o método POST via protocolo CoAP[12], passando os parâmetros “on” e “off”, sendo possível controlar o LED de acordo com sua necessidade (1). O dispositivo recebe a requisição e executa a lógica interna para realizar a ação determinada pelo usuário (2). Após a execução, um feedback com o novo estado do LED é gerado pelo dispositivo para informar o usuário o novo estado do LED (3). O feedback é estruturado em formato Json e enviado para o usuário requisitante por meio do protocolo CoAP (4).

Sensores são uma parte fundamental dos dispositivos que compõe a Internet das Coisas e a facilitação no processo de obtenção de dados e o entendimento de sua origem potencializam a sua utilização em diferentes contextos, viabilizando o desenvolvimento de novas soluções. Nessa direção, os sensores presentes no dispositivo deste estudo de caso foram expostos conforme preconizado na especificação *W3C Web of Things*.

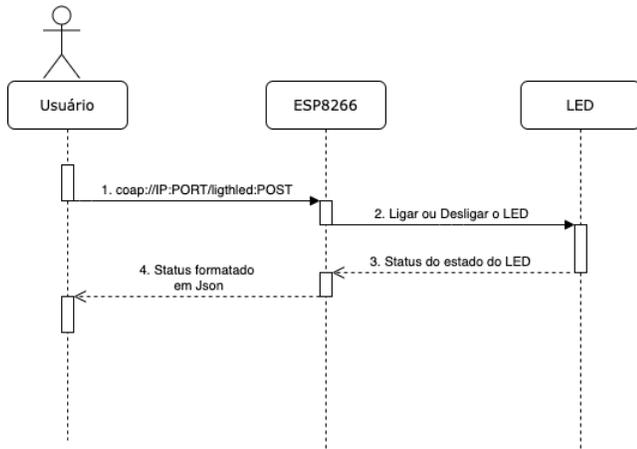


Figura 3. Interação - Ação.

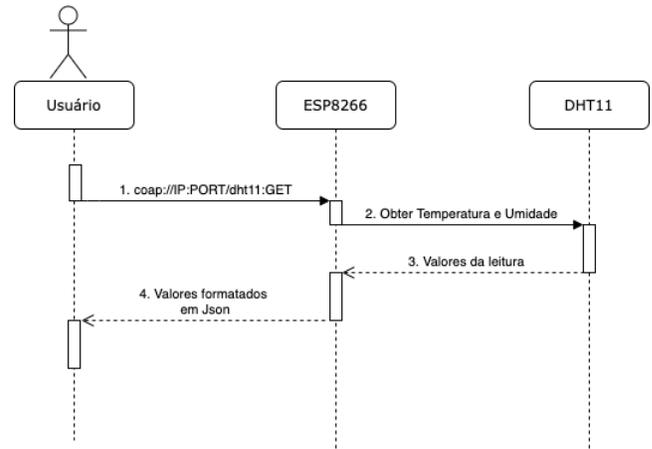


Figura 5. Interação - Propriedade.

A Figura 4 apresenta um fragmento do *Thing Description* da implementação realizada.

```

"status-dht11": {
  "description": "Shows the current temperature and humidity of the sensor DHT11",
  "type": "application/json",
  "forms": [
    {
      "op": "readproperty",
      "href": "coap://IP/dht11",
      "cov:methodName": "GET",
      "unit": "°C and % of humidity of the air"
    }
  ]
},

```

Figura 4. Fragmento do Thing Description – property

Como pode ser visto na Figura 4, a propriedade *status-dht11* retorna a temperatura e umidade, referente ao sensor DHT11, em formato JSON, sendo acessível por meio do protocolo CoAP através do método GET à URL *coap://IP/dht11*. Deste modo, tal implementação possibilita um maior nível de abstração, pois o sensor fica acessível como um serviço, presente no dispositivo, descrito pelo TD. O diagrama de sequência que demonstra este cenário está representado na Figura 5. Uma requisição de temperatura é usada para demonstrar o acesso às propriedades de um dispositivo no estudo de caso: o usuário inicia o processo, utilizando método GET do protocolo CoAP para fazer a requisição ao dispositivo conectado (1). O dispositivo conectado à rede recebe a solicitação e executa a lógica necessária para a obtenção da temperatura e umidade (2) fornecidos pelo sensor DHT11, o qual retorna a temperatura em graus celsius e a porcentagem de umidade relativa do ar (3) lidos do ambiente ao qual o dispositivo está localizado. Ao receber as leituras, o dispositivo processa os valores recebidos em formato JSON e os envia ao usuário que o requisitou usando o protocolo CoAP (4).

Expandindo o exemplo acima, o diagrama de sequência representado pela Figura 6 ilustra o processo pelo qual acontece o múltiplo sensoriamento, demonstrando as diferentes propriedades implementadas, acessíveis por meio do protocolo CoAP. Como já visto, o dispositivo é composto por dois

sensores de temperatura e umidade (DHT11 e DHT22). Tais sensores possuem diferentes faixas de leituras e sensibilidades, o que pode retornar diferentes resultados em um mesmo ambiente. O usuário deverá escolher a URL que representa o sensor ao qual tem interesse em obter as leituras e executar uma requisição utilizando o método GET do protocolo CoAP. O dispositivo executa a lógica necessária para realizar a leitura do sensor escolhido e faz a adequação do resultado em formato JSON. Ao final, o dispositivo envia o resultado ao usuário via protocolo CoAP.

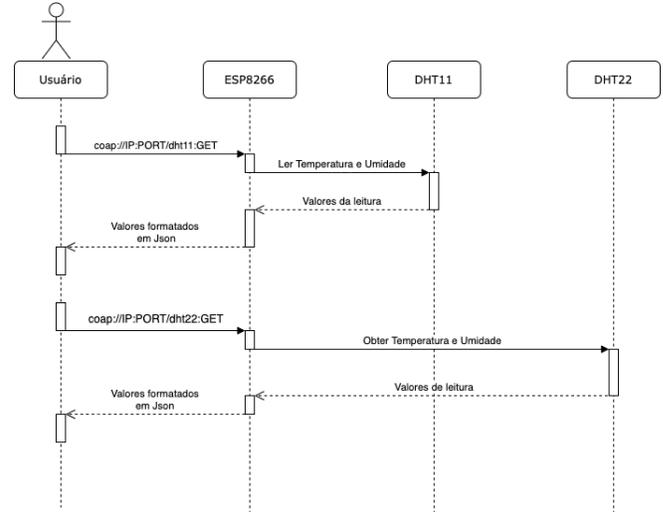


Figura 6. Interação - Propriedade com dois sensores.

Por fim, para demonstrar o conceito evento – presente na especificação *W3C Web of Things*, foi implementado um evento cujo objetivo é enviar uma notificação ao usuário caso a temperatura aferida seja superior a um determinado limite, acionando o atuador (*Buzzer*). A Figura 7 apresenta um fragmento do *Thing Description* fornecido pelo dispositivo deste estudo de caso, sendo composto de uma descrição, o tipo de dados esperado como retorno, o protocolo utilizado e

o local onde o usuário pode subscrever ao evento.

```

"overheating" : {
  "description": "System detects critical temperature (overheating)",
  "data": {
    "type": "application/json"
  },
  "forms": [
    {
      "href": "mqtt://mqtt.eclipse.org/Alarme",
      "contentType": "application/json",
      "op": "subscribeevent"
    }
  ]
}

```

Figura 7. Fragmento do WoT Thing Description – Evento

O diagrama de sequência da Figura 8 descreve, em mais detalhes, a implementação do conceito evento, consistindo em um processo cíclico de monitoramento de temperatura em que, periodicamente, o dispositivo ESP8266 requisita a leitura do sensor de temperatura, presente nos dispositivos DHT11 e DHT22. A regra de negócio implementada neste evento consiste em verificar se a temperatura obtida excede o valor limite definido. Caso verdadeiro, ocorre o acionamento do *passive buzzer* (dispositivo emissor de ondas mecânicas audíveis) com a finalidade de alertar a ocorrência do evento e uma notificação é enviada ao tópico especificado usando o protocolo MQTT [13]. Após as leituras atingirem valores abaixo ou igual ao limite, o dispositivo desativará o *buzzer* e publicará uma mensagem indicando a mudança de estado. Caso o usuário tenha interesse em receber notificações deste evento, o mesmo deve realizar uma subscrição no tópico do *broker* descrito no *Thing Description*. Neste evento, o dispositivo somente envia notificações caso haja mudança de estado na situação do alarme.

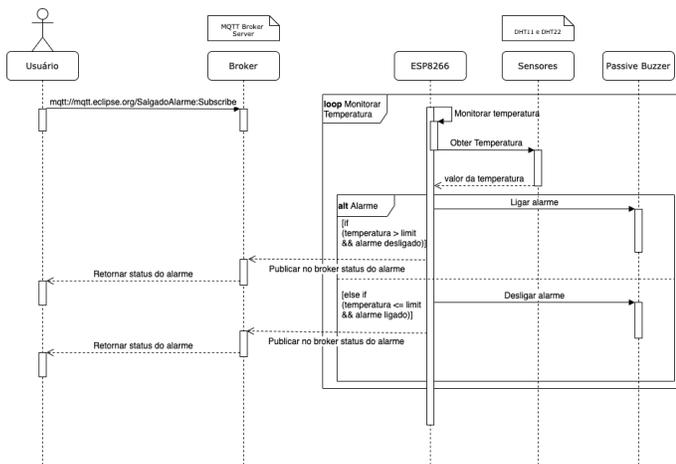


Figura 8. Interação - Propriedade com dois sensores.

Este caso exemplifica um aspecto da relevância de uma linguagem de descrição de dispositivos, pois a explícita descrição dos elementos que compõem um dispositivo, propicia ao usuário o poder de seleção de acordo com os requisitos do domínio da aplicação.

V. EXPERIMENTOS DE AVALIAÇÃO

Esta seção apresenta uma avaliação do dispositivo IoT projetado com suporte a recomendação *W3C Web of Things*. A metodologia de avaliação empregada foi baseada em um conjunto de experimentos práticos, descritos adiante. O objetivo central desta avaliação é expor este dispositivo a um ambiente que representa a demanda típica de um sistema de informação que adota dispositivos IoT como parte de sua solução, medindo indicadores que explicitem o comportamento do dispositivo em relação a demanda requerida. Para isto, foi construída uma aplicação cujo objetivo é requisitar dados de temperatura e umidade oriundos do sensor DHT11, conforme ilustrado pela Figura 9. Para isto, a aplicação construída solicita o *Thing Description* do dispositivo, ao receber tais informações, instancia um objeto cujos métodos são as interações disponíveis do dispositivo. A partir disto, uma iteração é iniciada a fim de requisitar informações de temperatura e umidade do sensor DHT11, considerando o intervalo de tempo entre as requisições.

Foram planejados dois experimentos em que: (i) representa um contexto de aplicação que requer um acesso síncrono ao dispositivo, ou seja, requer uma interação periódica às funcionalidades presentes no mesmo, ou seja, com intervalo entre requisições pré-determinado; e (ii) ilustra um cenário de aplicação com acesso síncrono, onde o intervalo entre requisições são valores aleatórios, com uma distribuição uniforme, entre um valor mínimo e máximo.

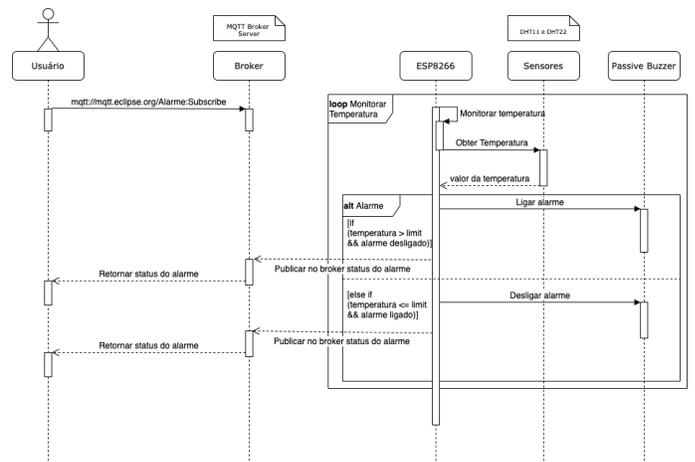


Figura 9. Avaliação do dispositivo IoT.

As seções V-A e V-B apresentam, em mais detalhes, os experimentos (i) e (ii) respectivamente, e discute os resultados obtidos, a seção VI apresenta as considerações finais deste estudo.

A. Experimento 1: Aplicações síncronas com intervalo entre as requisições previamente definido

Conforme introduzido na seção anterior, este experimento foi realizado com intuito de expor o protótipo de hardware e a implementação da recomendação *W3C Web of Things* a um ambiente cujo requisito da aplicação construída requer

interações com um dispositivo IoT em intervalos de tempo pré-determinados. O objetivo é compreender o comportamento da implementação realizada, expondo diversas variáveis, tais como tempo médio de resposta (TMR), tempo médio de leitura do sensor (TML), o percentual de falhas e sua origem. Para isto, foi construída uma aplicação capaz de requisitar, por meio de um intervalo de tempo pré-estabelecido, informações de temperatura e umidade do sensor DHT11. O experimento foi planejado para ser executado em 5 etapas, ilustrando diferentes intensidades de uso do dispositivo, para cada intervalo de tempo entre as requisições, conforme a Tabela I.

Tabela I
ETAPAS DO EXPERIMENTO SÍNCRONO COM INTERVALO ENTRE AS REQUISIÇÕES PREVIAMENTE DEFINIDO.

Etapa	Intervalo de tempo (ms)	Quantidade de requisições
1	10	100
		500
		1000
		5000
		10000
2	50	100
		500
		1000
		5000
3	100	100
		500
		1000
		5000
4	300	100
		500
		1000
		5000
5	500	100
		500
		1000
		5000
		10000

A realização das etapas supracitadas possibilitou avaliar o comportamento do dispositivo, permitindo mensurar o tempo médio de resposta e o tempo médio para leitura dos dados pelo sensor. A Tabela II apresenta os resultados obtidos no experimento.

É possível perceber que o tempo médio de resposta tende a cair consideravelmente com o aumento do intervalo entre cada requisição. Possivelmente, trata-se de um indicativo de limitações do hardware utilizado no dispositivo; entretanto, o tempo médio para leitura do sensor (DHT11) demonstra ser estável independentemente do volume de requisições e do intervalo entre as mesmas. Neste experimento, também foi possível observar um percentual relativamente pequeno de falhas. Nesse sentido, foi realizada uma investigação das falhas apresentadas em cada etapa e sua origem. Neste trabalho, a falha é entendida como uma requisição, realizada pela aplicação, que não obteve resposta do dispositivo. Foram identificados três pontos de falha, a saber: Em (i) é caracterizado pelas requisições que chegam ao dispositivo, porém, houve uma falha no processo da leitura do sensor (DHT11); Em (ii) se refere as interrupções súbitas no funcionamento do dispositivo (ESP8266); e por fim, (iii) indicam o não estabelecimento da

Tabela II
TEMPO MÉDIO DE RESPOSTA.

	Intervalo(ms)	Qtd. Req.	TMR (ms)	TML (ms)
1	10	100	162,48	1,83
	10	500	212,39	2,03
	10	1000	236,94	1,95
	10	5000	166,54	2,12
	10	10000	125,52	2,32
2	50	100	78,07	1,59
	50	500	167,31	1,89
	50	1000	222,59	2,00
	50	5000	200,72	2,22
	50	10000	107,48	2,36
3	100	100	78,82	1,93
	100	500	199,83	2,08
	100	1000	244,04	2,22
	100	5000	166,54	2,12
	100	10000	93,82	2,37
4	300	100	68,34	2,08
	300	500	164,23	2,22
	300	1000	167,87	2,39
	300	5000	90,81	2,31
	300	10000	55,84	2,69
5	500	100	42,67	2,54
	500	500	59,79	2,52
	500	1000	57,92	2,58
	500	5000	63,10	2,73
	500	10000	51,57	3,17

conexão entre a aplicação e o dispositivo, isso pode ocorrer em decorrência de um problema de comunicação de rede, falta de memória ou mesmo de uma falha do dispositivo (ii), dependendo do intervalo entre as requisições. A Tabela III apresenta os resultados referente as falhas ocorridas em cada etapa do experimento.

Tabela III
FALHAS DE REQUISIÇÕES AO DISPOSITIVO.

Etapa	Interv. (ms)	Qtd. Req.	Falhas			Total	%
			(i)	(ii)	(iii)		
1	10	100	0	0	0	0	0,0%
	10	500	5	8	12	25	5,0%
	10	1000	4	9	13	26	2,6%
	10	5000	7	8	9	24	0,5%
	10	10000	14	47	57	118	1,2%
2	50	100	0	0	0	0	0,0%
	50	500	6	9	12	27	5,4%
	50	1000	0	1	1	2	0,2%
	50	5000	15	47	59	121	2,4%
	50	10000	9	88	105	202	2,0%
3	100	100	2	1	2	5	5,0%
	100	500	4	4	7	15	3,0%
	100	1000	3	8	11	22	2,2%
	100	5000	7	8	9	24	0,5%
	100	10000	5	112	122	239	2,4%
4	300	100	0	1	1	2	2,0%
	300	500	0	0	0	0	0,0%
	300	1000	1	10	12	23	2,3%
	300	5000	1	25	27	53	1,1%
	300	10000	9	69	72	150	1,5%
5	500	100	0	0	0	0	0,0%
	500	500	0	3	3	6	1,2%
	500	1000	0	8	8	16	1,6%
	500	5000	0	34	44	78	1,6%
	500	10000	0	66	68	134	1,3%

O dispositivo utilizado no experimento foi implementado

em hardware de baixo custo e, embora apresente uma baixa taxa de erros, se faz necessária uma análise da origem das falhas. Como pode ser notado, analisando isoladamente cada etapa, em termos percentuais, a taxa de falhas não está relacionada ao volume de requisições, no entanto, observa-se que o maior intervalo entre as requisições (etapa 5) tende a estabilizar a taxa de falhas. Por fim, percebe-se que a falha do dispositivo tende a gerar falha de conexão, visto que as requisições realizadas no intervalo de tempo da indisponibilidade momentânea do dispositivo são medidas como falha do tipo conexão.

B. Experimento 2: Aplicações síncronas cujo intervalo entre requisições são valores aleatórios, com uma distribuição uniforme, entre um valor mínimo e máximo.

Esta seção tem como objetivo compreender o comportamento do dispositivo implementado em um ambiente onde uma aplicação pode requerer dados dos sensores onde o intervalo entre as requisições não é pré-determinado, analisando diversas variáveis, tais como tempo médio de resposta, tempo médio de leitura do sensor, o percentual de falhas e sua origem. Para isto, foi construída uma aplicação capaz de requisitar, por meio de um intervalo de tempo aleatório, informações de temperatura e umidade do sensor DHT11. Este experimento foi realizado em 5 etapas, em que a aplicação realizou 100, 500, 1000, 5000 e 10000 requisições de dados de temperatura e umidade, em que o intervalo de tempo entre requisições foi um valor entre 10ms e 500ms, de acordo com uma distribuição uniforme. A Tabela IV apresenta os resultados referentes aos tempos médios de resposta.

Tabela IV
TEMPO MÉDIO DE RESPOSTA.

Etapa	Qtd. Req.	TMR (ms)	TML (ms)
1	100	70,29	2,13
2	500	95,73	2,06
3	1000	103,16	2,11
4	5000	93,29	2,23
5	10000	62,94	2,56

Observa-se que o tempo médio de resposta, embora tenha uma certa variação, se mostrou relativamente estável se comparado com o experimento anterior. Percebe-se que o tempo médio para leitura do sensor permaneceu estável independente do volume de requisições da aplicação. A Tabela V apresenta uma análise das falhas ocorridas durante este experimento. De maneira análoga ao experimento anterior, as falhas foram categorizadas em três tipos: Em (i) é caracterizado pelas requisições que chegam ao dispositivo, porém, houve uma falha no processo da leitura do sensor (DHT11); Em (ii) se refere as interrupções súbitas no funcionamento do dispositivo (ESP8266); e por fim, (iii) indicam o não estabelecimento da conexão entre a aplicação e o dispositivo, isso pode ocorrer em decorrência de um problema de comunicação de rede ou mesmo de uma falha do dispositivo (ii), dependendo do intervalo entre as requisições.

Tabela V
TEMPO MÉDIO DE RESPOSTA.

Etapa	Qtd. Req.	Falhas			Total	%
		(i)	(ii)	(iii)		
1	100	1	1	2	4	4,00%
2	500	0	10	12	22	4,40%
3	1000	0	10	13	23	2,30%
4	5000	4	39	46	89	1,78%
5	10000	1	117	120	238	2,38%

Observou-se que a taxa de falhas nas etapas 1 e 2 tiveram um aumento relevante, em termos percentuais, se comparado com o experimento anterior, já as etapas 3, 4 e 5 manteve taxas de falhas equivalentes ao visto no experimento simulando aplicações de requisições periódicas.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação da especificação *W3C Web of Things*, em um dispositivo real, possibilitou demonstrar suas principais características e a avaliação realizada – simulando aplicações com requisitos distintos em termos de periodicidade de acesso às informações cedidas pelo dispositivo IoT, demonstrou o comportamento do mesmo em situações distintas de volume de requisições e intervalo entre as mesmas. Foi possível observar que o intervalo superior a 500ms entre requisições demonstrou apresentar estabilidade em termos de tempo médio de resposta. Uma descoberta deste experimento foram as falhas ocorridas durante as requisições, embora baixas em termos percentuais, são presentes. A origem destas falhas foi identificada e categorizada, conforme discutido nos experimentos. Por fim, as informações obtidas nos experimentos explicitam alguns importantes fatores que devem ser levados em consideração em um projeto de uma aplicação que adota dados oriundos de um dispositivo IoT como parte de sua solução. O padrão *W3C Web of Things* se mostrou adequado no seu propósito central – atuar no problema de interoperabilidade existente no ambiente de Internet das Coisas, promovendo uma padronização em termos de interação com os componentes do dispositivo IoT, da maneira de descrevê-lo, incluindo uma preocupação quanto à descrição semântica. Dispositivos com severas restrições de hardware conseguem estar em conformidade com esta recomendação, por meio de um elemento de software externo ao dispositivo, previsto na arquitetura, que é capaz de interagir com o dispositivo físico e fornecer uma camada de abstração em conformidade com o *W3C WoT*.

Direções futuras de pesquisa incluem a construção de um modelo de referência de falhas existentes no contexto de Internet das Coisas e explorar outros hardwares comumente utilizados no contexto de IoT para avaliar o comportamento dos mesmos, gerando parâmetros para subsidiar a evolução de ambientes de simulação em IoT.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo - FAPES pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Sarma, D. Brock, and K. Ashton, "The networked physical world. TR MIT-AUTOID-WH-001 MIT Auto-ID Centre,," *Auto-ID Center White Paper MIT- ...*, pp. 1–16, 2000. [Online]. Available: <http://222.autoidlabs.org/uploads/media/MIT-AUTOID-WH-001.pdf>
- [2] M. Weiser, "The Computer for the 21 st Century," *Scientific american*, vol. 265, no. 3, pp. 94–105, 1991.
- [3] A. E. Khaled, A. Helal, W. Lindquist, and C. Lee, "IoT-DDL-Device Description Language for the "T" in IoT," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24 048–24 063, 2018.
- [4] K. T. M. M. C. V. K. M. Kaebisch S. (2021, feb) W3C Web of Things (WoT). [Online]. Available: <https://www.w3.org/WoT/>
- [5] S. de Souza, J. P. Filho, L. Salgado, and R. Pedruzzi, "Um ambiente de geração massiva de dispositivos virtuais em internet das coisas," in *Anais Estendidos do X Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2020, pp. 1–8.
- [6] S. K. Datta and C. Bonnet, "Advances in Web of Things for IoT Interoperability," *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan, ICCE-TW 2018*, pp. 2–3, 2018.
- [7] S. Kaebisch and D. Anicic, "Thing description as enabler of semantic interoperability on the web of things," in *Proc. IoT Semantic Interoperability Workshop*, 2016, pp. 1–3.
- [8] V. Charpenay, S. Kabisch, and H. Kosch, "Introducing thing descriptions and interactions: An ontology for the web of things," in *CEUR Workshop Proceedings*, V. R. F. F. M. D. V. E. E. T. D. D. M. M. Krotzsch M. Maleshkova M., Ed., vol. 1783. CEUR-WS, 2016, pp. 55–66.
- [9] K. T. M. M. C. V. K. M. Kaebisch S. (2021, feb) Web of Things (WoT) Thing Description. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/wot-thing-description/>
- [10] S. C. de Souza and J. G. Pereira Filho, "Semantic interoperability in iot: A systematic mapping," in *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Springer, 2019, pp. 53–64.
- [11] H. B. Hassine, E. Korkan, and S. Steinhorst, "Virtual-thing: Thing description based virtualization," *CoRR*, vol. abs/1909.03297, 2019. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1909.03297>
- [12] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, "The constrained application protocol (coap)," 2014.
- [13] A. Banks and R. Gupta, "Mqtt version 3.1. 1," *OASIS standard*, vol. 29, p. 89, 2014.