Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Projeto Final de Graduação de Engenharia da Computação

Departamento de Informática - DI
Centro Técnico Científico - CTC
Curso de Engenharia da Computação

Aplicação em Sistemas Distribuídos utilizando biblioteca e driver próprios, baseados em interrupções desenvolvido em Céu para o microcontrolador Arduino

Aluno:
Guilherme Simas

Orientador:
Ana Lúcia de Moura

2 de janeiro de 2018

Agradecimentos estarão descritos nesse bloco de texto. Caso o bloco de texto seja grande demais espera-se que ele pule linhas e continue se guiando pela margem direita

Sumário

1 Introdução

Existem várias definições do termo "Internet das Coisas", porém a grande maioria delas compartilha a ideia de que a conexão e troca de dados entre elementos é parte vital do conceito. Por esse motivo, a área de Sistemas Distribuídos possui um papel importantíssimo nesse desenvolvimento, já que toda aplicação deve ser capaz de trocar mensagens e informação segura e corretamente de forma a se sincronizar, e de forma escalável. [1] Outro ponto sobre a escalabilidade de aplicações em Internet das Coisas é a necessidade de unidades computacionais de custo baixo e consumo eficiente de energia. Por esse motivo microcontroladores são outra parte vital do desenvolvimento de soluções, apresentando, entre outras vantagens, uma facilidade na programação devido a bibliotecas e drivers já implementados e disponibilizados. Microcontroladores são capazes de processamento de dados por possuírem processadores e de serem facilmente integrados com sensores e atuadores, possuindo hardware especializado para interfacear com esses componentes.

Muitas ferramentas de desenvolvimento fornecidos para microcontroladores incluem rotinas que causam um bloqueio na aplicação, ou seja, enquanto está realizando a chamada correspondente àquela funcionalidade, o software entra em um estado onde realiza tarefas virtualmente inúteis até que o hardware conclua sua parte. Esse comportamento é indesejável visto que a aplicação desperdiça tempo aguardando o hardware enquanto poderia estar realizando outras tarefas como, por exemplo, um processamento de dados recebidos por uma mensagem, ou a troca de mensagens em si. Essa ineficiência marca um desperdício de tempo e consumo de energia.

O bloqueio de aplicações é um desafio enfrentado frequentemente em aplicações que envolvem sistemas nos quais o tempo de processamento ou reação a estímulos externos é pertinente ao funcionamento da aplicação. O paradigma de programação orientada a eventos é muitas vezes utilizado como abordagem nessas situações. Em uma aplicação orientada a eventos, o sistema segue seu fluxo normal até a chegada de um "evento", como a chegada de uma mensagem, ou a conclusão de um trabalho por parte do hardware. A chegada de tal evento emite uma interrupção no sistema, que irá executar uma rotina de tratamento desse evento, e após terminado, irá retomar seu fluxo normal de execução, a partir de onde estava no momento da interrupção. Esse paradigma busca evitar que quaisquer estímulos sejam ignorados involuntariamente pela aplicação ou que ciclos computacionais sejam desperdiçados. Essa estruturação introduz uma espécie de paralelismo e imprevisibilidade no fluxo de execução da aplicação, algo que linguagens comumente utilizadas para programação de sistemas embarcados, como C, não fazem um bom papel de representar, por serem historicamente procedurais (espera-se que o fluxo de execução siga naturalmente a ordem de leitura do código, a linha de baixo imediatamente seguindo a execução da linha de cima).

Dentre um número enorme de microcontroladores, a plataforma Arduino possui uma comunidade de desenvolvedores e recebe muita atenção, além de ser open-source. Contribuições na forma de exemplos de aplicações e desenvolvimento de drivers e bibliotecas são frequentes e são o que tornam a comunidade tão bem-sucedida. Por último, a plataforma é de fácil acesso e muitas vezes utilizada como parâmetro, devido à sua popularidade. [2]

Céu é uma linguagem de programação estruturada síncrona reativa, onde a orientação a eventos é inerente à programação, assim como o paralelismo entre seções de código que surgem com esse paradigma, como mencionado anteriormente. A linguagem, portanto, faz um ótimo papel de implementar a orientação a eventos. Outro benefício de Céu é o fato de que a ordem de execução de trechos de programa que estão descritos para rodar em paralelo é previsível dado a chegada de um determinado evento. [3] Devido às vantagens dessas características para a programação de componentes de sistemas embarcados, foi desenvolvido um kit de desenvolvimento em Céu para uma família de microcontroladores, Arduino, chamada Céu-Arduino.

Céu-Arduino permite a programação de microcontroladores Arduino utilizando a linguagem Céu, o que facilita a programação orientada a eventos. Céu-Arduino, porém, não reimplementa os drivers e bibliotecas desenvolvidos para Arduino em outras linguagens, e, portanto, não pode impedir o bloqueio da aplicação que é consequência da chamada de funções bloqueantes pré-desenvolvidas. A re-implementação desses módulos eliminaria mais uma possibilidade de bloqueio de uma aplicação que as utilize. [4]

Esse trabalho propõe reimplementar drivers e bibliotecas de Arduino, que atualmente causam bloqueio da aplicação, de forma a que esse bloqueio não ocorra mais. A abordagem utilizada nesse desen-

volvimento foi do uso de interrupções suportadas por hardware especializado com orientação a eventos e, por esse motivo, a linguagem escolhida para esse desenvolvimento foi Céu-Arduino. Os resultados desse desenvolvimento foram publicados na página open-source de desenvolvimento do kit, para que futuros desenvolvedores possam fazer uso de tais módulos em suas próprias aplicações e objetivos.

Por fim, foi desenvolvida uma aplicação em Sistemas Distribuídos para exemplificar a pertinência dos módulos desenvolvidos. A aplicação consistiu em uma rede de sensores e atuadores na plataforma Arduino, utilizando troca de mensagens. Alguns exemplos que satisfazem os requisitos e objetivos são: Um sistema de iluminação inteligente; um sistema de irrigação monitorada; um controlador de tráfego. A aplicação escolhida foi um sistema de iluminação inteligente. Esse trabalho tem como meta servir como uma contribuição para a comunidade desenvolvedora de sistemas embarcados e de aplicações de IoT, assim como desenvolvedores da plataforma Arduino. [5] [6] [7] [8] [9]

2 Fundamentos

O desenvolvimento realizado neste projeto tem como base a resolução de desafios enfrentados na comunidade, utilizando ferramentas e ambientes de desenvolvimentos específicos. Para que o trabalho realizado seja compreendido, é necessário primeiro compreender conceitualmente os desafios assim como os princípios das ferramentas utilizadas. Essa sessão busca se aprofundar nestes pontos o suficiente para a compreensão e acompanhamento do projeto.

2.1 Bloqueio de Aplicações

Bloqueios em chamadas de drivers de microcontroladores são comumente causados por implementações que usam polling para checar se a operação foi concluída. Polling é caracterizado quando o software constantemente checa um estado, aguardando uma mudança, para só então prosseguir. Funcionalidades de hardware especializado em microcontroladores costumam sinalizar sua conclusão mudando o estado de um registrador, caracterizando uma flag. Implementações não-bloqueantes de chamadas de drivers podem envolver fazer com que a mudança de estado da flag cause uma interrupção, de modo que o software não precisa ficar no estado de polling e possa usar o tempo para realizar outras operações na aplicação, só retornando à chamada do driver quando este concluiu sua tarefa. Caso não haja nenhuma tarefa a ser realizada, o microcontrolador pode entrar em um modo de baixo consumo de energia, portanto sempre há ganhos por utilizar a abordagem não- bloqueante.

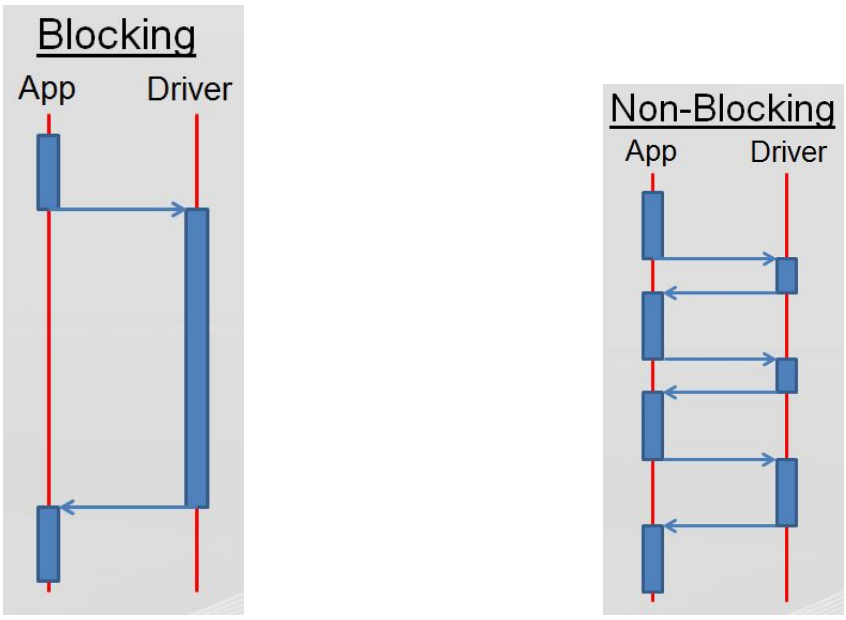
A grande maioria dos microcontroladores oferece suporte a interrupções externas. A implementação desse suporte se dá em um pino do microcontrolador que dispara uma interrupção na presença de uma mudança de estado específica no pino. Para que um driver de um dispositivo forneça suporte a interrupções, portanto, basta que o dispositivo possua uma saída que emita uma mudança de estado na ocorrência de eventos relevantes. Ao conectar esta saída ao pino de interrupção externa do microcontrolador, é possível mapear um evento do dispositivo a uma interrupção do microcontrolador, permitindo a orientação a evento que torna possível evitar o bloqueio desnecessário da aplicação.

Esse modelo é uma convenção de ambas as partes e se repete nos microcontroladores mais populares do mercado, incluindo Arduino, assim como nos dispositivos externos fabricados para sistemas embarcados. Isso facilita o desenvolvimento de drivers e bibliotecas para ambas as partes.

Kits de desenvolvimento para microcontroladores que ajudam a abstrair a implementação do hardware do programador são sempre benéficos por tornarem o processo de desenvolvimento de aplicações para aquele módulo mais simples e acessível. Os drivers e bibliotecas disponibilizados pela própria Arduino apresentam atualmente funções e módulos que causam o bloqueio da aplicação por utilizarem a técnica de polling, embora existam reimplementações por parte da comunidade de alguns desses módulos de forma a eliminar o bloqueio.

2.2 Arduino

Arduino é uma plataforma eletrônica open-source que foca em hardware e software de fácil aprendizado e acesso. Comumente utilizado para prototipação, Arduino conta atualmente com a contribuição de



(a) Comportamento bloqueante (b) Comportamento não-bloqueante

Figura 1: Comparação entre comportamento bloqueante e não-bloqueante

uma vasta comunidade que realiza os mais diversos projetos de sistemas-embarcados, de complexidade variada. [2]

A plataforma consiste em uma placa de prototipação com um microcontrolador embarcado. A placa possui pinos de entrada e saída com grande foco em GPIO (General Purpose Input and Output). A programação se dá via linguagem C adaptada com bilbiotecas e drivers, com a implementação obrigatória de duas funções que definem a aplicação (ver Exemplo 1). O conjunto de ferramentas permite a abstração de elementos específicos à programação de microcontroladores como acessos a registradores, por exemplo, permitindo um desenvolvimento mais alto-nível, acessível e portável. Arduino oferece dezenas de placas diferentes, de especificações variadas de forma a atender diversas demandas. A placa mais popular, porém, é a Arduino Uno, que possuiu embarcado o microcontrolador ATmega328P, da Atmel [9]. Todo o desenvolvimento realizado neste projeto foi focado únicamente na portabilidade para o ambiente deste microcontrolador, embora a adaptação para outros produtos da Arduino seja facilitada pela proposta de portabilidade da empresa.

```
1 void setup(void){
2   // Esse bloco é executado uma vez somente, na inicialização da aplicação
3 }
4 void loop(void){
5   // Este bloco é repetido em loop durante toda o período de execução da aplicação
6 }
```

Exemplo 1: Estrutura de uma aplicação Arduino

Como já mencionado, microcontroladores Arduino são programados em um ambiente de linguagem C, uma linguagem procedural. A linguagem segue a lógica de procedência temporal e lógica dos comandos por ordem de leitura, o que significa que espera-se que um comando só seja executado quando o precedente acima dele termina sua execução. A utilização da linguagem C para programação em sistemas embarcados, embora bem difundida, sofre com a dificuldade de linguagens procedurais de implementarem a orientação a eventos de forma concisa e clara. Aplicações simples se convertem em pedaços de código de difícil interpretação, como pode ser visto na comparação entre o Exemplo 2 e 3. Nessa comparação possuímos duas implementações que causam o mesmo resultado aparente. O objetivo é que o LED conectado à placa pisque em intervalos de um segundo. O Exemplo 2 consiste na aplicação feita sem orientação a eventos, o programa acende o LED, aguarda um segundo de forma blocante, desliga o LED

e aguarda mais um segundo, repetindo o processo. Já no Exemplo 3, a aplicação checa, a toda iteração, o tempo passado. Quando este tempo passa de um segundo, o estado do LED é trocado. Interpretando o código com eventos, a aplicação está aguardando o evento "passou-se um segundo"para então executar o bloco de código "inverta o estado do LED". Embora a lógica seja simples, a implementação nao fica tão clara. Quando aumentamos a complexidade e possuímos mais eventos na aplicação, a legibilidade do código piora mais ainda.

```
/*
  Blink

  Turns an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

  Most Arduinos have an on-board LED you can control. On the UNO, MEGA and ZERO
  it is attached to digital pin 13, on MKR1000 on pin 6. LED_BUILTIN is set to
  the correct LED pin independent of which board is used.
  If you want to know what pin the on-board LED is connected to on your Arduino
  model, check the Technical Specs of your board at:
  https://www.arduino.cc/en/Main/Products

  modified 8 May 2014
  by Scott Fitzgerald
  modified 2 Sep 2016
  by Arturo Guadalupi
  modified 8 Sep 2016
  by Colby Newman

  This example code is in the public domain.

  http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
*/

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);   // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);                       // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);    // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);                       // wait for a second
}
```

Exemplo 2: Aplicação não orientada a evento

```
/*
  Blink without Delay

  Turns on and off a light emitting diode (LED) connected to a digital pin,
  without using the delay() function. This means that other code can run at the
  same time without being interrupted by the LED code.

  The circuit:
  - Use the onboard LED.
  - Note: Most Arduinos have an on-board LED you can control. On the UNO, MEGA
    and ZERO it is attached to digital pin 13, on MKR1000 on pin 6. LED_BUILTIN
    is set to the correct LED pin independent of which board is used.
    If you want to know what pin the on-board LED is connected to on your
    Arduino model, check the Technical Specs of your board at:
    https://www.arduino.cc/en/Main/Products

  created 2005
  by David A. Mellis
  modified 8 Feb 2010
  by Paul Stoffregen
```

```
21   modified 11 Nov 2013
22   by Scott Fitzgerald
23   modified 9 Jan 2017
24   by Arturo Guadalupi
25
26   This example code is in the public domain.
27
28   http://www.arduino.cc/en/Tutorial/BlinkWithoutDelay
29 */
30
31 // constants won't change. Used here to set a pin number:
32 const int ledPin =  LED_BUILTIN;// the number of the LED pin
33
34 // Variables will change:
35 int ledState = LOW;             // ledState used to set the LED
36
37 // Generally, you should use "unsigned long" for variables that hold time
38 // The value will quickly become too large for an int to store
39 unsigned long previousMillis = 0;        // will store last time LED was updated
40
41 // constants won't change:
42 const long interval = 1000;           // interval at which to blink (milliseconds)
43
44 void setup() {
45   // set the digital pin as output:
46   pinMode(ledPin, OUTPUT);
47 }
48
49 void loop() {
50   // here is where you'd put code that needs to be running all the time.
51
52   // check to see if it's time to blink the LED; that is, if the difference
53   // between the current time and last time you blinked the LED is bigger than
54   // the interval at which you want to blink the LED.
55   unsigned long currentMillis = millis();
56
57   if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
58     // save the last time you blinked the LED
59     previousMillis = currentMillis;
60
61     // if the LED is off turn it on and vice-versa:
62     if (ledState == LOW) {
63       ledState = HIGH;
64     } else {
65       ledState = LOW;
66     }
67
68     // set the LED with the ledState of the variable:
69     digitalWrite(ledPin, ledState);
70   }
71 }
```

Exemplo 3: Aplicação orientada a evento

De um ponto de vista mais funcional, o código também desperdiça ciclos computacionais pelo volume de checagens. O evento é checado frequentemente para que o sistema permaneça responsivo, sacrificando ciclos pelas checagens que falham, em um exemplo de polling. Outro problema causado por este modelo é que, no caso de um sistema mais complexo, manter a responsividade se torna inviável, já que o bloco iterado pela aplicação cresce e os intervalos entre checagens de cada evento crescem. O uso de interrupções faz um bom papel de amenizar a questão da responsividade. No Exemplo 4 possuímos um código que atinge o mesmo resultado dos Exemplos 2 e 3, porém fazendo o uso de interrupções. A aplicação faz uso de um timer interno ao microcontrolador para gerar uma interrupção a cada um segundo. Cada vez que a interrupção ocorre, a aplicação executa um bloco de código associado à interrupção, uma função de callback. Essa função configura o valor de uma variável que marca o acontecimento do evento. No bloco principal da aplicação, o valor desta variável é checado para se detectar o acontecimento do evento e realizar a ação correspondente, que neste caso é inverter o valor

do LED.

Neste exemplo o sistema fica mais responsivo pois o bloco principal só consulta o valor da variável. O problema de desperdíçio de ciclos permanece, porém, já que a consulta à variável permanece, caracterizando polling novamente. O código também não é claro já que o entendimento depende da compreensão da interrupção e de como as duas sessões do código (callback da interrupção e consulta no bloco principal) interagem.

```
1 #define ledPin 13
2 volatile bool timerEvent = FALSE;
3 void setup()
4 {
5  pinMode(ledPin, OUTPUT);
6
7  // initialize timer1
8  noInterrupts();     // disable all interrupts
9  TCCR1A = 0;
10 TCCR1B = 0;
11
12 TCNT1 = 3036;     // preload timer 65536-16MHz/256/1Hz
13 TCCR1B |= (1 << CS12);     // 256 prescaler
14 TIMSK1 |= (1 << TOIE1);    // enable timer overflow interrupt
15 interrupts();     // enable all interrupts
16
17 Serial.begin(9600);
18 }
19
20 ISR(TIMER1_OVF_vect)
21 {
22  timerEvent = TRUE;
23 }
24
25 void loop()
26 {
27  if(timerWentOff){
28   timerWentOff = FALSE;
29   digitalWrite(ledPin, digitalRead(ledPin)^1);
30  }
31 }
```

Exemplo 4: Aplicação utilizando interrupção

2.3 Céu

2.4 Céu-Arduino

O kit de desenvolvimento Céu-Arduino apresenta uma abordagem única para o desenvolvimento orientado a eventos e suporte a interrupções, e se encontra atualmente em um estado inicial. O projeto está em uma versão 0.20 e conta com exemplos básicos de aplicações em Arduino queutilizam a linguagem Céu. Apesar de não possuir somente poucas bibliotecas e drivers desenvolvidos em Céu, a linguagem é de fácil integração com C, sendo possível utilizar os módulos desenvolvidos atualmente para Arduino. [4]

3 Drivers

3.1 Metodologia

3.1.1 Estudo do Ambiente

Estudo do Ambiente de Desenvolvimento C

Estudo do Hardware

3.1.2 Implementação Intermediária

Implementação Original

Implementação Mínima Viável

3.1.3 Implementação Final

Estudo do Ambiente de Desenvolvimento Céu

Implementação em Céu

3.2 Analog I/O

Como primeira etapa do projeto foram definidos os módulos para os quais implementações não-bloqueantes em Céu serão desenvolvidas. Os módulos são Entrada e Saída Analógica (Analog I/O), Comunicação SPI (SPI), Comunicação Serial (Serial), Suporte a RTC Externo (External RTC) e Operações na EEPROM (EEPROM). Os módulos foram descritos na ordem estimada de dificuldade crescente.

O realizado dentro desta primeira etapa do projeto girou em torno do desenvolvimento de um dos módulos. Para que o driver fosse implementado, foi necessário um estudo não só da plataforma Arduino e do microcontrolador, mas também do ambiente de desenvolvimento disponibilizado pela AVR e das bibliotecas já implementadas e disponibilizadas em Céu, principalmente as de Céu- Arduino.

Todo o código desenvolvido neste projeto segue a intenção de priorizar simplicidade e rapidez na execução, respeitando os requisitos de um módulo suficientemente robusto e funcional. De tal modo, os drivers desenvolvidos atenderão somente a plataforma Arduino Uno, por ser a mais utilizada e disponível, além de possuírem limitações que podem vir a exigir atenção e responsabilidade do usuário final no uso dos drivers em aplicações. O motivo é a busca por uma melhor utilização do tempo do projeto e redução da carga computacional para a execução dos drivers.

Ao final desta etapa, o projeto se encontra com um driver já desenvolvido e em uma versão estável. Tal módulo servirá como base para que o processo de desenvolvimento possa ser reproduzido para os demais drivers. A explicação de cada etapa nesta sessão do relatório virá acompanhada do exemplo prático da implementação referente ao módulo. Deste modo, o processo será descrito assim como o desenvolvimento do driver.

O módulo desenvolvido nesta primeira etapa do projeto é o de leitura e emissão de valores de voltagem analógicos. A referência para este módulo no texto daqui em diante será "Analog I/O", significando "Entrada e Saída Analógica".

Estudo do Ambiente O ambiente de desenvolvimento que usa a linguagem C é o mesmo tanto para Arduino quanto para Céu-Arduino. Isto é, ambos os códigos são em alguma etapa compilados utilizando o mesmo compilador. Esse compilador é disponibilizado pela AVR e é uma versão customizada de GCC, chamada de AVR-GCC. Em conjunto com o compilador, são utilizadas bibliotecas da AVR que tratam da abstração do hardware, como acesso a registradores, para variados chips da Atmel, incluindo o AtMega328p, presente no Arduino Uno, plataforma para qual os módulos deste projeto são destinados.

Outra ferramenta essencial para o andamento do projeto é a capacidade de se registrar rotinas de serviço a interrupções (Interrupt Service Routines, ISR), que são rotinas de código associadas a interrupções do microcontrolador. Em outras palavras, quando o hardware emite uma interrupção, osoftware executaria a ISR atrelada àquela interrupção. AVR disponibiliza uma biblioteca de tratamento de interrupções que torna simples a implementação de tais ISRs.

Para Analog I/O, isso significa que teremos fácil acesso a quaisquer registradores atrelados ao módulo, e o acesso ao hardware ficará transparente para o desenvolvedor, que irá tratar os registradores como vetores de bits. Como será mencionado posteriormente, isso procede tanto para o ambiente de desenvolvimento C quanto o ambiente Céu.

AVR disponibiliza um documento detalhado [5] das especificações do microcontrolador presente no Arduino Uno, o AtMega328p. Esse documento, chamado datasheet, possui a definição de todas as funcionalidades e hardwares dedicados presentes, incluindo a definição e descrição dos registradores responsáveis e atrelados a cada um. Esse documento é vital para o entendimento das capacidades e limitações do chip e, principalmente, o de como operá-lo.

A datasheet está no centro da primeira etapa do desenvolvimento, que é estudar o funcionamento do hardware para que, em conjunto com o estudo do código da implementação atual (se existente), seja possível compreender o comportamento de uma API tradicional. O foco desse passo é criar uma base de conhecimento sobre as informações já disponíveis acerca do módulo.

Durante essa etapa no desenvolvimento do Analog I/O, foi levantado que as funcionalidades de entrada (leitura de valor analógico) e saída (emissão de valor analógico) são atreladas a hardwares dedicados distintos no microcontrolador. Enquanto os valores de saída analógicos são simulados utilizando ondas PWM (o pino liga e desliga em intervalos regulares, onde o valor analógico seria a razão entre o tempo que permanece ligado e o tempo que permanece desligado). Essa funcionalidade já se encontra implementada em Céu e, portanto, não é pertinente para os efeitos deste relatório.

Os valores de leitura, em outra mão, são obtidos por um hardware de Conversão Analógica para Digital (ADC). Esse componente dedicado recebe um valor de voltagem analógico e, após ciclos de processamento, guarda em seus registradores a representação de 10 bits deste valor, quando comparado a uma referência de valor máximo. Em outras palavras, se a voltagem de entrada for o ground, o resultado será "0". Caso seja igual ou acima da voltagem de referência, será 1023.

Embora existam mais de um pino de leitura analógico no microcontrolador, existe somente um hardware de ADC. Para que possa atender a todos os seis pinos, o hardware conta com um multiplexador que seleciona o pino para qual a leitura deve ser feita. Repare que não é possível ter mais de um pino tendo seu valor lido pelo hardware ao mesmo tempo. O valor desse multiplexador se encontra em um dos registradores ao qual o desenvolvedor possui acesso e, portanto, seu valor pode ser modificado facilmente. Além do multiplexador, o usuário possui acesso a vários valores que servem como configuração do ADC. Dentre esses valores, o de Analog to Digital Interrupt Enable (ADIE) é de elevado interesse ao projeto, já que quando este bit, presente no registrador de configuração ADCSRA, se encontra "setado" (valor lógico 1), o hardware dispara uma interrupção toda vez que uma conversão termina.

Em resumo, para efetuar uma conversão, o multiplexador, cujo valor é controlado pelo registrador ADMUX, deve receber o valor do pino para qual a leitura será feita. Do mesmo modo, os outros bits de configuração devem ser setados de acordo com a configuração desejada pelo usuário. Para iniciar a conversão, basta que o software escreva o valor lógico 1 no bit ADSC. Esse bit terá seu valor 1 mantido pelo hardware enquanto a conversão está em progresso, e será zerado no momento que a conversão tiver fim e o resultado estiver disponível. Os nomes técnicos dos bits e registradores serão referenciados no texto quando descrevendo a implementação.

Implementação Intermediária A implementação atual de uma função de leitura analógica, presente na biblioteca de funções disponibilizada pela Arduino, possui como único argumento o pino para qual a conversão deve ser feita, devolvendo o resultado da mesma.

A função configura os registradores do hardware, incluindo ADMUX, cujo valor terá como base o argumento de entrada da função. Em seguida, inicia a conversão escrevendo o lógico 1 em ADSC. Para aguardar o fim da conversão, o código faz polling em ADSC. Como já discutido, isso caracteriza o motivo da aplicação apresentar um comportamento bloqueante, e é o que o projeto visa eliminar. Após ADSC ter sido zerado pelo hardware, a função segue sua execução e retorna o valor do resultado.

Após a funcionalidade ter sido estudada do ponto de vista do hardware e do software (caso este seja disponível), a causa do comportamento bloqueante da aplicação deverá ter sido identificada e uma solução idealizada. Essa solução pode ter como base a capacidade do hardware de gerar interrupções ou quaisquer outros métodos para que não seja necessário à aplicação consultar o hardware, e sim cadastrar um call-back para que o modelo de Céu funcione.

Com base na solução, deverá ser implementada uma API na linguagem de escolha. No âmbito deste projeto, essa linguagem será C. Embora possa não se assemelhar com a implementação final, essa solução intermediária deve apresentar contribuições claras ao código final, mesmo que na forma de aprendizado.

A implementação em C do driver para gerenciar o ADC buscou eliminar o polling encontrado (descrito na última sessão) utilizando a capacidade do módulo de emitir uma interrupção quando a conversão for concluída e o registro de uma ISR atrelada a essa interrupção utilizando as utilidades disponibilizadas pela AVR.

A implementação nova reaproveita a implementação original, modificando a lógica do polling. Enquanto a original possuía apenas uma função que encapsulava todo o processo de leitura, desde a configuração do hardware dedicado até o retorno do valor, a API nova é dividida em três funções, que contam com o suporte de uma ISR atrelada à interrupção do ADC e uma variável global que guarda o estado de uma conversão.

A primeira função é equivalente à função de leitura da implementação original até o momento do início da conversão, isto é, ela termina quando ADSC recebe o valor lógico 1. Entretanto ela configura ADIE para que as interrupções ocorram, algo que não estava previsto na implementação da Arduino. Essa função altera o valor da variável de estado para que esta reflita que uma conversão está em andamento.

A segunda função é utilizada para consultar a variável de estado de modo a saber se uma conversão está acontecendo. Isso é necessário pois caso esteja, os valores contidos nos registradores que guardam o resultado da conversão podem não ser verdadeiros.

A terceira função é equivalente à parte final da função da implementação original, após o polling. Ela simplesmente retorna o resultado da conversão contido nos registradores.

A ISR atrelada à interrupção do ADC altera o valor da variável de estado para refletir que uma interrupção terminou.

Para efetuar uma leitura de um valor analógico utilizando esta API, o usuário deve chamar a primeira função para iniciar a conversão e, depois que a segunda função retorne um valor negativo (representando que uma conversão não está em progresso), chamar a terceira função para obter o resultado.

Implementação Final A linguagem Céu permite uma forte integração com C, sendo capaz de chamar funções e acessar variáveis declaradas e contidas no contexto C. Isso permite que parte da implementação mínima viável seja reutilizado no desenvolvimento da versão da API em Céu. O ambiente também permite a declaração de ISRs, o que torna possível reproduzir a API em C dentro do ambiente Céu desde o primeiro momento.

A vantagem de Céu é a modelagem orientada a eventos, o que permite que a API execute baseada em call-backs, contribuindo para a eliminação do desperdício dos ciclos (que eram utilizados para checar se a API e encontrava em um estado que permitia a próxima ação). Este passo no desenvolvimento deve ser utilizado para modelar a solução concebida nos passos anteriores de forma que utilize as vantagens de Céu a favor da economia de ciclos, implementando a estrutura de orientação a eventos prevista no modelo Céu.

Nesta etapa do desenvolvimento do módulo ADC, a obtenção do resultado da conversão foi modelada como um evento emitido pelo driver. Deste modo, a API consiste na requisição de uma conversão por parte da aplicação e da emissão, por parte da API, de um evento que carrega o resultado.

Após ter a API modelada em Céu, o desenvolvedor possuiu todas as ferramentas para produzir a solução final. Deve-se buscar tirar o máximo de proveito possível do trabalho realizado nas etapas anteriores.

A implementação em Céu do módulo ADC constituiu ter uma função que iniciava uma conversão, função esta que foi reaproveitada da API em C. Como a própria API será responsável por emitir o resultado quando a conversão terminar, não há necessidade de manter uma variável de estado. Basta que, na ISR, o resultado seja obtido utilizando a função implementada no passo anterior e que este valor seja enviado à aplicação na forma de um evento. Todo o controle de estados do driver é encapsulado pelo próprio modelo de Céu e o fluxo de execução.

Para efetuar uma conversão, a aplicação, agora em Céu, deve requisitar uma conversão e "aguardar" o evento resultado. Como previsto no ambiente Céu, enquanto a aplicação está "aguardando" o evento, o microcontrolador fica livre para executar outras linhas de código pendentes ou, caso nenhuma exista, entrar em um estado de baixo consumo de energia. Quando o hardware concluir a conversão, o evento emitido irá "acordar" a aplicação, que seguirá seu fluxo. No caso da implementação original, a aplicação não poderia fazer uso desse tempo de "aguarde" pois estaria bloqueada consultando o driver para saber

se a conversão já havia terminado. O contraste entre as duas aplicações e, por consequência, o contraste entre as duas APIs ficam claros.

3.3 SPI

Estudo do Ambiente

Implementação Intermediária

Implementação Final

3.4 RF24

Estudo do Ambiente

Implementação Intermediária

Implementação Final

4 Aplicação

4.1 Proposta

4.2 Desenvolvimento

4.3 Resultado

5 Comentários Finais

Referências

[1] S. Dhananjay e T. Gaurav, "A survey of internet-of-things: Future vision, architecture, challenges and services", *2014 IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2014*, mar. de 2014.

[2] Arduino. (2017). Arduino blog, endereço: `https://blog.arduino.cc`.

[3] F. Sant'Anna, N. de La Rocque Rodriguez e R. Ierusalimschy, "Céu: Embedded, safe, and reactive", *Monografias em Ciência da Computação*, vol. 9, 2012, ISSN: 0103-9741.

[4] F. Sant'Anna. (2017). Github céu-arduino. Acessado em 24 de Abril de 2017, endereço: `https://github.com/fsantanna/ceu-arduino`.

[5] F. Wortmann e K. Flütcher, "Internet of things - technology and value added", *Business & Information Systems Engineering*, vol. 57, pp. 221–224, 3 2015.

[6] M. Chui, M. Löffer e R. Roberts, eds., *The Internet of Things*, McKinsey Quarterly, mar. de 2010. endereço: `https://www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/the-internet-of-things`.

[7] S. Edwards, L. Lavagno, E. A. Lee e A. Sangiovanni-Vincentelli, "Design of embedded systems: Formal models, validation, and synthesis", *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, nº 3, pp. 366–390, mar. de 1997, ISSN: 0018-9219. DOI: `10.1109/5.558710`.

[8] F. Sant'Anna. (2017). Github céu. Acessado em 24 de Abril de 2017, endereço: `https://github.com/fsantanna/ceu`.

[9] AtMel, *Atmel atmega328/p datasheet*, ATMel, 2016.