

Título

Eficiência Energética e “Standby” como Princípio de uma Linguagem de Programação voltada para a Internet das Coisas

Resumo

O consumo anual de energia de dispositivos conectados no mundo é equivalente ao consumo total de energia da Alemanha. No entanto, a maior parte dessa energia é gasta em modo “standby” (modo de espera), ou seja, quando os dispositivos não estão desempenhando sua finalidade. A Agência Internacional de Energia (IEA) prevê que o uso efetivo de standby terá papel fundamental na eficiência energética dos 25 bilhões de dispositivos da Internet das Coisas (IoT) esperados até 2025 [1].

Este projeto de pesquisa visa endereçar os desafios de energia para o software de dispositivos conectados, conforme determinados pela IEA: garantir que os dispositivos adotem os níveis de standby mais profundos, e que permaneçam em standby o maior tempo possível.

Propomos investigar a eficiência energética como princípio de uma linguagem de programação, de modo que todos os programas se beneficiem de longos e profundos períodos de standby automaticamente, sem esforços extras de programação. O foco principal da linguagem é em aplicações reativas que interagem com o ambiente em um ciclo contínuo de espera, leitura de sensores e atuação, tais como sistemas embarcados e IoT. A linguagem é baseada no modelo de concorrência síncrono, que troca poder por confiabilidade e possui um modelo de tempo mais simples mas que cobre os requisitos de aplicações reativas. Nesse modelo, todas as reações ao mundo externo são computadas em tempo finito, garantindo que as aplicações sempre cheguem a um estado ocioso suscetível ao modo standby.

Abstract

The annual power consumption of network-connected devices worldwide is estimated to be greater than Germany’s total electricity consumption. However, most of the energy to power these devices is wasted in *standby mode*, when they are not performing their main functionality. The International Energy Agency (IEA) estimates that effective use of standby will play a key role at the energy efficiency of the 25 billion IoT devices expected by 2025.

This research project aims to address the energy-efficiency challenges for the software of connected devices, as determined by IEA: to ensure that devices

power down to lowest possible consumption modes, and that they remain there for longest possible periods of time.

We propose to investigate the energy efficiency as the principle of a programming language, so that all programs take advantage of deep and long periods of standby automatically, without extra programming efforts. The language focuses on reactive applications that interact continuously with the environment in a wait-sense-actuate loop, such as embedded systems and IoT. The language is grounded on the synchronous concurrency model, which trades power for reliability and has a simpler model of time that suits the requirements of connected applications. In this model, all reactions to the external world are guaranteed to be computed in bounded time, ensuring that applications always reach an idle state amenable to standby mode.

Introdução

Apesar dos avanços de pesquisa em linguagens de programação, sistemas embarcados ainda são praticamente escritos somente em C [3]. A predominância de C está associada a sua portabilidade entre arquiteturas, sua eficiência em termos de uso de memória e CPU, e também o seu legado de código e programadores. Sendo assim o desenvolvimento completo da pilha de IoT depende de C, das aplicações de mais alto nível, passando por protocolos de redes, até sistemas operacionais, drivers e SoC firmwares [3]. No entanto, C oferece uma simples abstração de hardware (um assembly portátil) e nenhuma ciência sobre o ambiente externo sob o qual as aplicações executam. Como exemplo, não há um vocabulário dedicado em C para expressar conceitos que naturalmente aparecem em aplicações IoT, tais como o tempo, comunicação com o mundo real, concorrência de eventos e ciência de energia [3]. Além disso, C também é conhecida como uma linguagem insegura do ponto de vista de acesso à memória, ocasionando bugs típicos, tais como vazamento de memória, estouro de buffer e ponteiros pendentes.

Existem diversas propostas de pesquisa em linguagens e sistemas operacionais conscientes de energia [2]. Algumas propostas ajustam a qualidade de serviço (QoS) para reduzir o consumo de energia (ex., reduzindo a acurácia de computações). Outras propostas oferecem mecanismos para trocar o comportamento das aplicações para atender às demandas dos níveis de bateria (ex., desabilitando funcionalidades). Nenhuma dessas iniciativas se concentram em tirar proveito do modo de standby quando inativas, mas sim em adaptar ou eliminar computações no modo ativo. Também existem protocolos de rede especializados que deixam os dispositivos em standby por longos períodos. No entanto, iniciativas baseadas em protocolos se aplicam somente às partes de rede das aplicações e ainda devem ser programadas cuidadosamente para tirar proveito de standby.

O TinyOS é um sistema operacional que usa um dialeto de C e atende parcial-

mente a alguns de nossos objetivos [3]. Aplicações escritas nesse dialeto podem tirar proveito de standby automaticamente, mas ainda precisam controlar o ciclo de vida dos drivers manualmente (ex., para ligar ou desligar um dispositivo). Além disso, a base de código de um sistema operacional completo é complexa e ainda é escrita inteiramente em C. Nosso objetivo é prover suporte a economia de energia automática no nível da linguagem e de maneira completa. Por fim, o paradigma de programação por callbacks imposto pelo TinyOS é conhecido como difícil e mais suscetível a erros. Nosso objetivo é manter o paradigma de programação estruturado mesmo na presença de concorrência entre eventos [3].

Tenho trabalhado no projeto e implementação da linguagem de programação Céu pelos últimos 10 anos [5]. Céu é uma nova linguagem reativa que tem como foco principal sistemas embarcados restritos. A linguagem é baseada no modelo de concorrência síncrono, que troca poder por confiabilidade e possui um modelo de tempo mais simples que cobre a maioria dos requisitos de aplicações IoT. Nesse modelo, todas as reações ao mundo externo são computadas em tempo finito, garantindo que as aplicações sempre chegam a um estado ocioso que é suscetível ao modo standby.

Em trabalhos anteriores [5], nós adaptamos Céu para executar sobre o TinyOS no contexto de Redes de Sensores Sem Fio e desenvolvemos algumas aplicações, protocolos e device drivers. Nós avaliamos a expressividade de Céu em comparação com C e verificamos uma redução de código na ordem de 25%, com um pequeno aumento de memória em torno de 5%. Também avaliamos a responsividade da CPU sob forte tráfego de dados e verificamos uma performance similar entre as duas linguagens. Em outro trabalho [5], nós desenvolvemos uma máquina virtual minúscula de Céu para dispositivos de baixo consumo energético que permitia reprogramação remota. Também adotamos Céu em outras classes de sistemas reativos, tais como jogos e multimídia [5].

Em um trabalho mais recente [5], nós discutimos as decisões de design de Céu sob a perspectiva da semântica de linguagens de programação, comparando-a com o trabalho seminal da primeira linguagem síncrona Esterel. A diferença mais fundamental entre as duas linguagens é que Céu usa uma noção de tempo baseada na ocorrência de eventos externos que definem instantes indivisíveis em uma linha de tempo lógica dentro de uma aplicação. Essa característica torna o modelo de tempo de Céu exclusivamente reativo a eventos de entrada. Como consequência, o tempo não avança durante períodos inativos, fazendo com que todas as aplicações sejam suscetíveis ao modo standby.

Exemplo Ilustrativo

Justificativas para Escolha do Tema

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), existiam em torno de 14 bilhões de dispositivos conectados tradicionais em 2013 (ex., telefones TVs inteligentes). Esse número deve crescer para 25 bilhões até 2025 com a proliferação de dispositivos IoT (ex., lâmpadas inteligentes e tecnologia vestível). Dispositivos tradicionais e de IoT já superam o número de pessoas no planeta por um fator de dois, e o tráfego de dados entre eles deve crescer a uma taxa exponencial nos próximos anos. No entanto, a maior parte da energia desses aparelhos é consumida quando eles estão em “standby” (modo em espera), ou seja, quando os dispositivos não estão desempenhando sua finalidade principal. A emissão anual de CO₂ relacionada a standby é equivalente a de 1 milhão de carros. A projeção de crescimento de IoT, juntamente com o efeito surpreendente dos efeitos de consumo de standby, fizeram com que a eficiência de standby para dispositivos conectados fosse um dos seis pilares do “Plano de Ação para Eficiência Energética” do G20 [1].

Outras organizações também reportaram sobre a importância da economia de energia em dispositivos conectados [1]. Para o Internet Engineering Task Force (IETF), “o gerenciamento energético está se tornando um requisito adicional para redes devido a diversos fatores que incluem o aumento dos custos de energia, o impacto ecológico para a operação das redes, e a regulação de energia”. Para o American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), “o potencial para a nova eficiência energética permanece enorme, (...) devemos considerar uma abordagem sistêmica para escalar a eficiência energética. (...) a eficiência inteligente é adaptativa, antecipatória, e conectada”.

Considerando iniciativas concretas, o grupo de trabalho “Electronic Devices and Networks” da IEA foca especificamente na questão do standby em dispositivos conectados [1]. A iniciativa da ACEEE em “Intelligent Efficiency” promove uma abordagem sistemática para otimizar o comportamento cooperativo de dispositivos de modo a buscar ganhos de energia como um todo. Ambas as abordagens, por dispositivo e sistêmica, envolvem soluções de software, dado que a economia de energia é uma política dinâmica que depende das demandas das aplicações e níveis de baterias em um determinados momentos.

Também existem padrões de baixo consumo de energia para a infraestrutura de IoT com diferentes demandas de alcance, velocidade e distribuição física. Como exemplo, o Bluetooth Low-Energy (BLE) é um substituto para o padrão Bluetooth clássico e é projetado para baixas velocidades em redes pessoais (PANs). O 6LoWPAN adapta o padrão IPv6 para baixo consumo e em dispositivos de processamento limitado. Essas tecnologias permitem transmissões mais eficientes, suportam topologias flexíveis e reduzem o tráfego consideravelmente. Elas também possibilitam o uso de modos de standby mínimos. No entanto, essas

tecnologias exigem o uso de software para controlar os modos ativos e de standby de maneira a construir uma IoT eficiente em termos de energia.

Objetivos

O uso efetivo de standby terá papel fundamental na eficiência energética para os 25 bilhões de dispositivos IoT esperados até 2025. Para confrontar esse desafio, novas soluções devem ser escaláveis para a massa software IoT que está por vir e que deve usar standby de maneira efetiva. Este projeto de pesquisa visa endereçar os desafios energéticos de software, conforme determinados pela IEA [1]:

- Garantir que os dispositivos atinjam o nível mais profundo possível de standby.
- Garantir que os dispositivos permaneçam o maior tempo possível em standby.

Tendo em vista a escala projetada para a IoT e o papel do modo standby para a eficiência energética, este projeto de pesquisa tem os seguintes objetivos:

1. Endereçar a eficiência energética com o uso criterioso de standby.
2. Focar em arquiteturas embarcadas restritas que formam a IoT.
3. Prover mecanismos de standby no nível de linguagens de programação para escalar para todas as aplicações.
4. Suportar mecanismos de standby transparentes e não intrusivos para reduzir as barreiras de adoção.

Essa proposta se situa na camada mais baixa de desenvolvimento de software — na linguagem de programação — significando que todas as aplicações escritas nela tirarão vantagem do modo standby automaticamente, sem esforços extras de programação.

Esperamos que ao reescrever aplicações existentes que não sejam cientes de energia irão beneficiar-se de economias na ordem de 50% baseado nas estimativas da IEA (considerando as tecnologias atuais de standby) e também em trabalhos em ciência transparente de energia [2].

Metodologia

24 Meses Iniciais

Infraestrutura de Hardware para IoT

A infraestrutura de IoT é construído sobre sistemas embarcados, tais como sensores, transceptores, e outros dispositivos baseados em microcontroladores de

baixo consumo.

Usaremos Arduinos como a principal plataforma de hardware para IoT [4]. A maioria deles é baseado em microcontroladores de baixo consumo da Atmel, tais como o ATmega328p, suportando seis modos standby que podem reduzir o consumo para níveis baixíssimos. Dependendo das configurações (ex., frequência e voltagem), um Arduino pode drenar de 45mA em operação máxima até 5uA no nível mais profundo de standby. A literatura mostra que é possível fazer com que as aplicações operem apenas 50% do tempo em média. Considerando o consumo desprezível de standby, esse comportamento economizaria 50% da bateria.

Além do bom suporte ao baixo consumo em standby, os Arduinos são baratos, open-source e muito populares. Assim, poderemos tirar vantagem dessa plataforma em diversos ambientes:

- Pesquisa

No ambiente acadêmico, já existe bastante pesquisa com o uso de Arduinos no contexto de IoT (ex., infraestrutura, saúde e automação residencial) [4]. A popularidade do Arduino fará com que a nossa pesquisa seja mais acessível e reproduzível para outros grupos.

- Educação

O Arduino é utilizado em muitos cursos em universidades pelo mundo [4]. Nós também temos usado o Arduino em cursos de graduação e pós-graduação pelos últimos 5 anos, o que permitirá avaliar os resultados com programadores de sistemas embarcados menos experientes.

- Hobistas

Na comunidade hobista, há uma abundância de software publicamente disponível que poderemos adaptar para a nossa linguagem e avaliar os ganhos de eficiência energética.

Infraestrutura de Software para IoT

Em sistemas Arduino (e embarcados em geral), a maneira mais típica de interagir com o mundo externo é através da técnica de “polling”, que faz amostragens periódicas em periféricos externos para detectar mudanças de estado. A técnica de polling gasta ciclos de CPU e previne que o dispositivo entre em modo standby. No Arduino, mesmo funcionalidades básicas, tais como temporizadores, conversores A/D, e SPI, usam ciclos de polling que gastam energia em modo ativo.

De modo a prover standby automático, as aplicações deve ser inteiramente reativas a eventos e precisaremos reescrever toda a infraestrutura de software em Céu. Esse processo consiste primordialmente de reescrever “device drivers”, que

são os pedaços de software que interagem diretamente com o hardware. Mais concretamente, no nível mais básico, a eficiência energética depende das rotinas de interrupção (ISRs), que acordam o microcontrolador do modo standby quando ocorre algum evento em um periférico externo.

Em um projeto anterior, demos os primeiros passos na direção de uma infraestrutura de software em Céu. Já adicionamos suporte a rotinas de interrupção (ISRs) como um conceito primitivo na nossa linguagem, o que permite reconstruir a infraestrutura com ciência ao modo standby desde sua base. Também escrevemos os primeiros drivers em Céu para dispositivos que se comunicam com o microcontrolador pelo protocolo SPI. Essa abordagem não afeta a maneira como as aplicações são escritas em níveis mais abstratos, que permanecem similares às aplicações em Arduino. No entanto, em vez de gastar ciclos da CPU em espera ativa, as aplicações entram no modo de standby mais profundo possível enquanto estiverem ociosas.

O código a seguir é um esboço do que é necessário para obter o standby automático:

```
// application.ceu

output none ADC_REQUEST
input int  ADC_DONE

#include "adc.ceu" // driver implementation

every 1h do
    emit ADC_REQUEST
    var v = await ADC_DONE
    <executa-alguma-acao>
end

A aplicação solicita, a cada hora, a leitura de um conversor analógico digital e aguarda o seu retorno para executar alguma ação. É possível notar que o código é escrito de maneira natural, sem callbacks ou qualquer referência ao modo de standby. As aplicações usam nomes para abstrair os eventos de entrada e saída que são implementados em drivers. A maior parte do trabalho fica a cargo do driver, que é escrito apenas uma vez e pode ser reusado em todas as aplicações:

// adc.ceu

output none ADC_REQUEST do
    <configures-ADC>;
    <enables-ADC-interrupts>;
    <sets-the-deepest-standby-mode>;
end

input int ADC_DONE [ADC_vect_num] do
```

```

    <disables-ADC-interrupts>;
    var int v = <reads-adc-data>;
    return v;
end

```

O evento de saída configura o periférico para fazer a requisição, habilita as interrupções correspondentes e informa à linguagem qual é o seu modo de standby mais profundo, mas que ainda permite que o periférico acorde o microcontrolador. A linguagem é responsável por interagir com os drivers e identificar o maior denominador comum entre todos os dispositivos em uso. O evento de entrada é acionado pelo dispositivo correspondente através de uma interrupção, acordando a CPU automaticamente. O código desabilita futuras interrupções do periférico e retorna a leitura requisitada.

Com essa abordagem, o código da aplicação permanece similar aos seus equivalentes em Arduino. No entanto, em vez de gastar ciclos da CPU com polling, as aplicações irão entrar em standby sempre que estiverem ociosas. Essa abordagem já foi validada em um sistema real com drivers e aplicações simples. No entanto, ainda não há nenhuma publicação completa, dado que ainda é um projeto em estágio inicial.

Aplicações IoT

De modo a avaliar os ganhos de energia com a infraestrutura proposta, precisaremos avaliar o consumo em aplicações realistas. A comunidade do Arduino tem uma abundância de projetos open-source que podem ser reescritos na nossa linguagem para tirar proveito do modo de standby transparente. Então, poderemos comparar as versões originais e reescritas em termos de consumo para tirar conclusões sobre a efetividade do modo de standby transparente. Os cenários mais realistas de IoT usam comunicação por rádio extensivamente. Nesse contexto, iremos avaliar desde protocolos ad-hoc simples até protocolos mais complexos com ciência energética para ver até que extensão nossa proposta contribuiria efetivamente em economias de energia.

Os códigos a seguir ilustram o processo de reescrever os programas entre as duas linguagens. Os dois códigos fazem a mesma coisa: piscam um LED com uma frequência de 1 segundo:

```

// Em C/Arduino
pinMode(13, OUTPUT);
while (1) {
    digitalWrite(13, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(1000);
}

```



```
// Em Céu
output int PIN_13;
loop do
    emit PIN_13(high);
    await 1s;
    emit PIN_13(low);
    await 1s;
end
```

Note que as chamadas de funções em C, que não carregam nenhuma semântica de eventos, são substituídas por um vocabulário próprio que permite que a linguagem entenda os pontos de espera e possa colocar o microcontrolador em standby. Em testes preliminares como esse, conseguimos economias de ordem significativa.

No longo prazo, esperamos mostrar o valor para desenvolvedores reescreverem suas aplicações na nossa linguagem para tirar proveito dos modos de standby automáticos. Nessa direção, avaliaremos os seguintes critérios:

- Tempo de reescrita:

Esse critério avalia os incentivos para reescrever aplicações já existentes em Arduino para Céu. É um tradeoff entre o tempo da reescrita e os ganhos de eficiência energética esperados.

- Estética do código:

Para reduzir a barreira de adoção, é importante que o paradigma de programação seja suficientemente familiar e, no mínimo, tão fácil de programar quanto em Arduino.

- Consumo de Energia:

Como critério mais importante, aplicações reescritas devem ter economias significativas de energia para justificar a reescrita completa de aplicações.

12 Meses Finais e Trabalhos Futuros

- Arquiteturas e Aplicações de IoT Complexas

O nicho de sistemas embarcados restritos, que inclui o Arduino, cobre a parte substancial (e crescente) de aplicações IoT. Tipicamente, essas arquiteturas não requerem muitos recursos computacionais mas são sensíveis às dimensões físicas e consumo de energia. No entanto, a IoT também consiste de dispositivos conectados tradicionais, tais como roteadores, servidores e smartphones. Até 2016 existiam 3.9 bilhões de assinaturas de smartphone no mundo e esse número deve alcançar 6.8 bilhões até 2022 [1].

Smartphones usam arquiteturas muito mais complexas do que microcontroladores embarcados (ex., CPUs de 32-bits com unidade de gerenciamento de memória).

Tipicamente essas arquiteturas dependem de um sistema operacional, uma pilha de TCP/IP completa, e podem executar múltiplas aplicações simultaneamente. Além de aplicações reativas, típicas de IoT, smartphones também executam computações pesadas, tais como processamento de áudio/imagem/vídeo e funções criptográficas. Mesmo assim, smartphones são uma peça importante na IoT, servindo como uma interface comum aos humanos para processar, visualizar e atuar na rede.

Smartphones têm restrições similares de consumo de bateria e também podem tirar proveito das técnicas propostas para sistemas embarcados restritos. De modo a transpor a barreira de dispositivos restritos para smartphones para a IoT, percorreremos um caminho similar:

- **Infraestrutura de Hardware:** Usaremos o BeagleBone Black, que compartilha objetivos similares ao do Arduino, provendo uma plataforma barata e aberta que é adequada a aplicações mais ricas, tais como interfaces gráficas, multimídia, e jogos.
- **Infraestrutura de Software:** De modo a garantir standby automático para aplicações, toda infraestrutura de software, principalmente device drivers, terá que ser recriada usando ISRs em nossa linguagem.
- **Aplicações:** Além de aplicações IoT, as aplicações de smartphone, tais como mensagens instantâneas e navegação Web, também podem maximizar a eficiência energética através do modo de standby. Iremos reescrever desde aplicações simples, tais como um relógio gráfico, até aplicações em rede mais complexas, tais como um navegador, para avaliar o consumo de energia.

Resultados Esperados

24 Meses Iniciais

O vocabulário oferecido pela linguagem dedicado à interação com o ambiente aumenta o nível de abstração dos programas para um nível mais próximo do domínio de IoT, provendo mais segurança e expressividade para programadores. Até onde sabemos, suporte para ISRs no nível de linguagem ainda não foi tentado anteriormente.

Nossa proposta visa fazer com que todas as aplicações estejam sujeitas a modos de standby transparentemente. Sendo parte da infraestrutura de software, somente device drivers necessitarão de gerenciamento explícito de energia, e todas as aplicações construídas sobre eles se beneficiarão de eficiência energética automaticamente.

Nossa linguagem é um projeto de 10 anos e tem uma implementação open-source madura que está disponível publicamente para downloads. Com a proposta de

adaptação ao contexto de eficiência energética para IoT, a linguagem pode se tornar uma alternativa prática ao Arduino no curto prazo.

12 Meses Finais e Trabalhos Futuros

A transição de telefones simples para smartphones resultou na degradação do tempo de vida das baterias. No entanto, a maior parte do tempo, os smartphones estão ociosos nos nossos bolsos mas gastando energia. Esperamos aumentar consideravelmente a autonomia das baterias mantendo toda a funcionalidade de um smartphone moderno.

Orçamento Detalhado

O orçamento total para os 3 anos é de R\$78.200,00 divididos em recursos de capital (R\$32.900,00) e custeio (R\$45.300,00).

- Capital

Os equipamentos são necessários para montar um laboratório mínimo para até 3 pesquisadores durante os três anos do projeto: - um computador para cada pesquisador - um notebook compartilhado para saídas e apresentações - uma impressora compartilhada

Também são necessários diversos equipamentos de eletrônica que estão relacionadas à atividade fim de pesquisa: - um multímetro profissional Fluke - um osciloscópio digital - kits de Arduino para aulas e pesquisa - sensores e rádios diversos

A maior parte desses recursos deve ser adquirida no primeiro ano do projeto.

EQUIPAMENTO	PREÇO	QTD	TOTAL
-----	-----	---	-----
Computador	5500	3	16.500
Notebook	4600	1	4.600
Impressora Laser	2800	1	2.800
Osciloscópio Digital	3500	1	3.500
Multímetro Fluke	1000	1	1.000
Kits Arduino	250	10	2.500
Sensores e Rádios	-	-	2.000

			32.900

- <https://www.dell.com/pt-br/work/shop/all-in-ones/all-in-one-inspiron-24-touch/spd/inspiron-24-touch-2400>
- <https://www.dell.com/pt-br/work/shop/notebooks-dell/inspiron-14-5000/spd/inspiron-14-5480>
- <https://www.americanas.com.br/produto/62976456/impressora-laserjet-color-hp-t6b60a-696-pr>
- <https://www.americanas.com.br/produto/25735957/osciloscopio-digital-tbs1102b-2-canais-100m>

- [https://www.americanas.com.br/produto/11258443?cor=COR%20%C3%9ANICA&pfm_carac=multimetro%](https://www.americanas.com.br/produto/11258443?cor=COR%20%C3%9ANICA&pfm_carac=multimetro%20)
- <https://www.filipeflop.com/produto/kit-arduino-advanced/>
- <https://www.filipeflop.com/produto/beaglebone-black-rev-c/>

- Custeio

Os recursos de custeio se concentram em viagens para eventos e congressos de linguagens de programação, IoT e sistemas embarcados. Planejamos uma viagem nacional e outra internacional (de 3 diárias) por ano para a publicação de trabalhos científicos e interação com a comunidade científica. Podemos destacar as seguintes conferências como prioridades: - Simpósio Brasileiro de Linguagens de Programação (SBLP) - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC) - Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC) - ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys) - Languages, Compilers, Tools and Theory of Embedded Systems (LCTES) - ACM SIGPLAN Conference on Systems, Programming, Languages and Applications (SPLASH)

VIAGENS	PREÇO	QTD	TOTAL
-----	-----	---	-----
Passagem Nacional	1000	3	3.000
Passagem Internacional	5000	3	15.000
Diária Nacional	320	15	4.800
Diária Internacional	1500	15	22.500

			45.300

Bibliografia

- [1] Estudos e Surveys de Dispositivos Conectados e Eficiência Energética:
 - OECD/IEA. More data less energy—Making network standby more efficient in billions of connected devices. Technical report, International Energy Agency, 2014.
 - G20's Energy Efficiency Action Plan: <https://www.iea-4e.org/projects/g20>, 2019.
 - EDNA initiative: <https://edna.iea-4e.org/>, 2019.
 - E. Tychon, B. Schoening, M. Chandramouli, and B. Nordman. Energy management (EMAN) applicability statement. Technical report, IETF, 2011.
 - R. N. Elliott, M. Molina, and D. Trombley. A defining framework for intelligent efficiency. Technical Report E125, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2012.
 - R. Brown, C. Webber, and J. G. Koomey. Status and future directions of the ENERGY STAR program. *Energy*, 27(5):505–520, 2002.
 - G. Reiter. Wireless connectivity for the internet of things. Technical report, Texas Instruments, 2014.

- E. A. Rogers, R. N. Elliott, S. Kwatra, D. Trombley, and V. Nadadur. Intelligent efficiency: opportunities, barriers, and solutions. Technical Report E13J, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2013.
- N. Heuvel. Ericsson mobility report. Technical report, Ericsson, AB, 2017.
- [2] Sistemas com Ciência de Energia Relacionados:
 - P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer, et al. Tinyos: An operating system for sensor networks. *Ambient intelligence*, 35:115–148, 2005.
 - J. Flinn and M. Satyanarayanan. Managing battery lifetime with energy-aware adaptation. *ACM Trans. Comput. Syst.*, 22(2):137–179, May 2004.
 - W. Baek and T. M. Chilimbi. Green: A framework for supporting energy-conscious programming using controlled approximation. In *Proceedings of the 31st ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, PLDI ’10*, pages 198–209, New York, NY, USA, 2010. ACM.
 - A. Canino. Gradual mode types for energy-aware programming. In *Companion Proceedings of the 2015 ACM SIGPLAN International Conference on Systems, Programming, Languages and Applications: Software for Humanity, SPLASH Companion 2015*, pages 79–80, New York, NY, USA, 2015. ACM.
 - A. Canino and Y. D. Liu. Proactive and adaptive energy-aware programming with mixed typechecking. In *Proceedings of the 38th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, PLDI 2017*, pages 217–232, New York, NY, USA, 2017. ACM.
 - M. Cohen, H. S. Zhu, E. E. Senem, and Y. D. Liu. Energy types. In *Proceedings of the ACM International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages and Applications, OOPSLA ’12*, pages 831–850, New York, NY, USA, 2012. ACM.
 - H. Hoffmann. Jouleguard: Energy guarantees for approximate applications. In *Proceedings of the 25th Symposium on Operating Systems Principles, SOSP ’15*, pages 198–214, New York, NY, USA, 2015. ACM.
 - A. Kansal, S. Saponas, A. B. Brush, K. S. McKinley, T. Mytkowicz, and R. Ziola. The latency, accuracy, and battery (lab) abstraction: Programmer productivity and energy efficiency for continuous mobile context sensing. In *Proceedings of the 2013 ACM SIGPLAN International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications, OOPSLA ’13*, pages 661–676, New York, NY, USA, 2013. ACM.
 - J. Park, H. Esmailzadeh, X. Zhang, M. Naik, and W. Harris. Flexjava: Language support for safe and modular approximate programming.

- In Proceedings of the 2015 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering, ESEC/FSE 2015, pages 745–757, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- A. Sampson, W. Dietl, E. Fortuna, D. Gnanapragasam, L. Ceze, and D. Grossman. Enerj: Approximate data types for safe and general low-power computation. *SIGPLAN Not.*, 46(6):164–174, June 2011.
 - J. Sorber, A. Kostadinov, M. Garber, M. Brennan, M. D. Corner, and E. D. Berger. Eon: A language and runtime system for perpetual systems. In Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys ’07, pages 161–174, New York, NY, USA, 2007. ACM.
 - H. Zeng, C. S. Ellis, A. R. Lebeck, and A. Vahdat. Ecosystem: Managing energy as a first class operating system resource. *SIGARCH Comput. Archit. News*, 30(5):123–132, Oct. 2002.
 - Y. Zhu and V. J. Reddi. Greenweb: Language extensions for energy-efficient mobile web computing. In Proceedings of the 37th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, PLDI ’16, pages 145–160, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [3] C, Derivados e Técnicas de Programação em Sistemas Embarcados:
 - E. Baccelli, O. Hahm, M. Gunes, M. Wahlisch, and T. C. Schmidt. Riot os: Towards an os for the internet of things. In Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2013 IEEE Conference on, pages 79–80. IEEE, 2013.
 - M. Barr. Real men program in C. *Embedded Systems Design*, 22(7):3, 2009.
 - M. de Icaza. Callbacks as our generations’ go to statement. <http://tirania.org/blog/archive/2013/Aug-15.html> (accessed in Aug-2014), 2013.
 - Dunkels et al. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In Proceedings of LCN’04, pages 455–462, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
 - A. Dunkels, O. Schmidt, T. Voigt, and M. Ali. Protothreads: simplifying event-driven programming of memory- constrained embedded systems. In Proceedings of SenSys’06, pages 29–42. ACM, 2006.
 - D. Gay, P. Levis, R. von Behren, M. Welsh, E. Brewer, and D. Culler. The nesC language: A holistic approach to networked embedded systems. In Proceedings of PLDI’03, pages 1–11, 2003.
 - J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister. System architecture directions for networked sensors. *SIGPLAN Notices*, 35:93–104, November 2000.
 - P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer, et al. Tinyos: An operating system for sensor networks. *Ambient intelligence*, 35:115–148, 2005.
 - I. Maier, T. Rompf, and M. Odersky. Deprecating the observer

- pattern. Technical report, 2010.
- E. Meijer. Reactive extensions (rx): curing your asynchronous programming blues. In ACM SIGPLAN Commercial Users of Functional Programming, CUFPP ’10, pages 11:1–11:1, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [4] Arduino:
 - Atmel. ATmega328P Datasheet, 2011.
 - J. D. Brock, R. F. Bruce, and S. L. Reiser. Using arduino for introductory programming courses. *J. Comput. Sci. Coll.*, 25(2):129–130, Dec. 2009.
 - L. Buechley, M. Eisenberg, J. Catchen, and A. Crockett. The lilypad arduino: Using computational textiles to investigate engagement, aesthetics, and diversity in computer science education. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI ’08*, pages 423–432, New York, NY, USA, 2008. ACM.
 - C. Doukas and I. Maglogiannis. Bringing iot and cloud computing towards pervasive healthcare. In *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*, 2012 Sixth International Conference on, pages 922– 926. IEEE, 2012.
 - V. Georgitzikis, O. Akribopoulos, and I. Chatzigiannakis. Controlling physical objects via the internet using the arduino platform over 802.15. 4 networks. *IEEE Latin America Transactions*, 10(3):1686–1689, 2012.
 - K. Gomez, R. Riggio, T. Rasheed, D. Miorandi, and F. Granelli. Energino: A hardware and software solution for energy consumption monitoring. In *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, 2012 10th International Symposium on, pages 311–317. IEEE, 2012.
 - P. Jamieson. Arduino for teaching embedded systems. are computer scientists and engineering educators missing the boat? *Proc. FECS*, 289294, 2010.
 - D. Kushner. The making of arduino. *IEEE Spectrum*, 26, 2011.
 - K. Mandula, R. Parupalli, C. A. Murty, E. Magesh, and R. Lunagariya. Mobile based home automation using internet of things (iot). In *Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, 2015 International Conference on, pages 340–343. IEEE, 2015.
 - J. Sarik and I. Kymissis. Lab kits using the arduino prototyping platform. In *Frontiers in Education Conference (FIE)*, 2010 IEEE, pages T3C–1. IEEE, 2010.
- [5] Céu:
 - F. Sant’Anna. Céu: A reactive language for wireless sensor networks. <http://www.cse.ust.hk/~lingu/SenSys11DC/>, 2011.
 - F. Sant’Anna, N. Rodriguez, and R. Ierusalimsky. Céu: Embedded,

- Safe, and Reactive Programming. Technical Report 12/12, PUC-Rio, 2012.
- F. Sant’Anna. Safe System-level Concurrency on Resource-Constrained Nodes with Céu. PhD thesis, PUC-Rio, 2013.
 - F. Sant’Anna, N. Rodriguez, and R. Ierusalimsky. Advanced control reactivity for embedded systems. Workshop on Reactivity, Events and Modularity (REM’13), 2013.
 - F. Sant’Anna, N. Rodriguez, R. Ierusalimsky, O. Landsiedel, and P. Tsigas. Safe System-level Concurrency on Resource-Constrained Nodes. In Proceedings of SenSys’13. ACM, 2013.
 - F. Sant’Anna et al. Structured reactive programming with céu. Workshop on Reactive and Event-based Languages & Systems (REBLS’14), 2014.
 - F. Sant’Anna et al. Reactive traversal of recursive data types. Workshop on Reactive and Event-based Languages & Systems (REBLS’15), 2015.
 - F. Sant’Anna, N. Rodriguez, and R. Ierusalimsky. Structured Synchronous Reactive Programming with Céu. In Proceedings of Modularity’15, 2015.
 - R. Santos, G. Lima, F. Sant’Anna, and N. Rodriguez. Céu-Media: Local Inter-Media Synchronization Using Céu. In Proceedings of WebMedia’16, pages 143–150, New York, NY, USA, 2016. ACM.
 - F. Sant’anna, R. Ierusalimsky, N. Rodriguez, S. Rossetto, and A. Branco. The design and implementation of the synchronous language cÉu. ACM Trans. Embed. Comput. Syst., 16(4):98:1–98:26, July 2017.
 - LIMA, GUILHERME F. ; SANTOS, RODRIGO C.M. ; IERUSALIMSKY, ROBERTO ; HAEUSLER, EDWARD H. ; SANT’ANNA, FRANCISCO . A memory-bounded, deterministic and terminating semantics for the synchronous programming language Céu. JOURNAL OF SYSTEMS ARCHITECTURE, v. ?, p. ?, 2019.