

# CONTROLE ORIENTADO A EVENTOS DE TEMPERATURA EM MAQUETE PREDIAL PARA O AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE BATERIAS DE NÓS SENSORES ZIGBEE

GABRIEL L. SOUZA, DANILO F. SANTOS, ADOLFO BAUCHSPIESS

*Laboratório Automação e Robótica, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília  
Caixa Postal 4386, 70910-900, Brasília, DF, BRASIL*

*E-mails: gbr1990@gmail.com, danilofs.eng@gmail.com, adolfobs@unb.br*

**Abstract**— Wireless IEEE 802.15.4 (ZigBee) networks are suitable for Networked Control Systems in temperature control in the building automation context, because the processes are slow and not critical. The reduction of energy consumption, by lesser radio usage, is key to enhance the battery duration. In this work we propose a hybrid event-driven control strategy so that radio is only used when necessary. Sensor nodes, powered by a battery, read the environment temperature and, with the aid of an observer, detects events, giving rise to a control cycle. A *sleep* period for the sensor node is scheduled after each event verification. The events are not uniformly distributed, and the controller equation must be adjusted for each event. A simulation in TrueTime<sup>T</sup> established the controller parameters and the event threshold. The temperature of a ZigBit<sup>TM</sup> automated building model was controlled by a hair dryer. The system was compared with On-Off and PI controllers with fixed sampling rate. The energy reduction was as much as 8 times. Parameters that affect more the system are: *sleep* time, event threshold and the PI parameters. The predicted energy saving of two AA batteries that supply a sensor node allow a ZigBit sensor node to operate for more than a year.

**Keywords**— wireless ZigBee network, event-driven building automation, energy efficiency, battery life.

**Resumo**— Redes sem fio IEEE 802.15.4 (ZigBee) são adequadas à implementação de sistemas de controle em rede (Networked Control Systems) no contexto do controle de temperatura em automação predial, pois os processos são lentos e não críticos. A redução do consumo de energia, com menor uso do rádio, é fundamental para aumentar a vida útil das baterias. Este trabalho propõe uma abordagem híbrida de controle orientado a eventos para que o rádio só seja utilizado quando necessário. Nós sensores, alimentado por bateria, leem a temperatura ambiente e em conjunto com um observador detectam eventos e geram ciclos de controle. Um período de *sleep* do nó sensor é inserido após cada verificação de eventos. A ocorrência de eventos não é uniforme e o controlador deve ser ajustado a cada evento. A simulação em TrueTime<sup>T</sup>, permitiu estabelecer os parâmetros do controlador e o limiar de eventos. A temperatura de uma “sala” de uma maquete de predial foi controlada por um secador de cabelos. O sistema foi comparado com controladores liga-desliga e PI com taxa de amostragem fixa. Obteve-se uma redução do consumo de energia do nó sensor de até 8 vezes. Parâmetros que mais influenciam o desempenho do sistema: período de *sleep*, intervalo para detecção de eventos e parâmetros do controlador PI. A economia de energia do nó sensor permite prever que duas baterias AA alimentem módulos ZigBit sensores por mais de um ano.

**Palavras-chave**— redes sem fio ZigBee, automação predial orientada a eventos, eficiência energética, vida útil, bateria.

## 1 Introdução

A automação predial possui, no que se refere ao conforto térmico, requisitos bem mais brandos que os adotados em processos industriais. As constantes de tempo são da ordem de vários minutos e perdas de alguns pacotes numa malha de controle em rede (NCS – Networked Control System) não comprometem, via de regra, a estabilidade do processo, conforme pode ser visto, por exemplo, em Zhang e Feng (2014). Os chamados *Smart Buildings* e nZEB (nearly Zero Energy Buildings) são temas atuais face à crise energética mundial, ver, e.g., Nguyen e Aiello (2012) e Karlessi et al. (2017).

Redes sem fio são cada vez mais utilizadas em automação predial, em particular a rede ZigBee (IEEE 802.15.4) pois a taxa de dados é muito baixa. Os nós sensores são tipicamente alimentados por bateria, ver Shih et al. (2002). A vida útil da bateria é crucial para a aceitação deste tipo de tecnologia. Manter os nós sensores dormindo (*sleep mode*) e só transmitir orientado a eventos são a estratégia investigada neste trabalho para preservar a bateria.

A seção 2 apresenta os conceitos básicos de controle orientado a eventos, focalizando no sensor,

que deve dormir a maior parte do tempo. A seção 3 apresenta resultados de simulação TrueTime de uma rede ZigBee no controle de um processo térmico. Em seguida, a seção 4 apresenta o experimento utilizado para a validação da metodologia proposta. A seção 5 apresenta os resultados e a seção 6 apresenta conclusões e perspectivas futuras.

## 2 Controle orientado a eventos (COE) em rede

A taxa de amostragem uniforme é a forma mais usual de se implementar controladores digitais. A análise e a implementação são mais simples e amplamente descritas na literatura. Sistemas orientados a eventos são outra grande classe. O controle de processos contínuos utilizando eventos discretos é uma terceira classe, frequentemente denominada de **sistemas híbridos**, que recentemente têm atraído muita atenção da comunidade científica, ver Åstrom (2008), Miśkiewicz, (2014) e Zhang (2017b). As origens da amostragem orientada a eventos remontam a Ellis (1959), que propôs: “...Amostragem periódica não é necessária. A amostragem mais adequada é só transmitir dados relevantes, como quando há a alteração de um certo incremento” (tradução livre).

No caso do presente trabalho a abordagem híbrida tem como motivação prolongar a vida útil da bateria do módulo sensor utilizado em automação predial, ver, e.g., Shih (2002), Wang et al. (2003), Schneider et al. (2011). Estudos mostraram, ver Matos e Melo Filho (2013) e Santos e Souza (2015), que um módulo wireless ZigBit alimentado por duas baterias AA, com taxa de transmissão fixa e sem uso do modo *sleep* dura, aproximadamente, 3 semanas. O uso do modo *sleep* (que complica o sincronismo e o roteamento dos pacotes) pode prorrogar a vida útil das baterias até um ano. Além disso, o uso de protocolos Wi-Fi específicos para automação predial, ver Kastner et. al. 2005, em conjunto com a operação orientada a eventos permite uma vida útil projetada de 5 anos (Guimarães, 2011 e 2014). A redução das trocas de bateria em ambientes prediais que utilizam nós sem fio, é o principal foco deste trabalho.

Existem várias estratégias de amostragem orientada a eventos, e.g., Shih (2002), Schor, Sommer e Wattenhofer (2009) e Miśkiewicz (2014). Neste trabalho, com o foco em automação predial, a rede NCS não é crítica. Se alguns pacotes forem perdidos, provavelmente o desconforto térmico, se se estiver tratando de ar condicionado, será pouco perceptível. A estratégia proposta aqui, ver Figura 1, consiste em que o nó sensor monitora periodicamente a temperatura,  $y(k)$ , enquanto executa um observador de estados, que tem o papel de estimar a saída do processo térmico em questão,  $\hat{y}(k)$ , ver Zhang e Feng (2014). A referência contínua é dada por  $r$ , e  $d$  é um sinal de perturbação. Consideram-se como eventos, diferenças relevantes entre: 1)  $y$  e  $\hat{y}$ ; 2)  $y$  e  $r$ . Isto é, se a saída do processo segue bem a referência, não há necessidade transmitir pacotes via rádio. “Diferenças relevantes” (eventos) são usualmente implementadas via um valor  $\Delta$  em torno de um nível de referência, ver Miśkiewicz (2014) e Zhang et al. (2017b).

Åstrom (2008), mostra como a amostragem orientada a eventos tem uma variância bem menor que a amostragem periódica. Ele compara o segurador de ordem zero e o segurador impulsivo periódico (PZOH e PIH) com o segurador impulsivo orientado a eventos (EIH). Este último é, no entanto, pouco prático. No presente trabalho utiliza-se o segurador de ordem zero orientado a eventos (EZOH).

Lunze e Lehmann (2010), mostram que, dadas normas de erro, o controle orientado a eventos pode ser feito tão próximo ao controle contínuo, com estrutura equivalente, quanto se queira. Um sistema orientado a eventos pode assim, ser sintonizado pelo limiar de detecção de eventos.

Ainda que, considerando as vantagens teóricas apontadas pelos autores citados nos parágrafos anteriores, é interessante notar que a motivação principal neste trabalho também já havia sido apontada no trabalho pioneiro de Ellis (1959): “...Em certos casos, a transmissão de dados orientada a eventos, significa o aumento da capacidade do canal” (trad. livre). Ou seja, reduz o consumo de energia na rede sem fio.

## 2.1 Eventos com amostragem periódica

Considerando a operação de uma rede NCS onde o nó sensor detecta os eventos, a amostragem de Lebesgue só incrementa o contador de eventos  $k$  ao ser feita uma transmissão de rádio pelo nó sensor, ver Figura 1. A CPU acorda periodicamente para detectar a ocorrência de um evento (e.g., leitura da temperatura via ADC) e volta a dormir se não há eventos. O consumo de energia no modo *sleep* é muito baixo e, tipicamente, o rádio consome ~6 vezes a energia usada em processamento pela CPU.

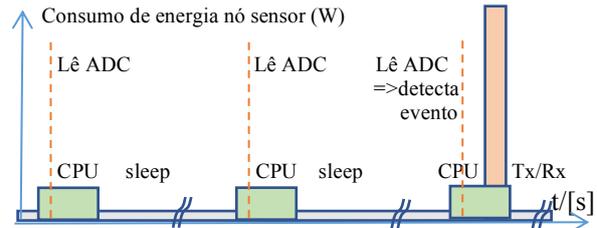


Figura 1. Ilustração do ciclo de trabalho do nó sensor. A economia de energia vem da utilização do rádio orientado a eventos. (Consumo Tx/Rx é 6,2 vezes o consumo típico da CPU).

## 2.2 COE com observador a tempo discreto

Um sistema a eventos discretos com detecção discreta de eventos, conforme a Figura 2, é limitado de forma global uniforme e converge exponencialmente para uma região limitada. Desta forma, dadas taxas de amostragem e limiar de detecção de eventos, é possível projetar controladores estáveis via realimentação de estados observados. O desenvolvimento a seguir, foi adaptado, em linhas gerais, de Zhang e Feng (2008).

O processo linear contínuo é descrito por

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Fd(t) \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $x$  são os estados do processo,  $u$  é o sinal de entrada,  $y$  a saída,  $r$  é a referência e  $d$  a perturbação.  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $F$  são matrizes de dimensões compatíveis. Sem perda de generalidade, assume-se que não há transmissão direta entre  $u$  e  $y$ .

Os instantes de tempo em que os eventos ocorrem serão denotados  $\{t_k\}_{k=0}^{\infty}$ . Sem perda de generalidade, o primeiro evento ocorre em  $t_0$ . Com o estado estimado  $\hat{x}(t_k)$  amostrado no instante  $t_k$ , o próximo evento será em

$$t_{k+1} = \inf \{t > t_k \mid \|e(t)\| \geq \gamma(t)\} \quad (2)$$

onde  $e(t) = \hat{x}(t) - \hat{x}(t_k)$ ,  $\gamma(t) = \sqrt{\varepsilon^{-\alpha t} + \varepsilon_0}$  é um limiar de eventos exponencialmente decrescente com parâmetros  $\varepsilon > 1$ ,  $0 \leq \alpha < 1$  e  $\varepsilon_0 \geq 0$ .

A monitoração contínua do processo não é viável para nós sensores alimentados por bateria. A detecção de eventos em tempo discreto, com taxa de amostragem constante  $T$  gera eventos em  $t_k = i_k T$ , em que  $i_k, k \in \mathbb{N}$ , são alguns inteiros e

$\{i_0, i_1, i_2, \dots\} \subset \{0, 1, 2, \dots\}$  com  $i_0 = 0$  e  $i_k < i_{k+1}$ . Naturalmente,  $\forall k, t_{k+1} - t_k \geq T$ .

Definindo  $l_{k,j} = (i_k + j)T, j = 0, 1, 2, \dots, d_k$  e  $d_k = i_{k+1} - i_k - 1$ , tem-se que  $[t_k, t_{k+1}) = \cup_{j=0}^{d_k} [l_{k,j}, l_{k,j+1})$ . Agora, assumindo que  $\hat{x}(t_k)$  é amostrado no instante  $t_k$ . Define-se  $e_d(t) = \hat{x}(l_{k,j}) - \hat{x}(t_k), t \in [l_{k,j}, l_{k,j+1})$ . Assim  $e_d(t)$  é constante por partes e contínua. A próxima amostra ocorre no instante  $t_{k+1} = i_{k+1} + T$ , onde

$$i_{k+1} = \min_{h \in \mathbb{Z}} \{h > i_k \mid \|e_d(hT)\| \geq \gamma((h+1)T)\}. \quad (3)$$

A expressão (3) reduz o limiar à medida que o tempo passa sem eventos. Uma forma mais simples seria utilizar um limiar fixo e o tempo entre eventos. As amostras periódicas de  $y(n)$  são obtidas pelo sensor em  $t = nT; n = 0, 1, 2, \dots$ . O observador com detector de eventos a tempo discreto é:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) = & A\hat{x}(t) + Bu(t) + Fd(t) \\ & + L(y(l_{k,j}) - C\hat{x}(l_{k,j})). \end{aligned} \quad (4)$$

O erro de estimação é definido como  $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ . Processos reais estão sempre sujeitos a perturbações. A realimentação de estados não é suficiente para lidar com sinais de perturbações constantes (por partes). Assim, será utilizado um controlador por realimentação de estados observados, aumentado por um canal I (estado adicionado,  $x_i$ ).

A lei de controle é  $u = -K\hat{x} + K_i x_i$ . Define-se  $\tau(t) = t - l_{k,j}$ . Assim, para  $t \in [l_{k,j}, l_{k,j+1})$ , vale:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\tilde{x}} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 \\ -C & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \\ x_i \end{bmatrix}_{t-\tau(t)} + \begin{bmatrix} -BK & BK & BK_i \\ 0 & -LC & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \\ x_i \end{bmatrix}_{t-\tau(t)} \\ & + \begin{bmatrix} -BK \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e_d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} F \\ F \\ 0 \end{bmatrix} d \\ y = & [C \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \\ x_i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Onde as variáveis do observador  $\hat{x}$ , foram substituídas pelo vetor de erro  $\tilde{x}$ .

### 2.3 Controle PI orientado a eventos

Mais usual em aplicações industriais que o controlador (5) é o controlador PI:

$$u = K_p(r - y) + K_i \int (r - y) = K_p e + K_i x_i. \quad (6)$$

onde  $K_p$  é o ganho proporcional e  $K_i$ , o ganho integral. Esta lei de controle é um pouco mais rápida na detecção de perturbações que (5), pois utiliza a saída medida do processo,  $y$ , em lugar da saída estimada pelo observador,  $\hat{y}$ .

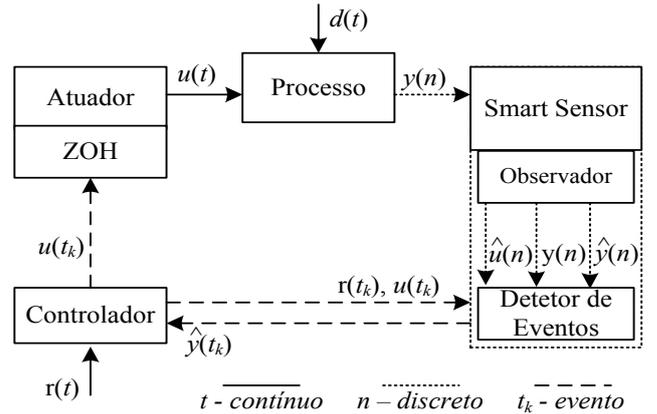


Figura 2. Controle orientado a eventos com sensor a tempo discreto. O nó sensor acorda periodicamente para verificar eventos.  $n$  - tempo discreto,  $t_k$  - tempo em que ocorre o evento  $k$ .

O controle PI, quando orientado a eventos, precisa ajustar os parâmetros do controlador à variação do tempo decorrido entre eventos. A lei de controle PI contínua pode ser discretizada pela fórmula de Tustin  $s \leftarrow \frac{2z-1}{Tz+1}$ . Para o sistema orientado a eventos o controle PI passa a ser:

$$\begin{aligned} u(t_k) = & u(t_{k-1}) + \left(\frac{K_i}{2} + \frac{K_p}{t_{k+1}-t_k}\right) e(t_k) + \\ & + \left(\frac{K_i}{2} - \frac{K_p}{t_{k+1}-t_k}\right) e(t_{k-1}). \end{aligned} \quad (7)$$

## 3 Simulação em TrueTime

O simulador TrueTime (Cervin et al. 2010), permite estudar sistemas de controle em rede, simula-se, em essência, a temporização dos protocolos e não protocolo em si (como pode ser feito com o simulador de rede NS2, ver, e.g., Guimarães (2014)). ZigBee é uma das redes disponíveis. Este ambiente permite criar redes com vários nós simulando a troca de mensagens. Consumo de energia e períodos de transmissão e recepção são devidamente registrados.

A Figura 3 mostra a implementação de uma rede NCS ZigBee orientada a eventos onde a temperatura de uma sala de reuniões é modela como processo de primeira ordem. O observador do processo está aqui implementado em blocos do Simulink para ficar mais didático, mas poderia também ser um script (.m) ou um arquivo mex. No módulo sensor real deverá ser versão digital em linguagem C.

Alguns parâmetros de simulação utilizados:

- Taxa de dados: 250.000 bits/s,
- Potencia de transmissão: 30 dBm,
- Limiar de recepção: -48 dBm,
- sleep time: 15 s e 60 s,
- Processo térmico:  $0.86/(1+s57,6)$
- Constante de tempo do processo térmico 200 s,
- Controlador PI, ver eq. (1) a (3):  $K_p=0,7; K_i=0,3$ ,
- Saturação do atuador:  $sat_H=220; sat_L=0$ ,
- $\Delta = 0,5$ , intervalo detecção de evento ( $^{\circ}\text{C}$ ).

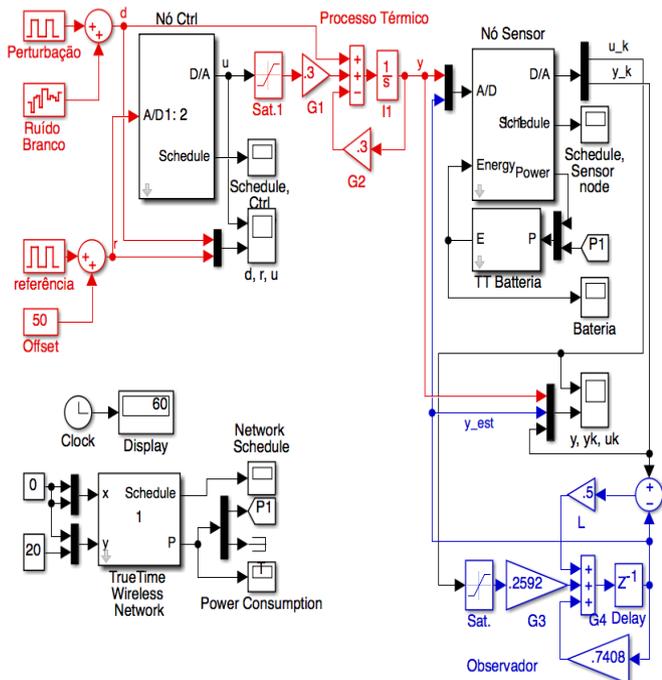


Figura 3. Simulação TrueTime do controle de temperatura NCS.  $r$  - referência,  $y$  - saída,  $y$ ;  $y_{est}$  - saída do observador,  $u$  - sinal de controle,  $d$  - perturbação.

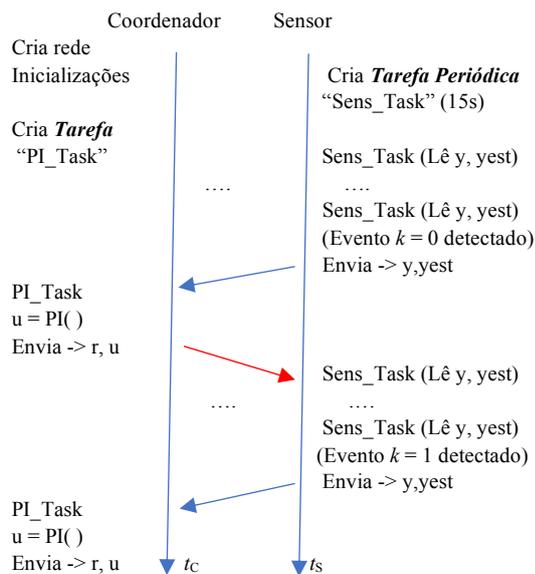


Figura 4. Linha do tempo de eventos – Nós Coordenador e Sensor.

A Figura 3 apresenta uma simulação típica do controle orientado a evento. O processo é contínuo, porém a transmissão de mensagens só ocorre quando ocorre um evento. A cada minuto o nó sensor verifica a temperatura e baseado no observador e gera mensagens quando detecta a condição de evento.

A linha do tempo do nós coordenador e sensor, com uma sequência típica de eventos é mostrada na Figura 4. Em TrueTime uma tarefa periódica, mantém a rede “viva”. Envia mensagem quando detecta um evento. O coordenar só atua quando recebe mensagem do sensor. Mais adiante será visto que na rede ZigBit implementada, após concluída a tarefa do sensor, o modo *sleep* é programado com tempo fixo  $T$ , aproximando uma execução periódica.

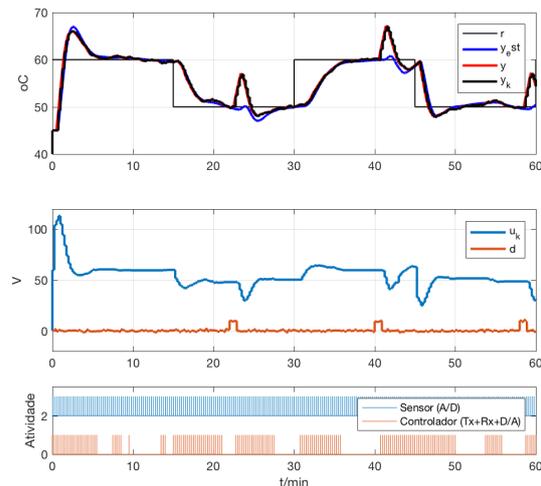


Figura 5. Simulação do processo da Figura 3. Ciclos (90+150): 37,5% redução.  $T_s=15$  s;  $K_p = .7$ ;  $K_i = .3$ ;

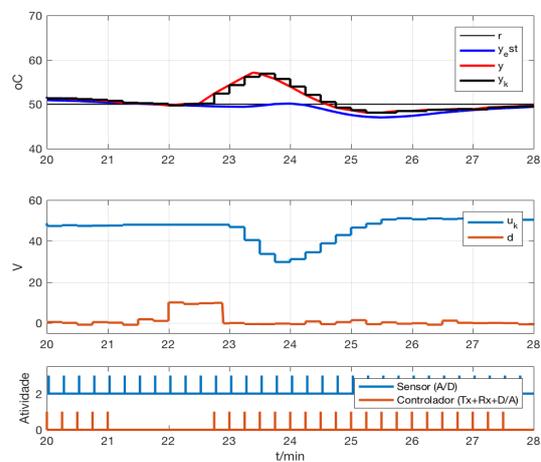


Figura 6. Detalhe 20-28 min A partir de 21 s,  $y$  está na banda  $\Delta$  (não há eventos). O sinal  $u(t_k)$  se mantém constante. A perturbação que ocorre em 22 min só é percebida em 22,5 min, sendo contraposta por um evento em 22,75 min.

A Figura 5 mostra a simulação com  $T_s = 15$  s. Nota-se uma redução de 37,5% no número de transmissões do sistema orientado a eventos em comparação com a taxa de amostragem fixa. Para  $T_s = 1$  min, com  $K_p = 2$ ;  $K_i = 0,5$  ocorreram 40 eventos em 1 hora (redução de 33,33%). No entanto, se compararmos este processo orientado a eventos com a amostragem uniforme de 15 s temos um ganho de 83,33% (200/240).

A Figura 6 detalha o trecho em que não há transmissão seguida de uma perturbação. Nota-se um atraso típico até a reação do controlador. O objetivo principal das simulações foi estabelecer regras para a taxa de amostragem e definição de eventos NCS.

#### 4 Validação Experimental – Maquete predial

Como os testes em ambientes prediais disponíveis nas universidades afetam a rotina dos usuários (são recursos compartilhados) optou-se pelo uso de uma maquete, que reproduz em pequena escala um conjunto de salas adjacentes.



Figura 7. Maquete de automação predial utilizada.

### 3.1 Maquete predial

Do ponto de vista térmico, a maquete utilizada é análoga ao processo de climatização de salas em ambientes prediais, só trocando resfriamento por aquecimento. A vantagem prática é que este sistema esquentar o ar com secadores de cabelo acionados via relés (que são mais simples que aparelhos de ar condicionado). Apenas uma das salas foi utilizada no presente estudo, Figura 7, (Santos e Souza, 2015).

### 3.2 Rede ZigBee

Uma rede sem fio baseada em módulos Atmel ZigBit foi projetada para conectar sensores e atuadores ao processo. O módulo ZigBit de 2,4 GHz utiliza Transceiver AT86RF230 e processador ATmega 1281. A Figura 8 mostra o diagrama de blocos do ZigBit utilizado (Atmel, 2018).

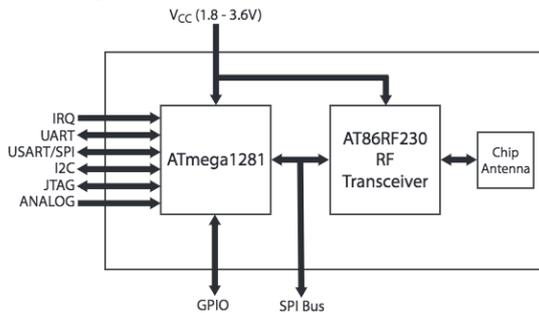


Figura 8. Diagrama de blocos ZigBit Atmel ATZB-24-A2.

Placas de circuito impresso foram desenvolvidas para abrigar um módulo ZigBit como *coordenador* e outra como *End Device*. O nó coordenador está conectado a um PC via porta USB e, além das funções de roteador, também implementa o controlador e o acionamento PWM do relê de estado sólido. O nó sensor utiliza um sensor de temperatura e umidade DHT22 e é alimentado por bateria. As Figuras 9 e 10 ilustram as conexões aos módulos ZigBit coordenador e sensor.

O módulo ZigBit em questão (ATZB-24-A2) dispõe de uma antena *dual chip* com ganho de aproximadamente 0 dBi. Tem alta sensibilidade de recepção (-101dBm) e baixo consumo de energia.

Considerando  $V_{cc} = 3V$  e  $T_{amb} = 25^{\circ}C$ , os valores de corrente fornecidos no *datasheet* da Atmel são:

- < 6uA - em modo sleep,
- 21.8mA - em RX,
- 20.8mA - em TX,
- 3.5 mA – sem rádio, MCU ativa 50% do tempo.

### 3.3 Sensor e Atuador

Um sensor e um atuador foram utilizados nos experimentos. O sensor DHT22 é utilizado para medir a temperatura da “sala”, ver Figura 9.

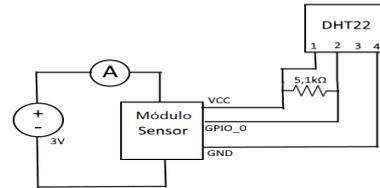


Figura 9. Conexão módulo sensor ao DHT22.

A utilização de um secador de cabelo como fonte de calor está mostrada na Figura 10. A resistência e o ventilador estão conectados em série. Condução e convecção de calor estão envolvidos – ambos proporcionais à diferença de temperatura entre a resistência do secador e a temperatura na “sala” de testes. O sinal do atuador, modulado em PWM, produz um sinal de alta frequência cujo valor médio é “visto” pelo processo. Este valor médio será a variável manipulada,  $u$ , produzida pelas leis de controle em estudo. Note que a energia térmica produzida pela resistência é proporcional ao quadrado da corrente e assim trata-se, a rigor, de um processo não linear. No presente experimento esta questão foi ignorada. Os experimentos mostram que, em torno dos pontos de operação, não há prejuízo relevante por se usar um modelo de pequenos sinais (linear), Santos e Souza (2015).

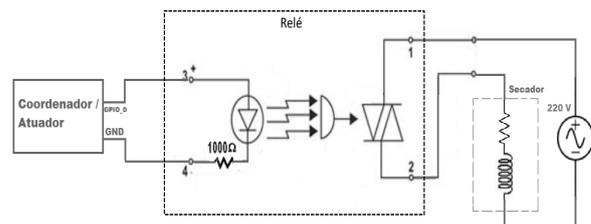


Figura 10. Conexão do módulo coordenador, via relê ao secador.

A instrumentação da maquete predial, ver Figura 11, permite produzir temperaturas desejadas nos “corredores” laterais, simulando condições térmicas externas à “sala” em estudo.

O controle Liga-Desliga utiliza apenas um relê para comutar o secador de cabelos. Os controladores PI, com taxa de amostragem fixa, e o controlador PI orientado a eventos utilizam a saída PWM do ZigBit para acionar o secador de cabelos.

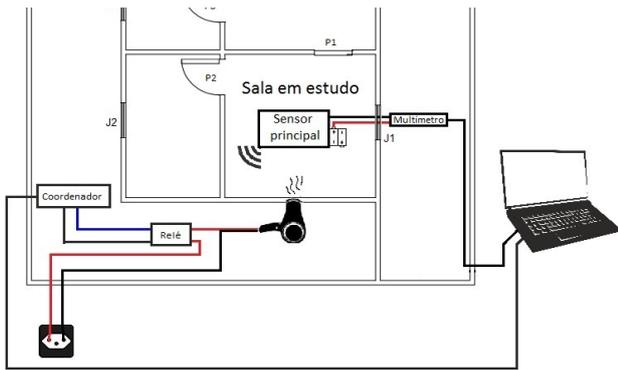


Figura 11. Disposição dos módulos na maquete predial.

### 3.4 Arquitetura de Software

A Figura 12 apresenta a arquitetura do software utilizado para testar o controle orientado a eventos. Seguindo o sentido das setas, temos: A rede é criada pelo nó coordenador. O nó sensor é acrescentado à rede e entra em modo *sleep*, esperando ser acordado pelo timer. Caso haja um evento, o nó sensor envia uma mensagem com a temperatura lida. O nó coordenador, ao receber a mensagem, calcula a lei de controle e modifica, de forma correspondente, o ciclo de trabalho do PWM. O PC que tem em uma porta USB o módulo coordenador, roda MatLab, recebendo (Bloco “From Instrument”, toolbox de instrumentação), a cada evento, os dados do módulo coordenador.

### 3.4 Ciclo de trabalho do nó orientado a eventos

Em oposição à amostragem uniforme (conhecida com amostragem de Riemann) a amostragem de Lebesgue ou amostragem orientada a eventos impõe considerações adicionais ao projeto de sistemas de controle. A Figura 1 mostra, em linhas pontilhadas, instantes em que o nó sensor adquire a temperatura por meio do conversor ADC. Caso não seja detectado um evento (ver definição mais adiante) a CPU volta a “dormir”. O consumo de energia enquanto a CPU está ativa é de 3,5 mA. Em *sleep* o consumo cai para menos de 6  $\mu$ A. Caso seja detectado um evento faz-se necessário ativar o rádio e o consumo de energia aumenta para mais de 20 mA.

É importante destacar na Figura 12 que o nó sensor programa um tempo de *sleep* (e.g. 15 s) depois de verificar o estado do processo. Não existe um relógio propriamente dito. O nó coordenador só calcula a lei de controle quando recebe uma mensagem do sensor. Neste instante o nó coordenador também informa ao nó sensor o valor atual do sinal de referência (necessário ao observador e à detecção de eventos).

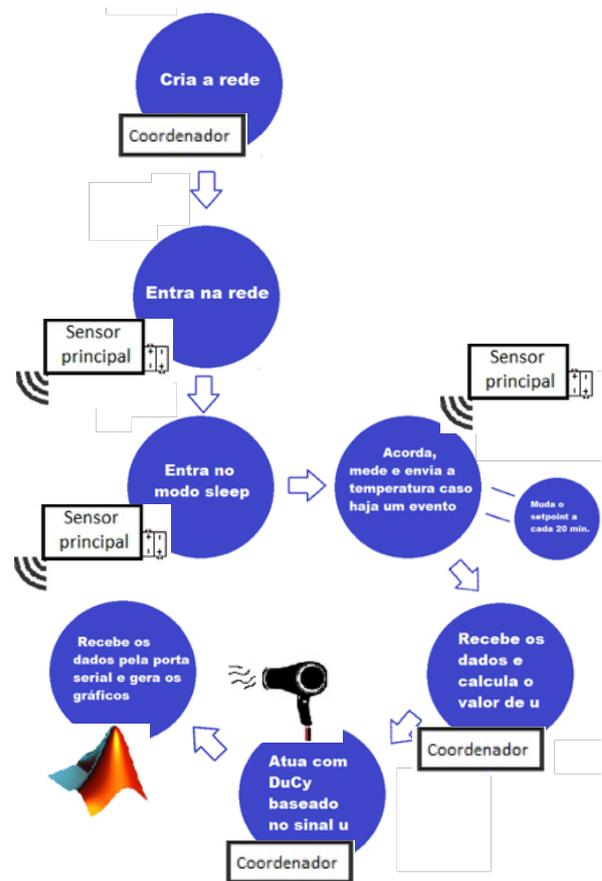


Figura 12. Ciclo de operação dos módulos ZigBit.

## 5 Resultados

Foram feitos diversos testes visando avaliar a proposta de controle e obter recomendações de sintonia de controladores orientados a eventos.

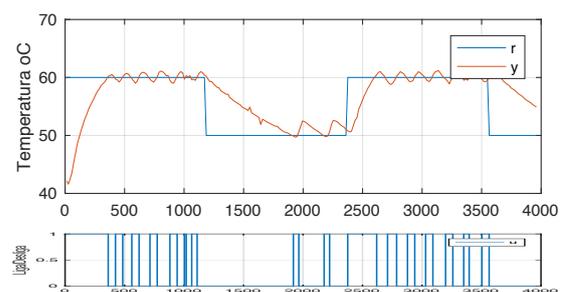


Figura 13. Controle Liga-Desliga. Histerese  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{sleep}} = 15$  s.

A Figura 13 mostra o controle Liga-Desliga com período de amostragem fixo de 2 s. Nota-se que no início do teste o sinal de controle fica ligado até que se atinja o intervalo de histerese. Atingida esta faixa, tem-se uma oscilação em torno da referência,  $r = 60^\circ\text{C}$ , típica deste tipo de controle. Quando a referência passa para  $50^\circ\text{C}$ , nota-se o sinal  $u$  em zero por um longo período. Isto ocorre porque o resfriamento da maquete ocorre apenas pela troca de calor com o meio ambiente circundante. Isto é, o atuador secador de cabelo apenas permite aquecer a sala.

A Figura 14 mostra o controle clássico PI da temperatura da sala de teste com período de amostragem fixo de 2 s. O sinal do atuador se encontra saturado tanto no início do teste (em 220 V) bem como em grande parte dos tempos quando a referência muda de 60° C para 50° C (em 0 V).

Nota-se tanto nas curvas Liga-Desliga como nas curvas PI vários picos da ordem de, aproximadamente, 1° C. Uma possível explicação deste fenômeno é a coincidência (aleatória) da conversão A/D do módulo ZigBit sensor com a transmissão ou recepção via rádio. Estes últimos demandam corrente elevada (em comparação ao consumo do ATmega 1281), alterando momentaneamente a tensão que a bateria consegue fornecer. A alteração da tensão de referência do conversor A/D (fornecida pela bateria) provoca erros no valor A/D fornecido.

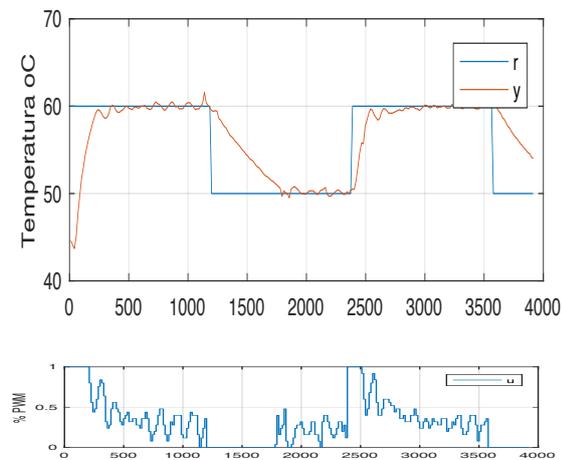


Figura 14. Controle PI via PWM, ( $T_s \sim 15.26$  s com  $T_{sleep} = 15$  s).

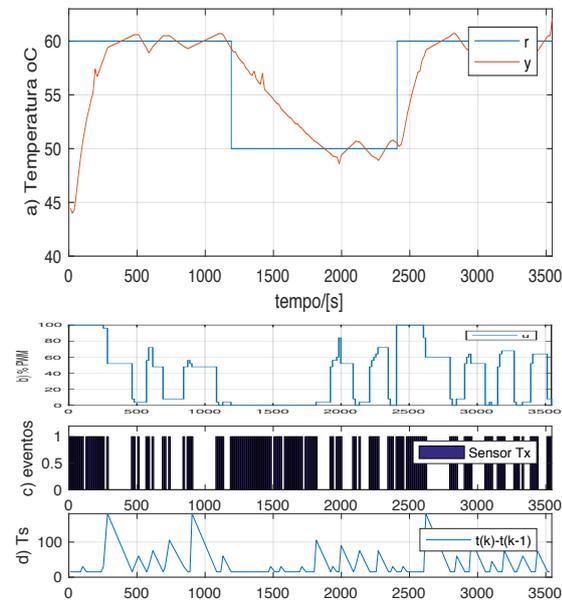


Figura 15. Controle PI orientado a eventos,  $E |e| > 0,5$  °C, *sleep* de 15 s, Tempo de leitura médio pelo nó sensor de 15,25 s. Redução de utilização do rádio pelo nó sensor: 44,06%. Tx=130.

O controlador PI, com  $T_s = 2$  s, tem desempenho de controle excelente. Consome, no entanto, 8,46 vezes mais energia que o controlador orientado a eventos com  $T_s = 15$  s, ver Figura 15.

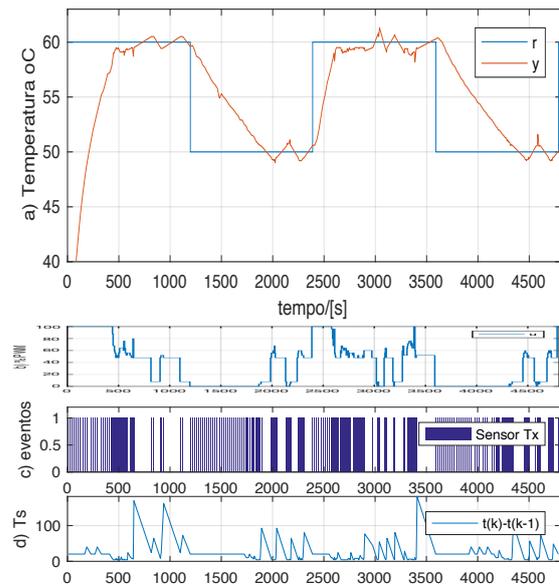


Figura 16. Tx=313; 1h20min. Controle orientado a Evento (Erro  $> |0,5$  °C). *Sleep* de 4 s. Com perturbações: Em  $t = 1020$  s (abertura do vidro que cobre a maquete por 15 s); Em  $t = 2220$  s (abertura da janela J2 e das portas P1, P2 e P5 durante 3,5 s); Em  $t = 2970$  (mudança da posição do sensor, do teto da “sala” em estudo para o chão da “sala” por 8 min.).

A Figura 16 considera perturbações, condição sempre presentes em sistemas de automação predial. A rejeição de perturbações gera eventos adicionais, com maior uso de energia das baterias.

A Tabela 1 compara os controladores testados neste artigo. Vê-se que o controlador liga-desliga tem um comportamento apenas regular mesmo com um período de *sleep* de 2 s. O controlador E 15 s apresenta o menor consumo de energia. Quando se considera os controladores orientados a eventos,  $E |e| > \Delta$  °C, nota-se que os envios/h para  $\Delta = 0,1$  °C são apenas o 1,88 vezes maiores que para  $\Delta = 1$  °C. Apesar do conceito qualitativo “Bom”, nota-se, pelos gráficos, uma oscilação razoável, da temperatura em torno do valor de referência. Em automação predial, estas pequenas oscilações de temperatura não são consideradas desconforto térmico e são toleradas pela maioria dos usuários.

Tabela 1: Comparação entre os controladores: L-D – Liga desliga; PI - Taxa de amostragem constante; E – Orientado a Eventos; E Perturb. – Orientado a Eventos com perturbações.

Controle	I (mA)	Pot. (mW)	Envios /h	Avaliação Qualit.
L-D 2 s	3,700	11,618	1501,6	Regular
L-D 15 s	0,527	1,655	218,2	Ruim
PI 2 s	3,100	9,734	1505,4	Excelente
PI 15 s	0,509	1,597	220,8	Bom
E 15 s	0,366	1,150	132,0	Bom
E $ e  > 0,1$ °C	0,748	2,349	303,3	Bom
E $ e  > 0,5$ °C	0,624	1,959	240,9	Bom
E $ e  > 1$ °C	0,462	1,451	161,5	Regular
E Perturb. $ e  > 0,5$ °C	0,626	1,965	234,4	Bom

## 6 Conclusões e Perspectivas

Sistemas de controle em rede e principalmente sistemas sem fio permitem grande flexibilidade à automação predial. Nós sensores e em parte nós atuadores podem ser remanejados facilmente no ambiente. Pode-se prover conforto térmico, medindo a temperatura onde realmente interessa. O nó sensor alimentado por bateria é um incômodo, se houver troca frequente da bateria.

O sistema orientado a eventos consegue equilibrar de forma satisfatória consumo de energia e desempenho no controle, atingindo o objetivo proposto. A economia obtida permite estender significativamente a vida útil da bateria. Deve-se notar, que a complexidade do sistema é bem maior e que se espera um tempo maior de sintonia e de instalação do sistema.

A grande tendência atual é a da internet das coisas (IOT), em que vários dispositivos são integrados à nuvem. Um prédio automatizado pode estar integrado à rede IOT e os dispositivos e seus serviços serão ditos “inteligentes” à medida em que as informações são compartilhadas e processadas adequadamente. O prédio IOT/Inteligente provê conforto, racionalização de energia e segurança de acordo com as distintas ocupações dos ambientes. Considera também os ambientes adjacentes e os usuários de forma contextualizada.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES o apoio recebido.

### Referências Bibliográficas

- Åstrom, K.J. (2008). Event Based Control. In A. Astolfi & L. Marconi (Eds.), *Analysis and design of nonlinear control systems: in honor of Alberto Isidori*, Springer, pp. 127-147.
- Atmel (2018). [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8226-ZigBit-2.4GHz-Wireless-Modules-ATZB-24-A2B0\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8226-ZigBit-2.4GHz-Wireless-Modules-ATZB-24-A2B0_Datasheet.pdf) (on-line)
- Cervin, A., Henriksson, D., Ohlin, M. (2016). TrueTime 2.0 beta – Reference Manual, Dept. of Automatic Control, Lund University.
- Ellis, P. H. (1959). Extension of Phase Plane Analysis to Quantized Systems, *IRE Transactions on Automatic Control*, Vol. 4, Issue 2, pp. 43-54.
- Guimarães, V. G. (2014). Protocolo MAC Eficiente em Energia e Livro de Colisões para Redes de Sensores Sem Fio, Diss. Eng. Elétrica, UnB.
- Karlessi, T., Kampelis, N., Kolokotsa, D., Santamouris, M., Standardi, L., Isidori, D., Cristaldi, C. (2017), The concept of smart and NZEB buildings and the integrated design approach, iHBE 2016, Int. High-Performance Built Environment Conference, *Procedia Engineering* 180, pp. 1316-1325.
- Kastner, W., Neugschwandtner, G., Soucek, S. and Newman, H. M. (2005). *Communication Systems for Building Automation and Control*, *Proceedings of the IEEE*, VOL. 93, NO. 6, JUNE 2005, pp. 1178-1203.
- Matos, L. G., Melo Filho, N. C. (2013). Economia de energia e gravação remota de dispositivos ZigBee visando a automação predial, 2013, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- Miśkiewicz, M. (2014). Event-based sampling strategies in networked control systems, *Factory Communication Systems (WFCS)*, 2014 10th IEEE Workshop on, Toulouse, France, pp. 1-10.
- Nguyen, T. A., Aiello, M. (2012). Energy intelligent buildings based on user activity: A survey, *Johann Bernoulli Institute for Mathematics and Computer Science*, University of Groningen, Nijenborgh, AG Groningen, The Netherlands
- Santos, D. F. e Souza, G. L. (2015). Eficiência Energética de Redes sem Fio de automação Predial Orientada a Eventos, TCC Eng. Elétrica, UnB.
- Schneider, K. K., Sausen, P. S., Sausen, A., *Análise Comparativa do Tempo de Vida de Baterias em Dispositivos Móveis a partir da Utilização de Modelos Analíticos*, (2011). Mestrado em Modelagem Matemática, Univ. Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí..
- Shih, E., Bahl, P., Sinclair, M. J. (2002). Wake on Wireless: An Event Driven Energy Saving Strategy for Battery Operated Devices, *ACM MobiCom '02*, Atlanta, USA, pp. 160-171.
- Schor, L., Sommer, P., Wattenhofer, R. (2009). Towards a Zero-Configuration Wireless Sensor Network Architecture for Smart Buildings, *BuildSys '09*, Proc. First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, Berkeley, pp. 31-36.
- Wang, D., Arens, E., Federspiel, C. (2003). Opportunities to save energy and improve comfort by using wireless sensor networks in buildings, center for environmental design research, UC Berkeley.
- Zhang, J., Feng, G. (2014). Event-Driven observer-based output feedback control for linear systems, *Automatica* 50 pp. 1852-1859.
- Zhang, D., Shi, P., Wang, Q.-G., Yu, L. (2017a). Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges, *ISA Transactions* 66 (2017) pp. 376-392.
- Zhang, X.-M., Han, Q.-L., Zhang, B.-L. (2017b) An Overview and Deep Investigation on Sampled-Data-Based Event-Triggered Control and Filtering for Networked Systems, *IEEE Trans. On Industrial Informatics*, Vol. 13, No. 1, Feb. 2017, pp. 4-16.