

## **Medidor de energia embarcado para máquinas industriais implementado em rede de sensor sem fio**

Edson Taira Procopio,  
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil  
ed\_taira@hotmail.com

Jose Luis Pagotto,  
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil  
pagotto.jl@gmail.com

Alexandre de Assis Mota  
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil  
amota@puc-campinas.edu.br

Lia Toledo Moreira Mota  
PUC-Campinas – SÃO PAULO – Brasil  
lia.mota@puc-campinas.ed.br

**Resumo** - Este artigo apresenta uma proposta de dispositivo medidor de energia embarcado para monitorar individualmente o consumo de energia elétrica de máquinas produtivas em manufatura. As informações obtidas pelo dispositivo podem oferecer condições de análise de custo em operações produtivas, manutenção e análise do dimensionamento de componentes (motores). A metodologia de trabalho utilizada é a implementação de redes inteligentes de sensores sem fio, com plataforma aberta de hardware, o módulo RFBee. O principal objetivo deste trabalho é através de uma rede de sensores sem fio obter resultados relevantes para a empresa, racionalizando a eficiência do consumo de energia elétrica na indústria de manufatura.

**Palavras-chave** - *Redes de Sensores Sem Fio; Medição de Energia; Eficiência Energética; Hardware Livre.*

### **a) Introdução**

O ambiente industrial é caracterizado pela produção contínua. Assim, eventos que geram paradas na linha de produção e custos adicionais embutidos no processo produtivo podem causar efeitos comprometedores na condição financeira de uma indústria. Uma forma de conseguir controlar, e reduzir, os impactos que esses fatores podem causar é monitorar, de forma individual, os equipamentos que compõem a linha de produção no que diz respeito ao seu consumo de energia elétrica individual. Através dessas medições, é possível, posteriormente:

- Analisar o custo associado ao consumo de energia elétrica em operações produtivas com máquinas de grande consumo;
- Avaliar o dimensionamento de motores, em meios produtivos;
- Prevenir o aumento do custo associado ao consumo de energia elétrica por falta de manutenção preventiva.

A análise individual do consumo de energia elétrica dos meios de fabricação permitirá a separação clara do custo embutido em seu funcionamento nas operações de fabricação.

Os resultados desta análise poderão fornecer subsídios para outros aspectos pontuais da indústria, como intervenção de manutenção antes de uma parada inesperada de uma máquina.

Na prática, a manutenção destes meios ocorre de forma corretiva, ou seja, após algum evento que impossibilite o funcionamento. Em alguns casos, não é aplicada a precisão necessária no momento da substituição dos componentes comprometidos, por conta da necessidade de restabelecer o funcionamento da linha de produção o mais rápido possível, o que pode resultar em novos problemas, como super dimensionamento, principalmente de motores, em virtude da necessidade urgente da continuidade da produção.

Para realizar a medição individualizada, este trabalho propõe a utilização de redes de sensores sem fio segundo o padrão IEEE 802.15.4[1].

As redes de sensores sem fio têm sido muito discutidas tanto no meio acadêmico como na indústria, devido ao conceito de aplicação abrangente nas mais diversas áreas de monitoramento, tanto no uso residencial como no uso industrial [2]. A idéia de utilizar uma rede de sensores inteligentes sem fio no ambiente industrial, complementada com serviços de telecomunicações para monitoração de consumo individual de energia elétrica por máquina produtiva pode trazer benefícios relevantes para a indústria no que concerne ao conceito de redes inteligentes (Smart Grids) [3].

O trabalho desenvolvido está apresentado da seguinte maneira: na Seção **b** é detalhada a arquitetura de hardware e na Seção **c** a arquitetura de software proposta. Na Seção **d** são apresentados os benefícios a serem adquiridos com esta arquitetura para a indústria e as dificuldades que podem se apresentar em um ambiente industrial e uma discussão/conclusão sobre propostas de melhorias do dispositivo.

## **b) Arquitetura de Hardware**

O dispositivo medidor é composto por elementos com funções específicas de condicionamento de sinal e transmissão de dados. No condicionamento de sinal existem funções do circuito medidor de tensão, circuito medidor de corrente e leitura do micro controlador no módulo sensor do RFBee. Na transmissão de dados, através de comunicação sem fio, estão os módulos sensores e módulo base do RFBee e uma unidade computacional que recebe as informações que chega no módulo base. A arquitetura do conjunto está representado na Figura 1.

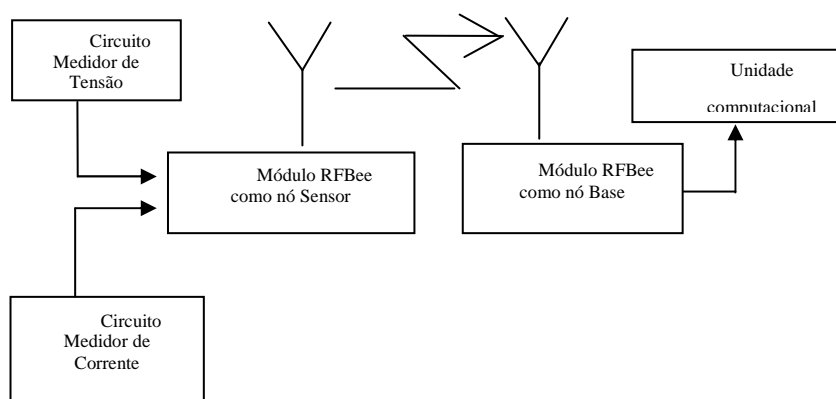


Figura 1. Arquitetura de hardware

### ***b.1. Sensores de Tensão e Corrente***

Para realizar a medição da potência consumida nos equipamentos foram desenvolvidos circuitos para fazer a medição de tensão e corrente que alimentam este equipamento.

O circuito medidor de tensão, apresentado na Figura 2, tem na sua configuração um transformador de potencial (TP), isolando o dispositivo da alimentação do equipamento monitorado, resistores R1 e R2 formando um divisor de tensão e um nível de tensão DC, atuando como offset do sinal que será recebido pelo micro controlador contido no módulo RFBee. O sinal AS1 na Figura 2 representa o sinal da porta de leitura analógica do módulo.

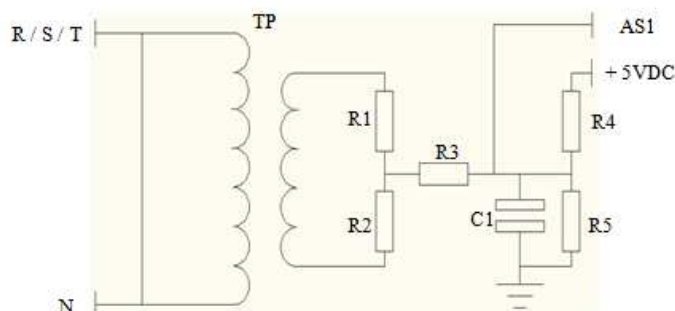


Figura 2. Circuito medidor de tensão

O circuito medidor de corrente, apresentado na Figura 3, é composto de um transformador de corrente (TC) e também um nível de tensão, atuando como offset do nível de tensão obtido na saída do TC.

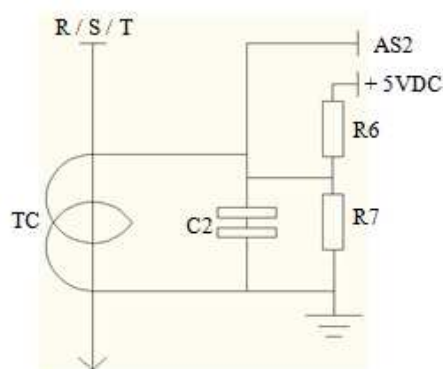


Figura 3. Circuito medidor de corrente

O offset introduzido nos sinais recebidos pelo micro controlador tem a função de torná-los positivos para a leitura dos níveis dos sinais em sua porta analógica.

Como o trabalho realizado destina-se a monitorar o consumo de energia elétrica de equipamentos industriais, foi necessário desenvolver um circuito medidor de tensão e um circuito medidor de corrente para cada uma das fases (R, S e T) que alimenta o equipamento, considerando que sejam equipamentos trifásicos.

## **b.2. Rede de Sensores**

A rede de sensores é formada pelos módulos RFBee sensor e módulo RFBee base.

O RFBee é uma plataforma de hardware livre, compatível com a plataforma Arduino, que vem sendo muito utilizada em projetos de eletrônica, utilizando hardware com software embarcado, devido possuir uma linguagem de programação simples[4]. A Figura 4 demonstra um módulo sensor RFBee e a Figura 5 apresenta uma base, onde é acoplado o módulo RFBee, tornando-se um nó base em uma rede de sensores sem fio.



Figura 4. Módulo sensor RFBee [5]



Figura 5. Base para módulo RFBee [6]

O RFBee possui um microcontrolador Atmega168, da Atmel, que pode ser programado de acordo com a aplicação necessária, e também possui o circuito integrado (CI) CC1101, da Texas Instruments[7]. O C1101 é um CI recomendado para aplicações com redes de sensores sem fio, controle e monitoramento industrial, que está alinhado com os objetivos do trabalho desenvolvido. Todos os parâmetros de transmissão são implementados na programação deste CI[8].

O indicador da intensidade do sinal recebido, ou RSSI (Received Signal Strength Indicator), é um parâmetro indicado pelo CC1101, que é muito importante, ainda mais em se tratando de ambientes industriais, que possuem diversos componentes que interferem no sinal que trafega entre sensor e base. A sensibilidade dos módulos, operando na frequência de 915 MHz, é de -112 dBm, de acordo com especificação do fabricante.

### c) Arquitetura de Software

A programação para o funcionamento da transmissão foi estruturada em pilha de protocolo, organizada em cinco camadas: física, MAC(Media Access Control), rede, transporte e aplicação. O objetivo dessa forma de estruturação é possibilitar a escalabilidade da rede de acordo com o interesse de monitoramento, ou mesmo a expansão da linha de produção. Outra vantagem na pilha de protocolo é a possibilidade de implementar um sistema de gerenciamento da rede, quantificando parâmetros que demonstrem a estabilidade e a confiabilidade da rede.

Na aplicação deste trabalho, os parâmetros recebidos no módulo base e enviados para a unidade computacional são os valores proporcionais à tensão, corrente e potência Instantânea da carga monitorada, e o nível de RSSI entre os módulos sensor e base. O RSSI é um parâmetro muito importante no auxílio à tomada de decisão sobre em qual local instalar o módulo sensor e a base.

Com relação à medição das grandezas elétricas envolvidas, são feitas tratativas no próprio nó sensor, onde são amostrados os níveis de tensão proporcionais ao nível de tensão e corrente analógicos, convertidos em digitais e transmitidos para o módulo base. Esses valores somente são tratados de forma que representem o valor real da potência consumida pela carga monitorada na unidade computacional, que é onde são concentradas as informações que podem servir para fazer uma análise mais detalhada dos dados adquiridos pelo dispositivo medidor.

A aquisição dos valores de tensão e corrente feita pelo módulo sensor é obtida através de amostragens em portas de leitura analógicas do micro controlador Atmega. Neste trabalho, são utilizadas seis portas analógicas, correspondentes a três níveis de tensão e três níveis de corrente, se referindo às três fases que alimentam um equipamento trifásico.

Como a aquisição de tensão e corrente é feita de forma instantânea, é possível obter valores de potência instantânea demandada pelo equipamento; porém, o monitoramento desejado é sobre a potência ativa, estimada a partir da potência média [9]. A valor da potência ativa é obtido aplicando a Equação 1.

$$P_i = U \cdot I \quad (1)$$

Na Equação 1, U é o valor instantâneo de tensão, I é o valor instantâneo de corrente em uma determinada medida i. A energia  $E_i$  consumida ou fornecida pela carga durante o intervalo de amostragem na medida i é dada pela equação 2.

$$E_i = P_i \cdot \Delta t \quad (2)$$

Onde o intervalo de tempo entre duas amostras. Portanto, a energia total consumida pela carga será dada pela Equação 3.

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (3)$$

Onde N é o número total de amostras.

Para obter os valores médios de tensão e corrente o programa gravado no módulo sensor faz quinhentas leituras do sinal analógico de tensão e corrente, calcula a média e aplica a Equação 1 para cada fase da alimentação do equipamento. Esses valores são transmitidos para o módulo base, constantemente, onde são encaminhados para a unidade computacional que pode armazená-las em um banco de dados para que possa ser feita uma análise aprofundada e definir ações para reduzir os gastos e evitar possíveis paradas no processo produtivo.

A Figura 6 apresenta os processos executados desde a aquisição dos níveis de tensão e corrente até o recebimento dos valores pela unidade computacional ligada à base.

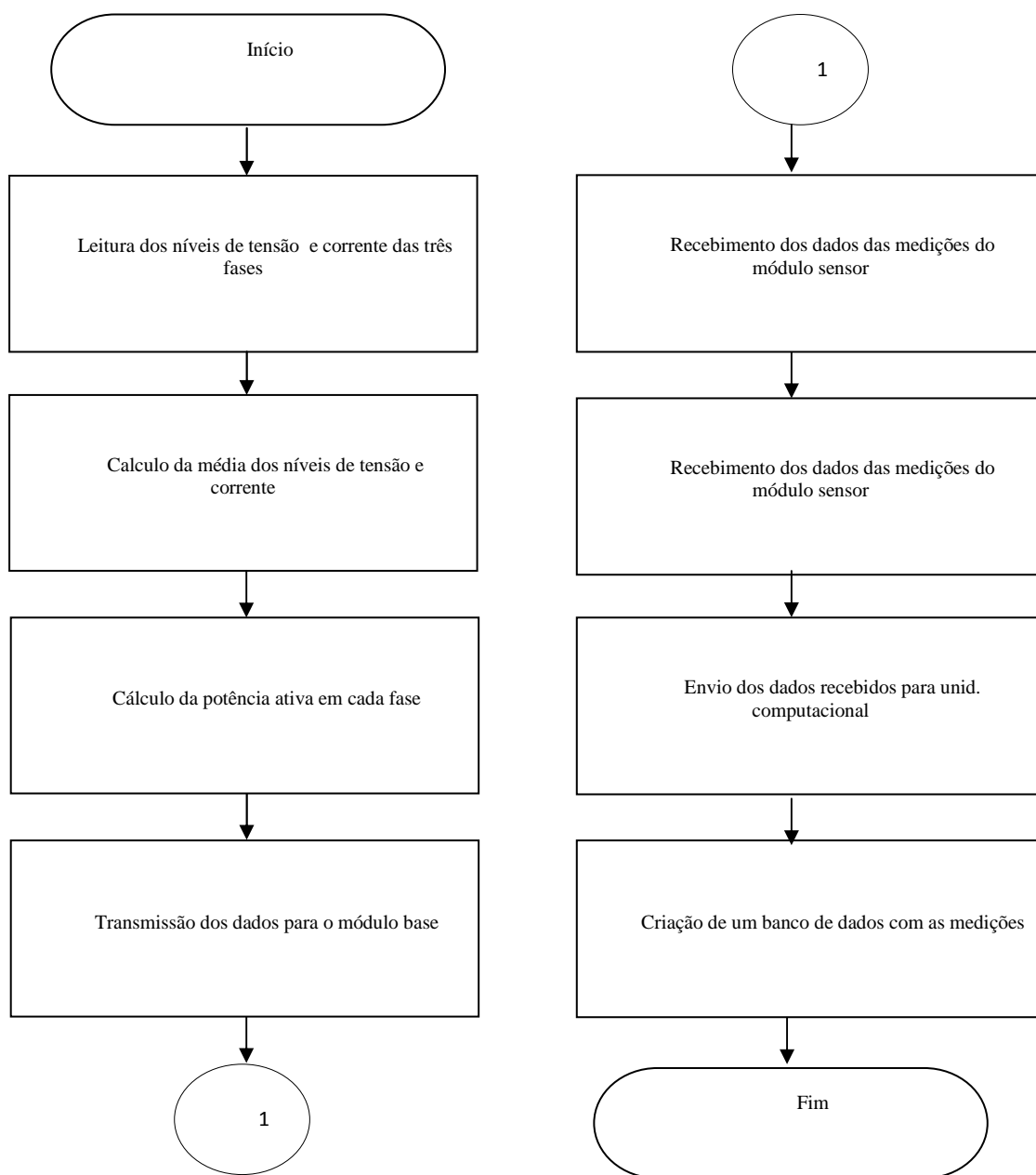


Figura 6. Processos comandados por software

#### **d) Discussões e Conclusão**

A idéia da construção deste dispositivo tem uma abordagem que abrange áreas de apontamento de custos industriais de produção e de manutenção, pontos críticos no processo produtivo. A energia elétrica compõe os custos de produção de forma quase que indireta, por rateio, pois não há hoje meios de medir consumos individuais das máquinas e por operação, o que causaria inclusive uma aumento de custo de estrutura de uma empresa industrial. A proposta deste artigo visa racionalizar a leitura do consumo com um medidor de uma determinada máquina produtiva, visando dois pontos primordiais:

- O consumo por operação em um processo produtivo (um produto pode ter em seu processo de fabricação várias operações e passar por várias máquinas, até seu acabamento e conclusão).
- Obter uma visão do estado geral da máquina comparando seu consumo nominal (especificado pelo fabricante e seu consumo real) podendo, assim, apontar discrepâncias de funcionamento operacional.

Esta abordagem pode trazer as seguintes estratégias para utilização do dispositivo:

- Mobilidade dentro do chão de fábrica. Por não ser necessário cabeamento, transmissão dos dados via radio freqüência, pode-se ter acessos a pontos dentro de um ambiente fabril que ofereceriam dificuldades para passagem de cabos, permitindo que praticamente qualquer máquina possa ser monitorada. Ainda pode-se citar aqui que, com a mobilidade, pode-se monitorar máquinas em intervalos de tempo mudando o sensor quando a medição for completada dentro do período estabelecido.
- Leitura de consumo direto, permitindo uma visualização do peso do custo da energia elétrica na etapa de fabricação da peça, sem que haja uma distorção no cálculo do custo devido aos tradicionais rateios de consumo entre máquinas produtivas ou total de energia consumida na produção (de forma global)
- Comparação entre consumo nominal especificado pelo fabricante ou quando a máquina é construída na própria empresa e o consumo real. Isto pode identificar dois fatores, que se não houver medição, passam despercebidos:
  - Máquinas com componentes substituídos fora de especificação que podem gerar excesso de consumo
  - Máquinas com componentes defeituosos ou desgastados (correias, polias, mancais, etc..) podem ser identificadas pela leitura de consumo

Sob o aspecto da implementação do dispositivo em ambiente industrial há o aspecto do ruído eletromagnético presente no chão de fábrica. A proposta é abordar duas estratégias para minimizar os efeitos do ruído:

- Aumentar a potência de transmissão para aumentar a relação sinal ruído.

- Antenas no sensor e base para direcionar a transmissão e com isto conseguir distâncias maiores dentro do ambiente.

## e) Referências

[1]IEEE, “IEEE STANDARDS ASSOCIATION, IEEE 802.15™: WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS (PANs)”, <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>, Mar 26, 2012

[2]ANDY CHOI, “Research and Markets Adds Reports on Wireless Sensor Network Technology. A report titled ‘WTRS Wireless Sensor Network Technology Trends Q1 2012 – Subscription’ has been added by Research and Markets to its offering”. AZOSENSORS.COM Published on March 28, 2012 at 3:03 AM, <http://www.azosensors.com/news.aspx?newsID=4000>, Mar 26, 2012

[3]REPORTLINKER, “Smart Grid Networking and Communications, MARKETWATCH”, Published on March 22, 2012, 7:36 a.m. EDT, <http://www.marketwatch.com/story/smart-grid-networking-and-communications-2012-03-22>, Mar 27, 2012.

[4]RADIUINO, “Sobre o Rádiuino”, <http://radiuino.cc/node/8>, Mar 27, 2012.

[5]RADIOIT, “Módulo RFBee V1.1”, <http://www.radioit.com.br/products/rfbee>, Mar 27, 2012.

[6]JOHN BOXALL, “RF Wireless Data with the Seeedstudio RFBee”, TRONIXSTUFF.COM, Published on March 19, 2012, 2:10 a.m., <http://tronixstuffads.blogspot.com.br/2012/03/rf-wireless-data-with-seeedstudio-rfbee.html>, Mar 26, 2012.

[7]WWW.ALDDATASHEET.COM, “ATMEGA168 - 8-bit Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash -ATMEL Corporation”, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/257015/ATMEL/ATMEGA168.html>, Mar 26, 2012.

[8] WWW.ALDDATASHEET.COM, “CC1101 - Low-Cost Low-Power Sub-1GHz RF Transceiver - Texas Instruments”, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/191432/TI/CC1101.html>, Mar 26, 2012

[9]Mário Ferreira Alves, “ABC dos Circuitos Eléctricos em Corrente Alternada”, Instituto Politécnico do Porto, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Fevereiro de 1999, [http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/PubDid/ABC\\_CECA.PDF](http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/PubDid/ABC_CECA.PDF), August,15,2012.

.

## f) Contatos

Edson Taira Procopio, aluno do curso de mestrado profissional da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. e-mail: [ed\\_taira@hotmail.com](mailto:ed_taira@hotmail.com) / [edsontaira@yahoo.com.br](mailto:edsontaira@yahoo.com.br); celular: (19) 9798 2776

Jose Luís Pagotto, aluno do curso de mestrado profissional da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. e-mail: [pagotto.jl@gmail.com](mailto:pagotto.jl@gmail.com); celular: (19) 9151 0562

Alexandre Mota e Lia Mota são docentes permanentes e pesquisadores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Campinas.

Emails: [amota@puc-campinas.edu.br](mailto:amota@puc-campinas.edu.br); [lia.mota@puc-campinas.edu.br](mailto:lia.mota@puc-campinas.edu.br)