

# Implementação de uma rede *ad-hoc* para medição do consumo de eletricidade

Henrique Zenoni Machado<sup>1</sup>, Fernando Akel<sup>2</sup>, Vóldi Costa Zambenedetti<sup>3</sup>, Carlos Marcelo Pedroso<sup>4</sup>

---

## Resumo:

Neste artigo é apresentado o projeto de um sistema de tele-medição de consumo de energia elétrica utilizando-se uma rede *ad-hoc*, que apresenta vantagens sobre as abordagens convencionais disponíveis. Foi utilizado o padrão IEEE 802.15 (Zigbee) para a implementação da rede, com benefícios em termos da independência da solução em relação aos dispositivos de transmissão.

## 1 Introdução

O sistema ARCE (Acompanhamento Remoto de Consumo de Energia) tem como motivação a resolução de problemas na coleta dos dados das medições de consumo de energia elétrica pelas concessionárias. Os problemas encontrados pelas concessionárias de energia elétrica que motivam este projeto são os seguintes:

- Obstrução de medidores;
- Fraude por furto de energia elétrica;
- Redução dos custos de leitura.

O sistema ARCE consiste da integração de um módulo de comunicação de rádio frequência aos medidores de consumo do grupo B (onde se encontram a maioria dos consumidores). Neste módulo, através de uma rede *ad-hoc*, será realizada a comunicação entre os medidores, de forma que as informações disponíveis em cada medidor sejam transmitidas pelos nós até um módulo que irá concentrar as informações, denominado de módulo coordenador. As informações permanecem no módulo coordenador até que sejam transferidos para o módulo de captura, também via rádio.

Através de um monitoramento mais eficaz e contínuo dos medidores de consumo de energia elétrica é possível otimizar o custo de operação das concessionárias de energia elétrica, bem como reduzir o impacto de fraudes nos medidores. Um dos requisitos básicos do sistema é o baixo custo de implementação e de manutenção.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. A seção 2 mostra a configuração atual dos sistemas de medição de consumo de eletricidade em uso no Brasil e seus principais problemas. A seção 3 apresenta os conceitos básicos sobre redes *ad-hoc*, enquanto a seção 4 detalha o projeto do hardware e a seção 5 apresenta o projeto do software do

---

<sup>1</sup> Henrique Zenoni Machado é Engenheiro de Computação pela PUCPR.

<sup>2</sup> Fernando Akel é Engenheiro de Computação pela PUCPR.

<sup>3</sup> Vóldi Costa Zambenedetti, doutor em Engenharia Elétrica, é professor atuando na PUCPR e pesquisador do LACTEC.

<sup>4</sup> Carlos Marcelo Pedroso, doutor em Engenharia Elétrica, é professor atuando PUCPR e na UFPR.

sistema. Finalmente os resultados obtidos são apresentados na seção 6 e as conclusões na seção 7.

## 2 Cenário Atual

Atualmente encontram-se no mercado, a disposição das concessionárias e empresas que prestam serviço de fornecimento de energia, inúmeras soluções para se fazer a telemedição de consumo de energia elétrica, que entretanto se restringem as algumas poucas topologias e tecnologias. o sistema ARCE utiliza recursos comuns a muitas das soluções existentes, mas com uma topologia de rede *ad-hoc*, que proporciona vantagens adicionais se comparada aquelas já em uso no mercado.

A obstrução de medidores traz às concessionárias um grande prejuízo financeiro, visto que conforme a legislação vigente, nos casos onde não é impossível a leitura dos medidores deve ser cobrado do usuário uma tarifa fixa mínima. Se esta impossibilidade se repetir por 3 meses consecutivos, a concessionária será impedida de efetuar o reajuste das cobranças indevidas, mesmo que observada cobrança inferior ao consumo, conforme previsto na resolução 456 da ANEEL, de 29 de novembro de 2000 [[Abdo 2000](#)] ressalvo casos em que a concessionária efetue cobranças superior ao consumo.

Aliado às dificuldades de obstrução também são utilizados diversos artifícios para fraudar o sistema de medição, obviamente ilegais e muito difíceis de descobrir. A fraude de energia elétrica dada por furto é prevista em lei segundo o código penal em vigor [[Brasil 1940](#)]. As fraudes mais comuns são o travamento do disco do medidor, a alteração do mecanismo do medidor com anterior rompimento do lacre, o furto rústico de energia elétrica, dado por seu furto diretamente obtido do poste ou elemento ativo da rede elétrica de propriedade da concessionária.

Em [[VIDINICH 2005](#)], R. Vidinich estima que o volume de perda corresponde a 17% de todo o consumo brasileiro, correspondendo à 7.428.000 MWh, também aponta que segundo a ANEEL, somando as perdas das 59 concessionárias de energia elétrica de todo o Brasil as perdas decorrentes de fraude atingem a incrível marca de R\$ 1,7 bilhões ao ano e os gastos para controle e minimização destas perdas estão estimados em R\$ 2,3 bilhões ao ano, somados as perdas da fraude chegam a R\$ 3,5 bilhões ao ano. Além disso, devem ser considerados os custos do sistema de tarifação que normalmente utiliza equipes técnicas que realizam a leitura e aferição dos dados dos equipamentos de medição.

O sistema ARCE apresenta uma alternativa para leitura dos dados contidos nos medidores através transmissão via rádio com os elementos conectados em uma rede *ad-hoc*, facilitando a leitura de dispositivos com problemas de acesso. Além disso, será possível detectar as fraudes de modo mais simples através de rompimento de lacre nos medidores. Um pequeno módulo acoplado ao medidor traduz os dados obtidos do mesmo e envia para a rede compreendida por módulos de igual função e finalidade. Cada módulo deve então obter dados dos medidores, enviá-los à rede e repassar as mensagens recebidas de outros módulos até que estas mensagens cheguem ao módulo coordenador.

### 3 Redes sem fio *ad-hoc*

Uma rede *ad-hoc* é uma rede rádio descentralizada. A rede é *ad-hoc* porque cada nó é capaz de encaminhar dados através de outros nós, de forma que a determinação de quais nós devem fazer o encaminhamento é realizada dinamicamente baseada na conectividade da rede [[Gupta e Kumar 2000](#)] [[Held 2001](#)]. Em uma rede cabeada apenas os roteadores realizam o encaminhamento de pacotes até o destino final da mensagem.

O uso de uma rede *ad-hoc* possui as seguintes vantagens no problema em questão:

- A potência do sinal pode ser baixa, uma vez que não é necessário realizar uma transmissão para um nó central normalmente situado a uma grande distância;
- O tempo de vida das baterias que alimentam o sistema será grande, pelo mesmo motivo do item anterior;
- A leitura pode ser realizada em um ponto único e engloba diversos medidores que não necessariamente estão no alcance direto do elemento coordenador;
- Não é necessário utilizar cabos.

Uma das tecnologias mais promissoras disponíveis para implementação de redes *ad-hoc* é o padrão IEEE 802.15 (Zigbee) [[IEEE 2005](#)]. A tecnologia oferece taxas de transmissão pequenas com baixo consumo e baixo custo. O protocolo é compatível com os padrões de redes locais do IEEE. O alcance estimado de transmissão é de 10 a 100 metros, dependendo das condições do ambiente. A taxa de transmissão pode ser escolhida entre 20Kbps (868MHz), 40Kbps (915MHz) e 250Kbps (2.4GHz), onde as menores taxas apresentam também menor consumo de energia. Como os demais padrões do IEEE para redes, a especificação concentra-se nas camadas física e de enlace, permitindo que vários fabricantes forneçam soluções compatíveis com o padrão.

O IEEE 802.15 foi escolhido para ser aplicado no sistema ARCE devido as características mencionadas e também devido à capacidade de conexão de seus nós em uma configuração de rede *ad-hoc* auto-configurável, de forma que a aplicação não terá que preocupar-se com as questões envolvidas na transmissão de dados em si. O Zigbee define 3 tipos de elemento de rede:

- Coordenador: é o nó mais capaz, sendo o elemento raiz da rede e pode realizar a interface para outras redes. Em cada rede, existe apenas um coordenador, que é capaz de armazenar informações sobre a rede, agindo como repositório central.
- End-devices: contém funcionalidade suficiente para encaminhar mensagens para o seu nó pai, que pode ser o coordenador ou um roteador. Este é o nó que apresenta um menor consumo e requer a menor quantidade de memória.
- Roteador: um nó capaz de agir como um nó intermediário entre o *end-device* e outro elemento, permitindo o encaminhamento de mensagens na direção do coordenador.

Neste projeto, um elemento conectado a um medidor irá agir como um *end-device*. Um elemento coordenador irá concentrar as mensagens dos nós de uma região (por exemplo, uma quadra), de onde serão realizadas as leituras. Quando não for possível realizar a transmissão diretamente entre o *end-device* e o coordenador, um conjunto de *end-devices* serão habilitados também como roteador.

Para a montagem do protótipo foi escolhido o microprocessador MSP430, fabricado pela Texas Instruments, que apresenta baixo consumo e uma solução integrada para programação, aliado a um bom suporte em termos de documentação e apoio técnico.

## 4 Projeto do Hardware

A Figura 1 mostra uma visão geral dos módulos do sistema ARCE, com suas interações. Podem ser identificados os sensores de pulsos, de energia, de laçre e nível de bateria, que se conectam ao hardware de captura, este último um sistema microprocessado.

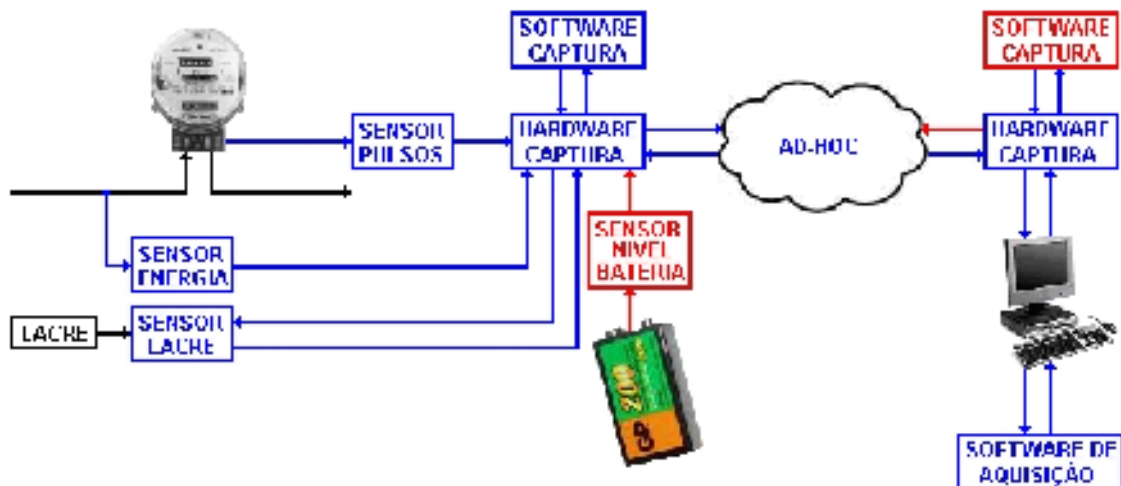


Figura 1: Diagrama de blocos com os principais componentes do sistema ARCE

### 4.1 Sensor de Pulsos

O sensor foi projetado exclusivamente para uso em aplicações com medidores do tipo 2 fios. Conforme dados da Companhia Paranaense de Energia, não se utilizam mais medidores com 4 fios. Na Figura 2 pode ser observada que a entrada do medidor 2 fios recebe alimentação direta da fonte 12 Volts, este é um periférico que não deverá ter consumo quando não houver fase. Sendo assim, o sinal de pulso do medidor oscilará entre GND e Vcc, sendo necessária a presença do diodo zener de 2.8V, responsável por travar o sinal do pulso em um nível de tensão que não danifique a porta do MSP430. A presença do resistor  $R_1$  é fundamental para que o hardware não tenha um consumo excessivo, sendo este responsável pela corrente que irá comutar a porta do MSP430, esta corrente é fixada por  $V_{cc}/R_1 = I_{corrente\_de\_comutação}$ .

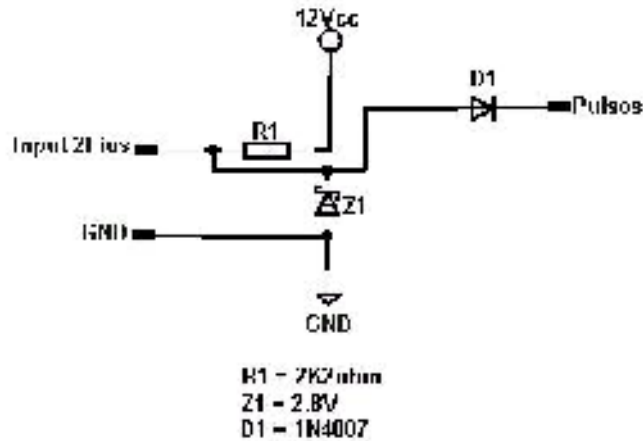


Figura 2: Diagrama elétrico para o sensor de pulsos

## 4.2 Sensor de Lacre

Este circuito consiste basicamente em um limitador de corrente para diminuir o consumo de todo o projeto como um todo e um limitador de tensão para que a resposta seja repassada direta ao módulo Zigbee. É previsto a inclusão de um resistor com valor a ser definido, para limitar a corrente. Em série ao resistor será plugado um sensor de porta "normalmente aberto", conforme mostrado pela Figura 3. É importante enfatizar que o resistor ligado ao coletor do transistor assim como no sensor de pulsos é responsável pelo consumo deste periférico. A alimentação deste periférico é diferente da entrada de pulsos, pois este deverá permanecer em funcionamento enquanto não houver fase.

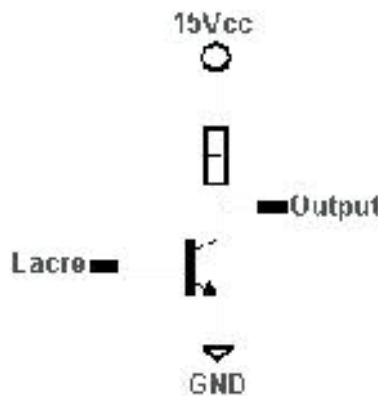


Figura 3: Diagrama elétrico para o sensor de pulsos

## 4.3 Módulo bateria

Este módulo tem por finalidade manter o nível da bateria enquanto os reguladores do módulo de energia estiverem alimentados. Quando da não alimentação dos reguladores, é função deste módulo alimentar os periféricos que devem permanecer acionados quando da falta de fase. O diagrama elétrico do módulo é apresentado na Figura 4.

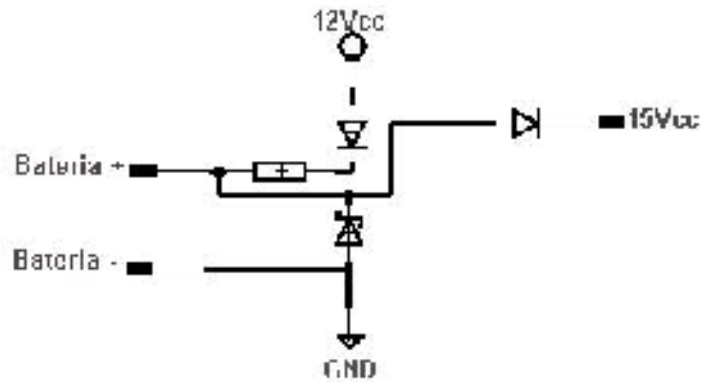


Figura 4: Diagrama elétrico módulo de carregamento de bateria

Um cuidado pertinente ao carregamento da bateria é a correta regulagem do resistor para que a corrente de alimentação da bateria seja ideal para seu carregamento, se for muito pequena, a bateria pode não carregar ou levar um tempo muito longo em seu carregamento, alguns testes em laboratório revelaram que o carregamento pode levar até 3 dias com baixa corrente, por outro lado uma corrente muito elevada considerando que o diodo zener seja maior que o nível da bateria pode ocorrer a danificação das células internas da mesma. Um nível ideal encontrado em laboratório foi de aproximadamente 100mA para o carregamento.

O Barramento de conexões tem por finalidade interfacear o módulo Zigbee com os diversos sensores. O esquemático é apresentado na Figura 5.

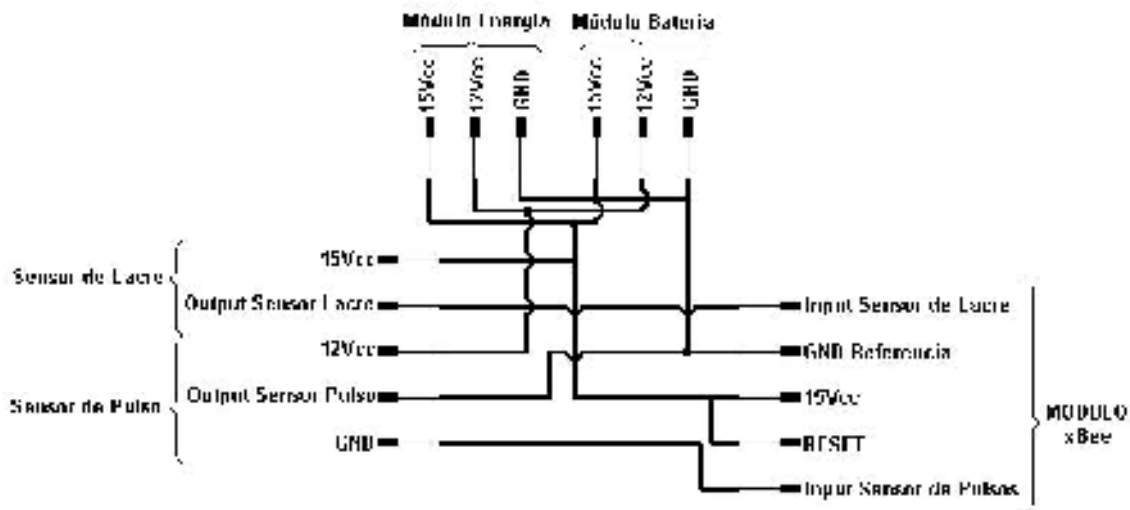


Figura 5: Diagrama elétrico do barramento para conexões dos elementos

#### 4.4 Módulo de Energia

O módulo energia é um conversor de tensão alternada para tensão contínua, ficando ainda com a responsabilidade de verificar da existência ou não de tensão na fase do medidor que alimenta o hardware de captura. Uma etapa importante deste hardware é da atenuação do ripple com o uso calculado do capacitor mostrado na Figura 6. Como

forma de assegurar que a corrente e/ou a tensão não danifiquem o hardware, este módulo deve filtrar qualquer pico proveniente da rede elétrica.

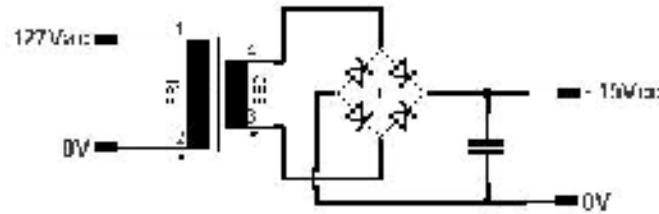


Figura 6: Diagrama elétrico do módulo de energia

O diagrama final do hardware do sistema é mostrado na Figura 7.

## 5 Projeto do Software e Protocolo

O software será descrito de acordo com cada item de excitação, sendo este responsável reportar a ocorrência de determinados eventos ocorridos em um *end-device* ao coordenador. As questões relativas ao encaminhamento das mensagens na rede *ad-hoc* serão resolvidos pelo padrão Zigbee. Os eventos a serem tratados são detalhados a seguir.

### 5.1 Eventos do software do End-Device

**EVENTO PULSO:** Originado pelo sensor de pulsos, este evento ocorre devido a uma modificação na entrada disponível para PULSO, deve ser acrescido ao contador de pulsos uma unidade para cada pulso recebido.

**EVENTO LACRE** Originado pelo sensor de lacre, este evento ocorre devido a uma modificação na entrada disponível para LACRE, deve ser criada uma mensagem contendo a informação de que o lacre foi aberto ou fechado conforme nível lógico do sensor.

**EVENTO TEMPO DE MEMÓRIA DE MASSA** Origem interna, este evento ocorre devido ao estouro de timer responsável por informar o momento correto de fechamento de memória de massa, o contador responsável por armazenar o número de pulsos é salvo como sendo uma unidade de memória de massa e o contador deverá ser zerado.

**EVENTO TEMPO DE ENVIO DE MENSAGEM** Origem interna, este evento ocorre de forma temporizada e indica o momento para transmissão de uma mensagem contendo as leituras realizadas. Uma vez transmitida a mensagem, o contador de pulsos deve ser zerado.

**EVENTO CHEGADA DE MENSAGEM** Origem externa, este evento decorre do recebimento de uma mensagem, proveniente de outro módulo de captura, esta mensagem deve ser simplesmente re-encaminhada para a rede ad-hoc.

### 5.2 Eventos do software no elemento coordenador

O software coordenador difere do software dos *end-devices*. No entanto, ele também comporta-se como um *end-device*, estando conectado a um medidor de energia, com a exceção do evento CHEGADA DE MENSAGEM, que deve ser processado de maneira diversa.

**EVENTO CHEGADA DE MENSAGEM** Origem externa, este evento decorre do recebimento de uma mensagem, proveniente de outro módulo de captura, esta mensagem deverá ser armazenada.

**EVENTO PEDIDO DE DESCARREGAR MENSAGENS ARMAZENADAS** Origem externa, este evento decorre da requisição por intermédio de uma conexão física com um computador, este contendo o software de aquisição que fará o pedido de descarregar mensagens armazenadas. Todas as mensagens serão repassadas a este computador e posteriormente as mensagens serão processadas.

### 5.3 Eventos do software de aquisição

Os estímulos e sinais que serão enviados para o software de aquisição, que estará rodando em um computador portátil, serão:

- Pulsos capturados em cada um dos *end-devices* na rede do coordenador;
- Monitoramento do laço.

Adicionalmente, o software de aquisição também possui uma interface Zigbee para realizar a transferência das mensagens. O software de aquisição envia um *PEDIDO DE DESCARREGAR MENSAGENS ARMAZENADAS* ao coordenador e recebe todas as mensagens por ele armazenadas.

## 6 Resultados Obtidos

A seleção do padrão IEEE 802.15 para a implementação do projeto de tele-medição do consumo de energia elétrica em uma rede *ad-hoc* mostrou-se bastante promissora, principalmente devido ao baixo custo de implementação e baixo consumo de operação. A transmissão utilizando rádio frequência proporciona flexibilidade de instalação e redução de gastos devido a não utilização de cabos e o baixo consumo de operação tão exigido pelas concessionárias de energia elétrica. A solução apresentou boa resposta em termos de confiabilidade, segurança e escalabilidade, reduzindo os custos de implantação e facilitando o processo de instalação. Adicionados a estes temos ainda a interoperabilidade entre diferentes fabricantes de dispositivos Zigbee.

Entre possíveis utilizadores deste sistema estão as concessionárias de energia elétrica, empresas de aluguel de galpões, visto que a cobrança da energia é feito em separado para cada galpão e usuários de energia elétrica com fins de verificação de faturamento emitidos pelas concessionárias. Daqueles com que já houve um primeiro contato, mostraram-se interessados as empresas COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica) e CEMIG (Concessionária Energética de Minas Gerais).

O protótipo do sistema foi desenvolvido utilizando os kits de desenvolvimento para o MSP430 CC2480, [[INSTRUMENTS 2008b](#)] e [[INSTRUMENTS 2008a](#)],



comercializados pela Texas Instruments, que possuem um valor um pouco elevado (em torno de U\$100,00). Esses kits foram escolhidos para possibilitar o desenvolvimento do protótipo em um tempo relativamente curto - esses kits possuem diversos módulos prontos, restando o desenvolvimento da programação embarcada e sistema de hardware de suporte. Uma possível alternativa comercialmente viável seria utilizar um módulo ZigBee conectado a um microcontrolador de baixo custo (como por exemplo, o Peripheral Interface Controller, PIC, fabricado pela Microchip Technology) e o custo total do sistema poderia ser reduzido drasticamente. O custo estimado neste caso é de em torno de R\$50,00 para o sistema completo.

No protótipo, um *end-device* pode ser transformado em roteador através de uma chave manual, o que torna um pouco mais complexa a tarefa de configuração dos dispositivos. Pode ser mais interessante do ponto de vista de manutenção e instalação que todos os elementos sejam configurados como roteador e *end-devices* de modo simultâneo. Também percebeu-se a necessidade de um módulo de software que permita a atualização do software de maneira remota, através do software de aquisição, facilitando a manutenção do sistema.

O código do sistema de controle das informações recebidas dos módulos RF foi escrito na linguagem C Sharp (C#). Essa linguagem foi escolhida por se tratar de uma linguagem de programação que possui uma boa relação com bancos de dados e com aplicações *Web*, o que abre um grande leque de possíveis futuras aplicações do sistema.

## 7 Conclusões e Trabalhos Futuros

O sistema de Acompanhamento Remoto de Consumo de Energia, proposto neste artigo, mostrou-se viável tecnicamente, principalmente devido a aplicação do padrão IEEE 802.15 em uma rede *ad-hoc*. A implementação do protótipo confirmou o baixo consumo da solução e a escalabilidade da solução. Também pode ser previsto que o sistema possa ser fornecido a um baixo custo caso seja produzido em larga escala.

Seria muito interessante especificar um padrão nacional para a implementação destes sistemas de tele-medição utilizando redes *ad-hoc*, de forma a possibilitar que diversos fabricantes forneçam a solução para as operadoras, diminuindo os custos de implementação e manutenção da solução.

Adicionalmente, o sistema pode ser utilizado em outras aplicações. O sistema proposto, com pequenas modificações, poderia ser utilizado também para medição de consumo de água.

## 8 Bibliografia

Abdo 2000

Abdo, J. M. (2000).

Decreto-lei 456.

ANEL, Agência Nacional de Energia Elétrica.

Brasil 1940

Brasil (1940).  
Código penal. decreto-lei 2.848.

Gupta e Kumar 2000

Gupta, P. e Kumar, P. R. (2000).  
The capacity of wireless networks.  
*Information Theory, IEEE Transactions on*, 46(2):388-404.

Held 2001

Held, G. (2001).  
*Data Over Wireless Networks Bluetooth, WAP Wireless LANs*.  
McGraw-Hill, 1 edition.

IEEE 2005

Institute of Electrical and Electronic Engineers (2005).  
IEEE 802.15.1-2005 IEEE standard for information technology.

INSTRUMENTS 2008a

INSTRUMENTS, TEXAS. (2008a).  
Sensor monitor user's guide (rev. b), ez430-rf2480.  
Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ug/swru157b/swru157b.pdf>.

INSTRUMENTS 2008b

INSTRUMENTS, TEXAS. (2008b).  
Z-accel 2.4 ghz zigbee processor cc2480.  
Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2480a1.pdf>.

VIDINICH 2005

VIDINICH, R. (2005).  
Furto de energia e suas conseqüências.  
In *VII Encontro Nacional de Conselhos de Consumidores de Energia Elétrica*.

---

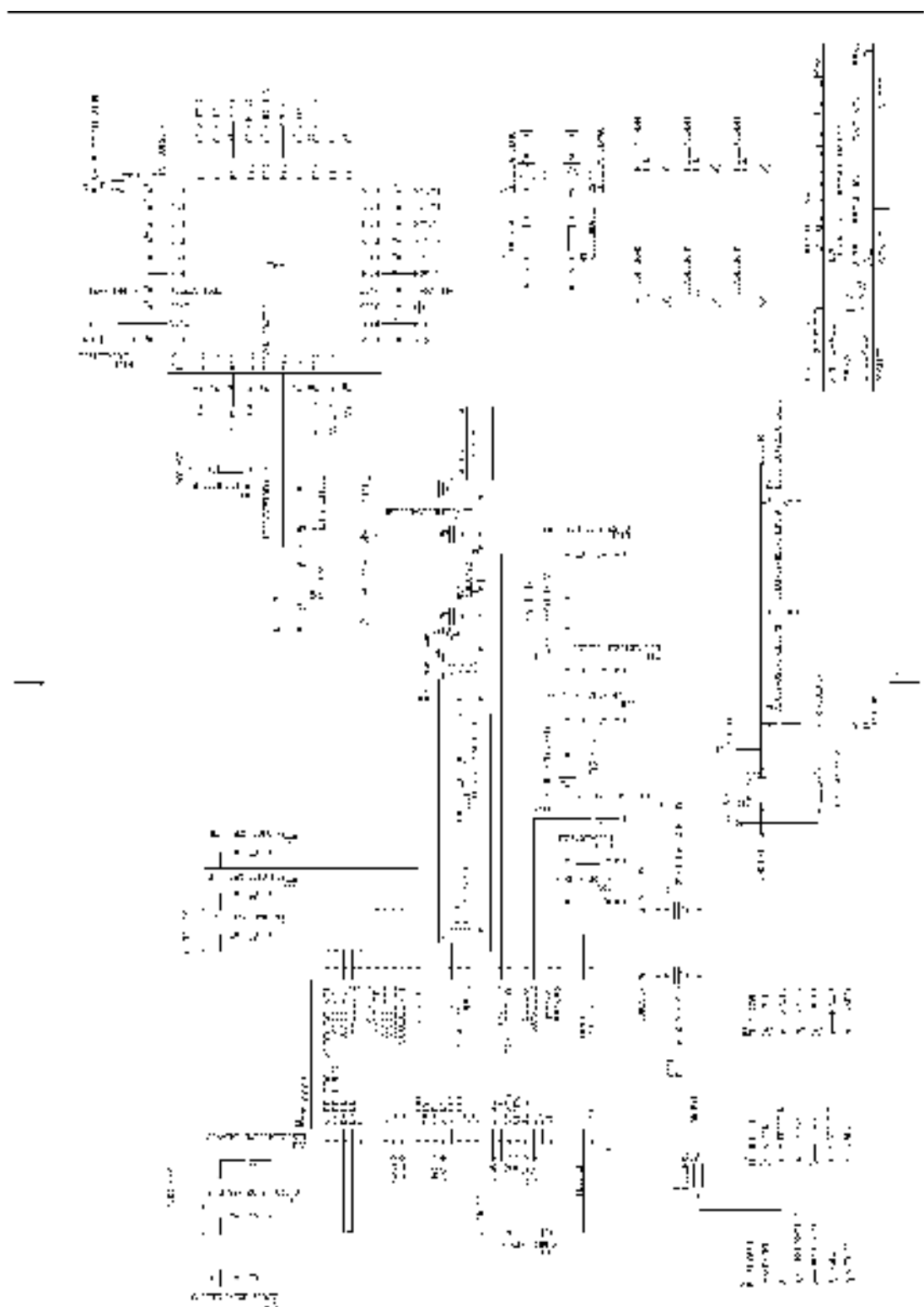


Figura 7: Diagrama elétrico do hardware