



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ATUALIZAÇÃO DO FISCALIZADOR DE CORRENTE AUTOMONITORADO
DESENVOLVIDO NO CEPEL

Eric Pereira Silva de Oliveira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro

Orientador: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

ATUALIZAÇÃO DO FISCALIZADOR DE CORRENTE AUTOMONITORADO
DESENVOLVIDO NO CEPEL

Eric Pereira Silva de Oliveira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Examinado por:

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, D.Sc.

Prof. Ramon Romankevicius Costa, D.Sc.

Prof. Afonso Celso Del Nero Gomes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2017

Oliveira, Eric Pereira Silva de

Atualização do Fiscalizador de Corrente Automonitorado desenvolvido no Cepel/Eric Pereira Silva de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2017.

XV, 45 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia de Controle e Automação, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 43 – 44.

1. Fiscalizador de Corrente. 2. Microcontrolador. 3. CC2530. 4. Ah. 5. IEEE 802.15.4. I. Pedroza, Aloysio de Castro Pinto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

*“Todo progresso acontece fora da zona de conforto”
– Michael John Bobak.*

Agradecimentos

Agradeço a meus pais por me incentivarem em meus estudos e pelo suporte e fornecimento das condições necessárias para atingir o sucesso em todas as etapas da minha vida. E a meu pai por despertar meu interesse pelas ciências exatas.

Gostaria de agradecer a todos os meus colegas do Cepel por me apoiarem, retirarem minhas dúvidas quanto ao funcionamento do fiscalizador de corrente e ajudarem na montagem do protótipo do fiscalizador. Principalmente aos meus orientadores no estágio, Fernando da Cunha Luiz e José Eduardo da Rocha Alves Junior pelo auxílio na revisão deste projeto.

Agradeço também aos meu orientador Aloysio de Castro Pinto Pedroza pela orientação na montagem da estrutura deste projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao corpo docente do curso de engenharia de controle e automação como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

ATUALIZAÇÃO DO FISCALIZADOR DE CORRENTE AUTOMONITORADO DESENVOLVIDO NO CEPEL

Eric Pereira Silva de Oliveira

Fevereiro/2017

Orientador: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Programa: Engenharia de Controle e Automação

O Sistema Elétrico apresenta o problema de perdas não técnicas, dentre as quais, está o furto de energia. No Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) do grupo Eletrobras, um sistema de fiscalização embarcado foi projetado para a medida indireta da corrente em transformadores de corrente operando em faixas compatíveis com o consumo comercial. O Fiscalizador de Corrente Automonitorado (FCAM) visa auxiliar o combate a estas perdas não técnicas de energia.

O protótipo atual do fiscalizador faz uso de um microcontrolador *Holtek* ligado a um módulo de rádio frequência XBee da *Digi Instruments*. As leituras de corrente passam por um filtro de média móvel e são integradas para se determinar o valor de Ah consumido para que este possa ser comparado com o valor medido pela concessionária. A contribuição do trabalho apresentado está no desenvolvimento de uma versão atualizada que faça uso do SOC (System on a Chip) CC2530 da *Texas Instruments*, que apresenta um módulo de rádio integrado, na substituição da unidade de processamento e do módulo de rádio do projeto anterior. Com isso, busca-se a redução do consumo de energia do projeto e a economia de recursos na criação de um modelo menor e mais eficiente.

Abstract of Qualifying Exam presented to the teaching body of control and automation engineering course from POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Control and Automation Engineer.

UPDATE OF THE SELF-MONITORED CURRENT WATCHDOG
DEVELOPED IN CEPTEL

Eric Pereira Silva de Oliveira

February/2017

Advisor: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Department: Control and Automation Engineering

The Electric System exhibit the problem of non-technical losses, among which is the theft of energy. At the Electrical Energy Research Center (Cepel) from the Eletrobras group, an embedded fiscalization system has been projected for the indirect measure of current in current transformers operating in ranges compatible with commercial consumption. The Self-Monitored Current Watchdog (FCAM) aims to aid on the fight against these non-technical energy losses.

The current prototype makes use of a *Holtek* microcontroller connected to a XBee radio frequency module from *Digi Instruments*. The current readings go through a moving average filter and are integrated to get the consumed Ah value so that it can be compared to the value measured by the utility. The contribution of the paper presented is in the development of an updated version that makes use of the *Texas Instruments* CC2530 SOC (System on a Chip), which features an embedded radio module, to replace the processing unit and radio module from the previous project. With this, we seek to reduce the project's power consumption and save resources in the creation of a smaller and more efficient design.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviaturas e Nomenclaturas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Projeto TCAM/FCAM	1
1.3 Proposta	2
1.4 Roteiro do Trabalho	3
2 Conceitos Básicos	4
2.1 Transformadores para Instrumentos	4
2.1.1 Transformadores de Corrente	5
2.2 Medida em Ampere-hora RMS	7
2.3 Funcionamento do Sistema de Medição Ah do FCAM	8
2.4 Comunicação serial	9
2.4.1 Interface Síncrona SPI	10
2.4.2 Interface Serial Assíncrona	11
2.5 Transmissão em radiofrequência	13
2.5.1 Módulo XBee	13
2.5.2 Padrão IEEE 802.15.4	14
2.5.3 Método CSMA-CA	14
2.5.4 Padrão de Cabeçalho Proprietário do Projeto	15
2.6 Comparação de tecnologias	16
2.7 Considerações Finais	17
3 Descrição do Projeto	18
3.1 Configuração de <i>Hardware</i> do Projeto Proposto	18
3.2 <i>Softwares</i> Usados no Desenvolvimento do Projeto	23
3.2.1 Ambiente de Desenvolvimento	23
3.2.2 Programa de Coleta de Dados	23
3.2.3 Programa de Aferição Desenvolvido no Cepel	23
3.3 Implementação de Interoperabilidade	24
3.4 Descrição do Algoritmo do FCAM	26

3.4.1	Método de Integração	26
3.4.2	Inicialização	27
3.4.3	Operação acima de 2,7V	29
3.4.4	Operação abaixo de 2,7V	30
3.5	Considerações Finais	30
4	Resultados Experimentais	32
4.1	Metodologia	32
4.2	Realização dos Experimentos	33
4.3	Observações dos Resultados Experimentais	41
5	Conclusões	42
	Referências Bibliográficas	43
A	Fluxograma do Algoritmo	45

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de um TC (retirados de [4]).	4
2.2	Tipos de TCs segundo sua construção (retirados de [4]).	5
2.3	Relação entre a corrente de excitação I_e e a corrente primária I_p de um TC (retirado de [4]).	6
2.4	Diagrama do sistema de fiscalização FCAM.	9
2.5	Interpretação da comunicação SPI como dois registradores deslocadores de bit (inspirado em [5]).	10
2.6	Esquema de conexão SPI da MCU com seus periféricos.	11
2.7	Foto da interface óptica do protótipo do FCAM com fonte auxiliar por meio de um indutor de meio núcleo.	12
2.8	Transmissão de dados por uma interface assíncrona.	12
2.9	Visão esquemática da estrutura de comando MAC e do pacote PHY de transmissão de dados (traduzido de [6]).	14
2.10	Ilustração da rotina do algoritmo CSMA-CA (adaptado de [7]).	15
3.1	Foto do CC2530_EM.	18
3.2	Gráfico temporal das tensões do circuito durante um ciclo de transmissão do módulo XBee (corrigida de [13]).	19
3.3	Esquema de conexão dos transformadores do sistema.	20
3.4	Diagrama de blocos do projeto FCAM original.	21
3.5	Diagrama de blocos do projeto atualizado do FCAM.	21
3.6	Foto do protótipo de testes com seus componentes em placas discretas.	22
3.7	Figura resultado de um ensaio do FCAM (modificado de [13]).	24
3.8	Pacotes de dados do protocolo MRFI capturados usando o capturador de pacotes da Texas.	25
3.9	Pacotes de dados do protocolo do módulo XBee do FCAM capturados usando o Packet Sniffer da Texas.	25
3.10	Princípio de funcionamento do método das bacias.	26
3.11	Princípio de separação das medidas em faixas de valores com taxas de integração diferentes.	27
4.1	Imagem do osciloscópio utilizado para medidas do ciclo de funcionamento do circuito.	32
4.2	A curva de carga em baixo consumo durante operação abaixo de 2,7V.	34
4.3	Curva de carga obtida pelo osciloscópio durante operação acima de 2,7V.	34

4.4	A curva de carga durante o envio do sinal de início de conversão para o ADC.	35
4.5	A curva de carga durante a transmissão 20ms após o início da conversão pelo ADC.	35
4.6	A tensão de alimentação do módulo durante a transmissão.	36
4.7	Gravação de dados na EEPROM devido à interrupção por queda de tensão.	37
4.8	Visualização do pino CS e MOSI durante o processo de gravação dos dados de medição na EEPROM.	37
4.9	Imagem do enrolamento com meio núcleo de um TC.	38
4.10	Imagem capturada pelo osciloscópio da saída da UART para a transmissão por Led.	39
4.11	<i>Dongle</i> com módulo XBee usado na captura de dados transmitidos pelo FCAM.	39
4.12	Dados recebidos pelo <i>dongle</i> com módulo XBee e lidos pela interface USB com o programa <i>HTerm</i>	40
4.13	Tela do programa de aferição desenvolvido pelo Cepel.	40
A.1	Fluxograma do programa do FCAM.	45

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre a MCU HT49R30A-1 e o SOC CC2530 para operação na faixa de 2 a 3V.	16
4.1	Teste de corrente do TC1 de núcleo dividido com curto no secundário.	33

Lista de Abreviaturas e Nomenclaturas

AC	Alternating Current
ADC	Analogic to Digital Converter
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	Application Programming Interface
Ah	Ampere _{RMS} -hora
bps	bits por segundo
Byte	Conjunto de 8 bits
cAh	centiAmpere _{RMS} -hora
CCA	Clear Channel Assessment
CI	Circuito Integrado
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance
CS	Chip Select
Cepel	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
dAh	deciAmpere _{RMS} -hora
DC	Direct Current
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FCAM	Fiscalizador de Corrente Automonitorado
FCF	Frame Control Field
FCS	Frame Check Sequence
GPIO	General Purpose Input/Output
I/O	Input/Output

IAR	Ingenjörfirman Anders Rundgren (Empresa de Engenharia Anders Rundgren)
IDE	Integrated Development Environment
ips	instruções por segundo
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LCD	Liquid-Crystal Display
LQI	Link Quality Indicator
LSB	Least Significant Bit
Led	Light Emitting Diode
MAC	Medium Access Control
MCU	Microcontroller Unit
MFR	MAC Footer
MHR	MAC header
MRFI	Minimal Radio Frequency Interface
MSB	Most Significant Bit
OTP	One-Time Programmable
PAN	Personal Area Network
PFD	Programmable Frequency Divider
PHR	PHY Header
PSDU	PHY Service Data Unit
RAM	Random Access Memory
RF	Radiofrequência
RMS	Root Mean Square
RSSI	Received Signal Strength Indication
SHR	Synchronization Header
SOC	System on a Chip

SPI	Serial Peripheral Interface
SS	Slave Select
TCAM	Transformador de Corrente Automonitorado
TC	Transformador de Corrente
TI	Texas Instruments
TIs	Transformadores para Instrumentos
TP	Transformador de Potencial
UCOM	Unidade de Comunicação
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultravioleta

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

A medida exata e contínua do consumo de energia é um dos pontos de preocupação principais de empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica. As perdas não técnicas de energia elétrica (quaisquer perdas que não sejam inerentes ao transporte e medição de energia, tais como furtos de energia, erros de medição, erros no processo de faturamento, unidades consumidoras sem equipamento de medição, etc) podem constituir 10% do mercado de baixa tensão, e 7,5% é um índice de perdas não técnicas para qual empresas de grande porte devem definir trajetórias de redução (Dados de 04/2015 ANEEL [1]). Para combater isso, diversos métodos de fiscalização e manutenção do faturamento exato da energia consumida tem sido desenvolvidos. Entretanto, furtos de energia podem apresentar características temporárias e ocorrerem durante períodos em que a fiscalização não está sendo feita em campo. Isso torna difícil a captura em flagrante do autor do furto. A violação dos medidores de energia também pode ser realizada de forma não aparente aos fiscalizadores, o que torna seu trabalho difícil.

1.2 Projeto TCAM/FCAM

Irregularidades na apuração do consumo de energia são fortes contribuidoras nas perdas de energia em estabelecimentos comerciais. Nestes, devido aos altos níveis de tensão e corrente, a medição do consumo frequentemente é feita através de transformadores de corrente e de potencial e há vários casos relatados por técnicos de concessionárias sobre irregularidades nos sistemas de medição, envolvendo o circuito entre o secundário do transformador de corrente e o medidor de energia.

Para combater estas irregularidades, um sistema de fiscalização contínua para transformadores de instrumentos foi patenteado e vem sendo desenvolvido pelo Cepel (centro de pesquisas do grupo Eletrobras). O TCAM (Transformador de Corrente Automonitorado) é um sistema que busca combater as perdas não técnicas através da fiscalização contínua da corrente consumida com a possibilidade de reconstrução de um histórico do consumo ao longo do tempo. Esta fiscalização é feita através de uma placa eletrônica embutida e encapsulada no interior dos transformadores de corrente tradicionais. A fiscalização contínua permite a detecção de furtos temporá-

rios de energia em períodos em que os fiscais normalmente não estão em campo. Um diagnóstico pode ser obtido através da comparação dos dados de corrente colhidos pelo circuito do transformador com o histórico armazenado no relógio de energia para determinar se este foi burlado ou apresenta uma falha.

O modelo FCAM (Fiscalizador de Corrente Automonitorado) também foi criado como uma variação do Transformador de medição TCAM para o caso em que um TC de faturamento já estivesse instalado e seria complexa sua substituição pelo TCAM. Este empregaria transformadores de núcleo dividido para possibilitar sua instalação sem alteração do sistema de medição para faturamento já existente e poderia ser instalado em qualquer parte da linha fora da caixa dos TCs [2].

O sistema FCAM, no momento de escrita deste trabalho, ainda está em desenvolvimento com testes em campo já realizados em protótipos instalados na unidade consumidora da Eletrobras Distribuição Alagoas, em Maceió [3].

1.3 Proposta

Com este trabalho, busca-se a atualização de *hardware* do sistema do FCAM condizente com a busca por um modelo mais eficiente e barato para o mercado e com possibilidades de adaptação a novas mudanças de projeto. O protótipo atual do FCAM faz uso da unidade microcontroladora (MCU) *Holtek* HT49R30A-1 com interface de comunicação serial assíncrona a um módulo de rádio XBee. Este é um microcontrolador que está no mercado por mais de 15 anos e corre risco de tornar-se obsoleto no futuro, o que atrasaria o desenvolvimento do projeto. Também é importante que empresas envolvidas no desenvolvimento de tal projeto possuam uma grande gama de fornecedores para não se tornarem dependentes de apenas uma fonte fornecedora.

Portanto, um novo modelo com uso do SOC CC2530 desenvolvido pela *Texas Instruments* é proposto por apresentar diversas vantagens em relação à MCU atual. O SOC CC2530 apresenta uma interface de rádio integrada para 2,4GHz no padrão 802.15.4 e assim substituiria a MCU *Holtek* e o módulo XBee promovendo uma economia de componentes e espaço. Além disso, por apresentar uma frequência de funcionamento mais alta e modos de baixo consumo, é esperado que este realize as operações mais rapidamente e com um consumo menor de energia.

1.4 Roteiro do Trabalho

Os conceitos básicos do projeto do FCAM são introduzidos no capítulo 2. Nele, os conceitos teóricos utilizados são explicados para a melhor compreensão do leitor. É feita uma descrição simples do funcionamento do atual sistema de fiscalização e conclui-se com uma análise comparativa entre o atual projeto do FCAM e a nova versão proposta.

O capítulo 3 descreve o sistema proposto de forma mais detalhada, aprofundando na sua arquitetura de *hardware* e *software*. É descrito o ambiente de programação usado, a plataforma de desenvolvimento da *Texas Instruments* e as atualizações de *software* feitas com a IDE da IAR para adaptá-lo às novas características de *hardware*. Apresenta-se um protótipo do FCAM usando o SOC CC2530 sobre o qual testes foram realizados.

O capítulo 4 faz um apanhado geral dos resultados obtidos dos testes realizados no protótipo descrito no capítulo 3. Este também descreve as mudanças que foram feitas no protótipo ao longo dos experimentos segundo os resultados obtidos.

Por fim, o capítulo 5 faz a análise dos resultados obtidos dos experimentos. É feita a consideração se o novo modelo atendeu os seus objetivos e apresentam-se propostas a futuras iterações do projeto.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Neste capítulo, serão explicados os conceitos básicos que influenciam o projeto de atualização do Fiscalizador de Corrente Automonitorado (FCAM).

2.1 Transformadores para Instrumentos

Transformadores para instrumentos (TIs) são equipamentos elétricos passivos compostos de dois circuitos elétricos acoplados por um circuito magnético. Um dos circuitos elétricos é alimentado por uma fonte AC e conecta-se a um núcleo magnético por um fio condutor isolado enrolado em torno deste. Um segundo enrolamento em torno do núcleo fornece energia de mesma forma e frequência que a percebida pelo primeiro enrolamento a outro circuito. O enrolamento conectado ao circuito alimentado pela fonte AC do circuito é chamado de “primário” e o enrolamento que fornece uma fonte alternada ao circuito é chamado de “secundário”.

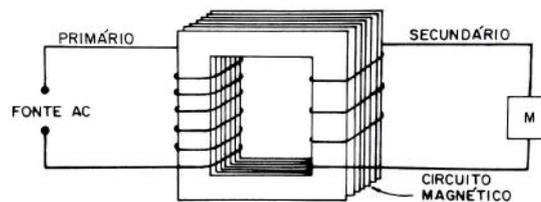


Figura 2.1: Diagrama de um TC (retirados de [4]).

A transferência de energia do enrolamento primário para o secundário se dá pela lei de Faraday tendo o núcleo do transformador como condutor do fluxo de campo magnético.

$$\epsilon_1 = -n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad ; \quad \epsilon_2 = -n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Considerando que todo o fluxo magnético gerado pelo primário é transmitido pelo núcleo do transformador e que a fonte é AC. A relação entre a força eletromotriz aplicada no primário do transformador e a gerada em seu secundário é dada por:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

Onde n_x é o número de espiras no enrolamento x , e ϵ_x é a força eletromotriz sobre o enrolamento x .

Dessa forma, transformadores para instrumentos alteram a amplitude do sinal em seu enrolamento primário de forma que este conforme com valores padronizados

para equipamentos de medição sem alterar a forma da onda. Também possuem a vantagem de promover proteção e isolamento galvânico entre o circuito medido e o circuito de medição.

Transformadores para instrumentos podem ser separados em dois tipos: transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP). Transformadores de corrente são usados para medições de corrente e possuem seus enrolamentos ligados em série com os circuitos que se deseja medir e os circuitos de medição e por isso, apresentam baixas impedâncias em seus enrolamentos. Por outro lado, os transformadores de potencial são usados para medições de tensão e apresentam seus enrolamentos ligados em paralelo com os circuitos que estejam medindo e os circuitos de medição e por isso, apresentam altas impedâncias em seus enrolamentos.

Neste trabalho, buscamos realizar medidas de corrente e portanto abordaremos o uso de TCs.

2.1.1 Transformadores de Corrente

Estes tem como função gerar uma corrente alternada em seu enrolamento secundário proporcional à corrente aplicada no seu primário, isolar o circuito ligado ao seu primário do ligado ao seu secundário e diminuir correntes altas de forma que estas possam ser medidas por circuitos eletrônicos.

Existem diversos tipos de transformadores de correntes classificados segundo sua construção. Alguns deles são:

TC tipo enrolado: cujo enrolamento primário envolve mecanicamente o núcleo uma ou mais vezes para promover razões maiores de conversão.

TC tipo barra: transformador cujo enrolamento primário é uma barra condutora fixa.

TC tipo janela: transformador que não possui primário próprio, mas uma abertura através do núcleo por onde passa um condutor do circuito primário.

TC tipo núcleo dividido: Um TC tipo janela cujo núcleo é separável em duas partes ou basculante. Isso permite o enlaçamento do núcleo em torno de um condutor do circuito primário sem interferência neste.

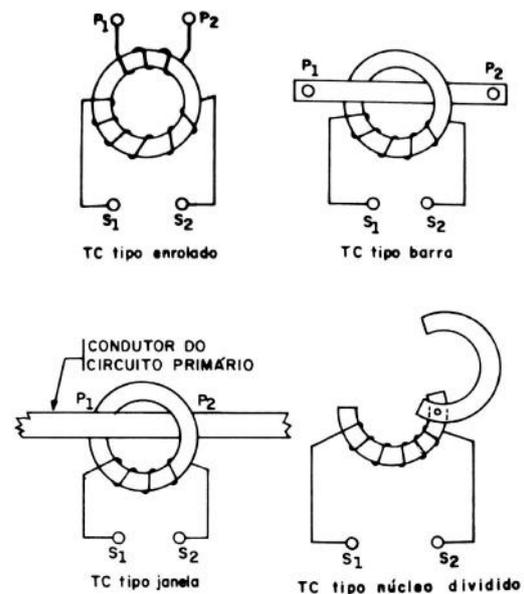


Figura 2.2: Tipos de TCs segundo sua construção (retirados de [4]).

O uso de um TC de núcleo dividido permite que este seja instalado na linha de forma imediata sem a necessidade de se cortar o fornecimento de energia para o estabelecimento comercial em que será instalado. Desse modo, esse foi escolhido como sendo o TC ideal para o trabalho.

Perdas em Transformadores de Corrente

Transformadores de corrente reais, diferentes dos transformadores ideais, podem ser modelados com certa indutância e resistência em série e em paralelo com o circuito de seu secundário.

Isso ocorre pois o mesmo princípio que permite que o fluxo de campo induza uma corrente nos enrolamentos, induz também correntes dentro do núcleo do transformador, essas correntes parasitas, também chamadas de correntes de Foucault, diminuem a eficiência do transformador. Outras perdas se devem à “relutância magnética” do próprio núcleo, ou à perda de campo magnético pois nem todo ele é conduzido pelo núcleo.

Devido à não linearidade magnética do material do qual o núcleo é feito, a relação entre a corrente no primário e a corrente de excitação do transformador não é linear. O gráfico a seguir caracteriza a relação entre a corrente primária e a corrente de excitação do núcleo magnético.

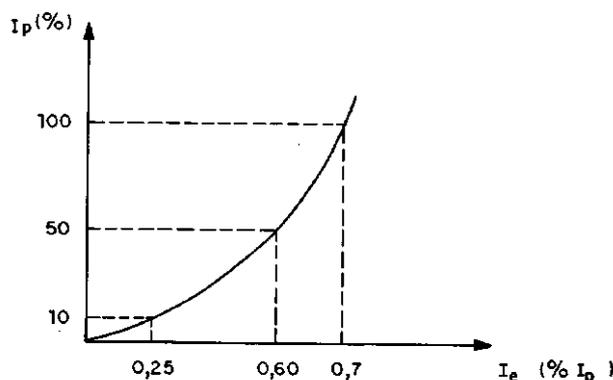


Figura 2.3: Relação entre a corrente de excitação I_e e a corrente primária I_p de um TC (retirado de [4]).

O gráfico representa os valores como percentuais da corrente nominal no primário do transformador. Com ele, podemos observar que a não linearidade é mais acentuada para baixas correntes, nas quais a relação da corrente de excitação em relação a corrente primária é de 3%, enquanto que esta relação cai para 1% durante a operação do transformador com corrente nominal. A corrente de excitação (I_e), ou corrente a vazio, é obtida pela soma fasorial da corrente de perdas no núcleo (histerese e Foucault) com a corrente de magnetização, e normalmente fica compreendida entre 2 e 6% da corrente nominal do primário [4].

A existência de um entreferro (espaço de ar através do núcleo) aumenta esta não linearidade. Como é feito uso de um transformador de núcleo dividido neste projeto e busca-se a realização de medições de energia, a não linearidade durante as medições em baixas correntes deve ser considerada para se obter um nível de precisão adequado.

2.2 Medida em Ampere-hora RMS

Ampere é a unidade de medida do fluxo de cargas elétricas equivalendo ao fluxo de um Coulomb (carga elétrica de $6,242 \times 10^{18}$ prótons) por segundo. Ampere-hora diz respeito à quantidade de cargas elétricas que circularam durante o fluxo de um ampere ao longo de uma hora, e equivale portanto a 3600 Coulombs.

Para o caso de fontes de correntes alternadas de formato senoidal como é característico da transmissão de energia por concessionárias, a medição é feita pela raiz do valor quadrático médio (RMS) ou “valor eficaz” da corrente. Esta medida busca determinar o valor de corrente elétrica fornecida por uma fonte contínua que dissipa a mesma potência elétrica que a fonte alternada quando aplicada sobre a mesma carga constante.

O valor RMS é calculado pela raiz quadrada do valor quadrático médio de corrente $\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}\right)$. Para o sinal senoidal seu valor é calculado da seguinte forma:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (A \sin(\omega t))^2 dt}; \Rightarrow \text{Onde } T \text{ é o período do sinal senoidal, e } A \text{ é a amplitude do sinal senoidal.}$$

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{A^2}{T \cdot \omega} \int_0^{\omega T} \sin(u)^2 du} = \sqrt{\frac{A^2}{T \cdot \omega} \left[\frac{u}{2} - \frac{\sin(2u)}{4} \right] \Big|_0^{\omega T}}; \quad \boxed{\omega = \frac{2\pi}{T}}$$

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{A^2}{2\pi} \left[\frac{2\pi T}{2T} \right]} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

Assim, é comum a prática do cálculo do valor de eficaz pelo valor de pico da amplitude do sinal senoidal multiplicado por $1/\sqrt{2}$ (0,707). Contudo, esta prática desconsidera a presença de harmônicos na rede ou distorções no formato da onda. Assim, o uso de um medidor true-RMS é uma melhor escolha caso deseje-se ter uma maior precisão na medição de corrente alternada.

2.3 Funcionamento do Sistema de Medição Ah do FCAM

O projeto do FCAM busca a criação de um sistema embarcado de medição de corrente alimentado pela corrente transformada de um TC de núcleo dividido. A medida do consumo de energia em ampere-hora (Ah) por um TC foi escolhida devido ao seu princípio de funcionamento pelo efeito indutivo, o que permite a medida indireta do consumo com isolamento galvânico entre o circuito medido e o circuito de medição. Com isso, o circuito pode ser alimentado diretamente pela corrente medida, apresentar total imunidade a distúrbios tais como sobretensões, sobrecargas e quedas de raios, e não estar sujeito à corrosão pela possibilidade de ser resinado junto ao TC. Representa portanto, uma alternativa barata e simples para a medida do consumo com custo reduzido de instalação em relação a um sistema de medição convencional. E, considerando baixas variações no valor de tensão da linha elétrica, este consegue obter figuras bastante próximas das que seriam lidas por um medidor de energia.

Devido ao sistema de fiscalização ser alimentado pela corrente do TC, este pode ser resinado junto ao mesmo usando uma resina fosca para esconder seus componentes e protegê-los dos raios solares e radiação UV. As ações de fraude sobre o fiscalizador de corrente ficam dificultadas devido sua estrutura em bloco monolítico, pois qualquer tentativa de fraude levaria ao dano estrutural do fiscalizador que pode ser notado durante a inspeção por técnicos.

Devido a não possuir nenhuma conexão externa, os dados colhidos pelo circuito de medição são transmitidos por rádio em modo *broadcast* (para todos os ouvintes em uma faixa de frequência). Uma Unidade de Comunicação (UCOM) localizada nas proximidades salva os dados com uma estampa de tempo em uma memória flash móvel. Esta pode então ser levada e comparada na concessionária com o histórico medido pelo relógio de energia da unidade comercial em busca de irregularidades. A transmissão do medidor também pode ser captada por um técnico com um dispositivo receptor para aferições em campo.

Um diagrama da instalação do sistema é apresentado a seguir:

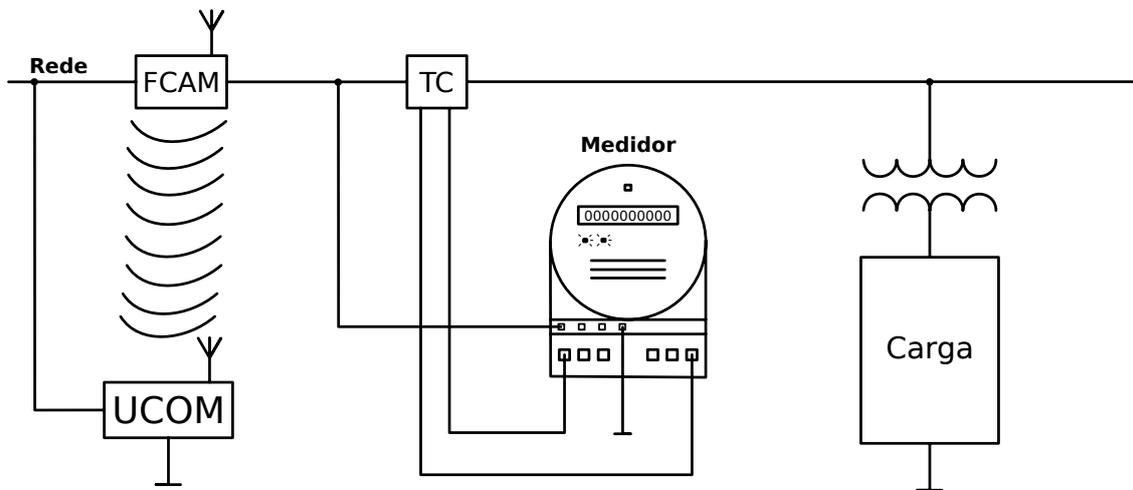


Figura 2.4: Diagrama do sistema de fiscalização FCAM.

É preciso que o fiscalizador seja robusto contra quedas de energia, baixas e altas correntes de alimentação, e não perca os dados colhidos. O sistema também deve permitir a coleta de dados por técnicos de forma direta e independente da energização da linha. Para operar em baixas correntes, o circuito de fiscalização apresenta um supercapacitor que é carregado e acionado como alimentação auxiliar durante períodos de alto consumo (como durante a transmissão por rádio). Para as demais funcionalidades, a MCU possui periféricos como uma memória não volátil reprogramável (EEPROM) para salvar os dados colhidos, um módulo de rádio para a transmissão dos dados, e uma interface óptica a Led com um transformador de meio núcleo como fonte auxiliar de alimentação para a coleta de dados em caso de falta de energia.

A comunicação entre o microcontrolador e seus periféricos é feita através de interfaces seriais.

2.4 Comunicação serial

Nos meios de comunicação serial, os bits de dados são transmitidos em uma única linha de forma sequencial. Isso permite uma economia de fios em comparação com a transmissão de dados em paralelo, onde uma linha é usada para a transmissão de cada bit integrante de um byte. Essa economia de fios é essencial quando se deseja minimizar um projeto.

Existem duas formas de se transmitir dados de forma sequencial: de forma síncrona ou assíncrona. No projeto proposto, ambas são utilizadas.

2.4.1 Interface Síncrona SPI

A interface SPI (Serial Peripheral Interface) é um protocolo desenvolvido pela Motorola extensivamente usado na comunicação entre unidades microcontroladoras e seus periféricos. A sincronização da transmissão de dados é feita por um sinal de *clock* (CLK) transmitido em uma linha separada e usado para determinar o instante em que o bit na linha de dados deve ser considerado como parte da transmissão. O padrão baseia-se em uma estrutura de comunicação mestre-escravo (master-slave) onde o mestre, normalmente a unidade microcontroladora, é o componente responsável pelo envio do sinal de *clock* para seus periféricos.

Além da linha de CLK usada para a sincronização da transmissão, outras 2 linhas são necessárias para a comunicação serial. A linha MOSI (Master Output Slave Input) conecta a porta de saída de dados do mestre com a porta de entrada do escravo. Enquanto isso, a linha MISO (Master Input Slave Output) conecta a entrada de dados do mestre com a saída de dados do escravo.

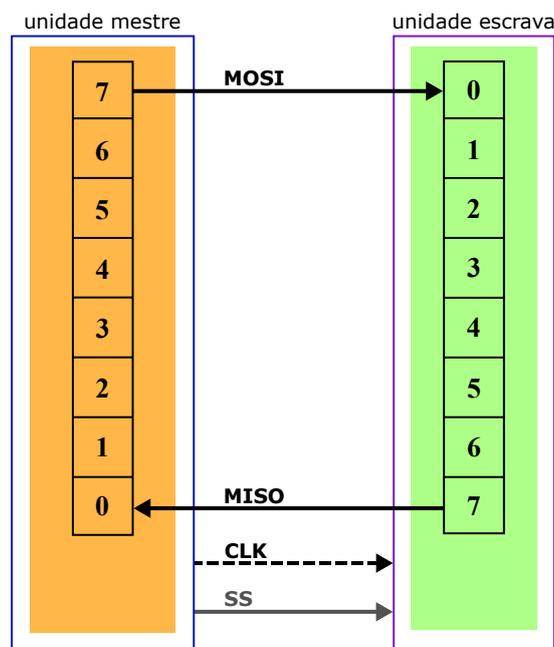


Figura 2.5: Interpretação da comunicação SPI como dois registradores deslocadores de bit (inspirado em [5]).

Quando há mais de um periférico ligado ao mestre, uma linha denominada SS (Slave Select) é ligada entre este e cada um de seus elementos escravos para realizar a seleção do periférico com o qual se deseja comunicar. Isso permite que as linhas MOSI, MISO e CLK sejam comuns entre a MCU e todos os seus periféricos.

No projeto, a interface de comunicação SPI é usada para a comunicação entre a MCU e os CIs do ADC e da memória EEPROM e pinos da MCU são configurados como saídas para selecionarem o CI a ser usado.

Nesta conexão, o SOC CC2530 realiza o papel de mestre com os pinos MOSI e MISO da sua USART ligados aos pinos MISO e MOSI dos periféricos respectivamente. A configuração da conexão por interface SPI com os periféricos é ilustrada a seguir:

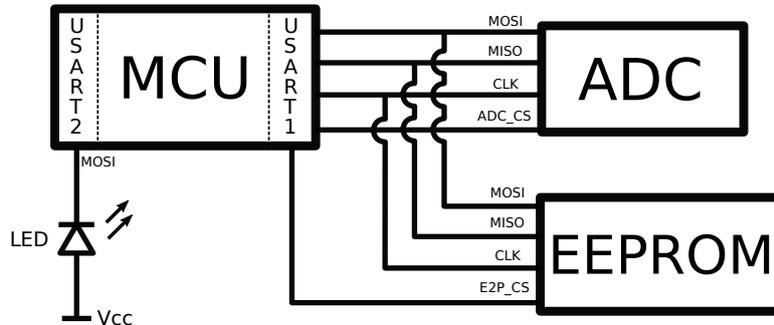


Figura 2.6: Esquema de conexão SPI da MCU com seus periféricos.

A transmissão de dados pela interface SPI ocorre em modo *full duplex* (a transmissão de dados ocorre ao mesmo tempo que a recepção de dados) analogamente a um par de registradores de 8 bits conectados de forma circular cuja rotação de bits é comandada pelo sinal CLK enviado pelo mestre (vide a Figura 2.5). Ao final de oito ciclos no CLK, um byte inteiro é deslocado da MCU para o periférico e do periférico para MCU. O byte, em seguida, pode ser copiado pela MCU para uma nova posição de memória onde será salvo e um novo byte é escrito em seu lugar para ser transmitido.

2.4.2 Interface Serial Assíncrona

Na transmissão assíncrona, não há um sinal de sincronização entre o transmissor e o receptor. Cabe a cada um dos membros da comunicação determinar o instante em que o sinal no barramento de dados corresponde a um bit específico. Por isso, é importante a especificação da velocidade de transmissão dos dados e a identificação do instante de início da transmissão.

A Interface Serial Assíncrona apresenta a vantagem de requerer apenas uma linha de comunicação para a transmissão de dados. Desta forma, faz-se ideal para a transmissão por interface óptica do projeto FCAM. No sistema do FCAM, caso não haja corrente suficiente passando pelo TC para suprir a transmissão por rádio, um sensor óptico com indutor de meio núcleo pode fornecer energia suficiente para que um Led conectado à USART da MCU faça a transmissão dos dados.

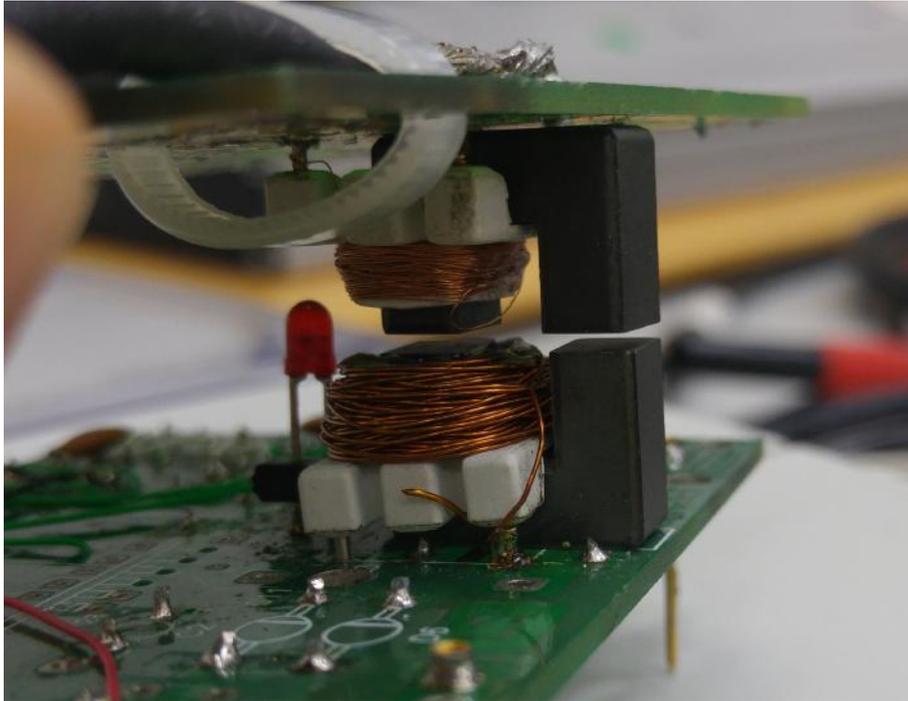


Figura 2.7: Foto da interface óptica do protótipo do FCAM com fonte auxiliar por meio de um indutor de meio núcleo.

Enquanto não estiver ocorrendo uma transmissão, a linha de dados permanece em um nível lógico inativo. No projeto, este nível corresponde ao Led estar apagado. O instante de início da transmissão é indicado por um bit de partida, cuja função é gerar uma transição forçada do estado inativo da linha de transmissão. Assim, o instante do início da transmissão pode ser identificado pelo receptor e o primeiro bit a ser transmitido pode ter o mesmo nível lógico do estado inativo. Os bits seguintes transmitem a unidade de dado e, ao final do frame, um bit de parada é adicionado para retornar a linha de dados ao nível lógico do estado inativo.

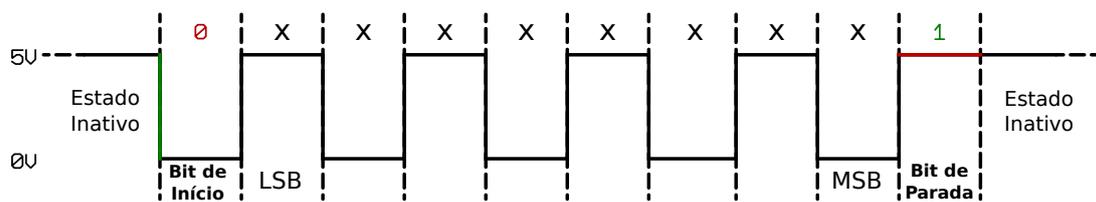


Figura 2.8: Transmissão de dados por uma interface assíncrona.

2.5 Transmissão em radiofrequência

2.5.1 Módulo XBee

A transmissão do protótipo atual do FCAM é feita por um módulo XBee que recebe os dados a serem enviados da MCU (HT49R30A-1) por uma interface serial assíncrona. Com o uso do módulo da Texas, o componente XBee não se faz mais necessário pois o SOC CC2530 apresenta o próprio transmissor de radio frequência embutido.

A transmissão realizada pelo módulo Texas opera na faixa ISM de 2,4GHz usando o protocolo de comunicação IEEE 802.15.4, o mesmo modo de operação que o módulo XBee da *Digi International*. Entretanto, com o intuito de manter a compatibilidade com a versão anterior do FCAM, o pacote de transmissão de dados do módulo Texas tem de ser modificado para ser identificado pelo módulo XBee usado na versão anterior.

O módulo da Digi possui dois modos de operação: modo transparente e modo API. O modo transparente envia por rádio qualquer dado coletado pela UART do módulo segundo configurações de envio pré-configuradas e fornece pela UART o *payload* (carga de dados) captado por rádio sem cabeçalhos ou informações adicionais anexadas. No modo de comunicação por API, dados transmitidos ou recebidos por rádio são comunicados pela UART do módulo anteceditos de um cabeçalho e precedidos de um trailer. Esses elementos anexados ao dado fornecem informações sobre o número de sequência do pacote, endereço da PAN, endereço MAC do destinatário, endereço de origem da transmissão e intensidade do sinal recebido (RSSI) dos pacotes que são comunicados via rádio. Com isso, é possível especificar diferentes endereços de destino, canais de comunicação e números de sequência para cada transmissão sem alterar as configurações do módulo; e ao receber pacotes, é possível determinar a intensidade do sinal pelo RSSI fornecido no trailer e o endereço do emissor pelos dados adicionais anexados no cabeçalho.

Devido ao alto consumo do módulo XBee em seu estado *idle* (em espera), o modo transparente foi utilizado por possuir um menor tempo de serialização dos dados pela UART para o módulo de rádio.

Infelizmente, devido ao alto consumo do módulo XBee em seu modo de recepção (50mA) e seu alto período de inicialização (25ms), a recepção de dados pelo módulo apresentou-se inviável no projeto. Sendo assim, apenas transmissões são feitas pelo FCAM. Caso a recepção de dados fosse implementada, custosos algoritmos de criptografia precisariam ser incluídos para evitar tentativas de burlar o fiscalizador.

Ambos os módulos XBee e o SOC CC2530 fazem uso do padrão 802.15.4 que será descrito a seguir.

2.5.2 Padrão IEEE 802.15.4

O padrão 802.15.4 é um padrão criado pela IEEE Alliance para a camada física e MAC da transmissão em radiofrequência servindo de base para diversos outros padrões de comunicação incluindo o modelo ZigBee. Ele fornece um padrão para transmissões nas faixas de 2,4GHz, 915MHz e 868MHz.

O pacote de dados enviados no padrão 802.15.4 segue o seguinte padrão da Figura 2.9

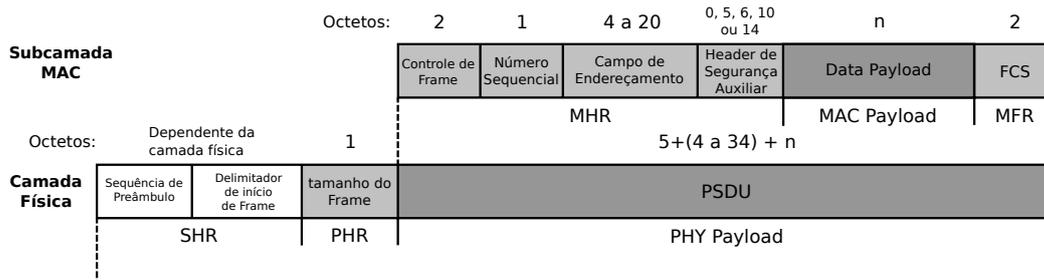


Figura 2.9: Visão esquemática da estrutura de comando MAC e do pacote PHY de transmissão de dados (tradizado de [6]).

A variação no número de bytes de cada subcampo do pacote de dados se dá segundo o formato em que as informações de cada subcampo são enviadas.

Para diminuir o número de bytes a serem enviados, e conseqüentemente a energia gasta durante a transmissão, foi feito uso da compressão de endereçamento MAC. Para fazer uso desta, o bit de compressão de PAN no subcampo “Controle de Frame” deve ser ativado e o campo de endereçamento conterá somente o endereço PAN de destino assumindo-se que o endereço do emissor possua o mesmo PAN.

Para evitar interferências, o algoritmo CSMA-CA é usado nas transmissões.

2.5.3 Método CSMA-CA

O *Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance* é um método da camada MAC que possui a função de evitar a colisão de transmissões de rádio feitas por diversos transmissores.

Quando um transmissor deseja acessar o meio, primeiro este verifica se o meio está disponível (i.e não está ocorrendo nenhuma transmissão de rádio no canal usado) se o meio estiver livre por um período de tempo ΔT , este pode enviar os dados imediatamente. Caso o meio esteja ocupado, o transmissor deve esperar um tempo de ΔT tenha transcorrido para então entrar em um período de contenção entre os transmissores do canal. Neste intervalo, o transmissor espera um número aleatório de divisões da janela de contenção como intervalo de *backoff* antes de tentar transmitir. Se após o período de *backoff* o meio estiver livre, a transmissão poderá ser feita

imediatamente. Caso contrário, a mesma sequência de ações deve ser seguida para quando o canal estiver ocupado.

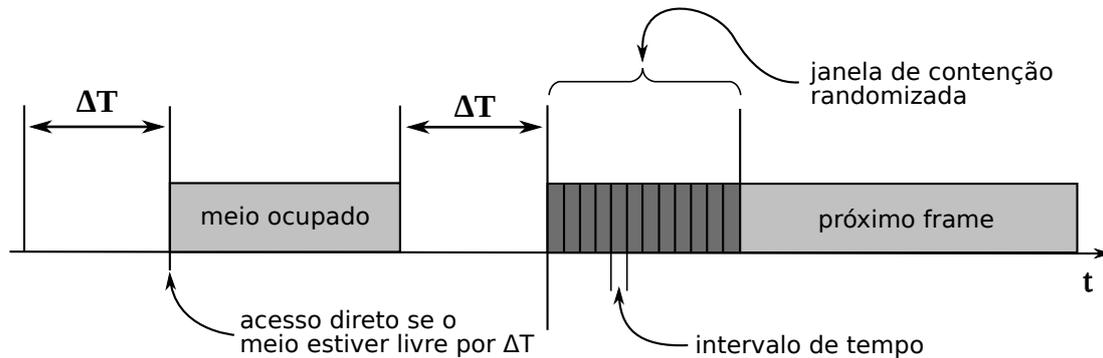


Figura 2.10: Ilustração da rotina do algoritmo CSMA-CA (adaptado de [7]).

O tempo de espera aleatório é escolhido como sendo um múltiplo de um intervalo de tempo escolhido como uma divisão da janela de contenção. O tamanho do intervalo é derivado do atraso de propagação do meio, atraso da transmissão devido a processamento e outros parâmetros dependentes do meio físico.

Para gerar um número aleatório que determine o período de *backoff*, um algoritmo de geração de número pseudoaleatório é utilizado. Para melhorar a qualidade da randomização, uma “semente” ou valor de aleatório inicial é escolhido a partir do ruído ambiente detectado pelo receptor de radiofrequência do SOC CC2530.

2.5.4 Padrão de Cabeçalho Proprietário do Projeto

O protocolo de transmissão do FCAM permite que a medida de corrente integrada seja transmitida em uma dentre duas unidades: em centiampere-hora (cAh) ou deciampere-hora (dAh). A unidade usada é transmitida no cabeçalho do *payload* de dados possuindo os valores hexadecimais: “DB” (para transmissão em cAh) ou “DC” (para transmissão em dAh).

Também é possível a transmissão do valor de tensão medido pelo ADC quando o módulo de medição está em modo de calibração. Neste caso, o cabeçalho do *payload* de dados apresenta o valor hexadecimal de “DA” para indicar que os dados transmitidos representam o valor lido da saída digital do ADC.

2.6 Comparação de tecnologias

A MCU é o núcleo de processamento de todo projeto eletrônico e usualmente é responsável pela maior parte do consumo do circuito. É proposto, neste trabalho, a substituição da MCU HT49R30A-1 e do módulo de rádio XBee por uma solução integrada na forma do SOC CC2530 da *Texas instruments*. A tabela 2.1 faz a comparação entre ambas as tecnologias de microcontroladores com base dos dados de seus *datasheets* [8, 9] e em seguida, justifica-se a mudança da unidade de processamento.

Tabela 2.1: Comparação entre a MCU HT49R30A-1 e o SOC CC2530 para operação na faixa de 2 a 3V.

	HT49R30A-1	SOC CC2530
Driver de LCD	18x4 segmentos	N/A
ADC	N/A	ADC interno de 12 bits
Interface de Radio	N/A	Transceptor RF 2,4-GHz compatível com IEEE 802.15.4
Frequência máxima de Operação	4MHz	32MHz
Timers	8-bit RTC com PFD watchdog timer	16-bit timer 802.15.4 MAC Timer 2 × 8-bit timers 32-kHz sleep timer watchdog timer
Interfaces de Comunicação Serial	implementado por bit banging	2 USARTs
Número de Pinos I/O	8 pinos I/O e 6 pinos de entrada	21 pinos GPIO
Modos de Baixo Consumo	N/A	4 modos de baixo consumo
Memória de Programa	memória OTP 2Kx14-bit	256KB memória flash
Memória RAM	memória tipo RAM 96x8-bit	memória tipo RAM 8KB

A unidade microcontroladora HT49R30A-1 possui como vantagem em relação ao CC2530, um driver de LCD de 18x4 segmentos. O driver de LCD faz-se útil nas aplicações de monitoramento de energia do TCAM/FCAM para a exibição do consumo medido de forma direta em uma tela LCD ligada ao TC. Entretanto, o SOC CC2530 apresenta-se superior nos demais aspectos: apresenta interfaces de

comunicação serial para a comunicação com periféricos, sendo esta mais rápida e eficiente do que o método bit banging, no qual a transmissão serial é implementada por *software* ao invés de ter uma unidade de serialização dedicada; seu módulo de rádio integrado elimina a necessidade de interfaces de comunicação entre a unidade microcontroladora e o módulo de transmissão; possui uma memória de programa flash que é maior e pode ser programada diversas vezes em contraste com a memória OTP (One-Time Programmable) do HT49R30A-1; sua memória RAM é maior; um ADC interno e maior quantidade de pinos de propósito geral (GPIO) possibilita a expansão de suas funcionalidades dentro do projeto; e, enquanto o consumo do HT49R30A-1 é menor para a mesma frequência de operação em modo *idle* [8, 9], os modos de baixo consumo do CC2530 compensam para aplicações de processamento ocasional como é o caso do projeto FCAM.

Levando-se em conta todas as vantagens do sistema em um chip CC2530, a substituição da unidade microcontroladora e do módulo XBee por este sugere um aumento na funcionalidade do circuito de medição com uma economia de componentes. Também pode-se esperar uma economia do consumo do circuito de medição devido aos modos de baixo consumo do CC2530 e interfaces de comunicação mais eficientes (USARTs e módulo de rádio integrado).

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo, foram vistos os conceitos básicos usados na fiscalização do consumo feito pela medida de Ampere-hora. Observou-se a necessidade de se encontrar uma forma de compensar pela não-linearidade do transformador de núcleo dividido usado no projeto FCAM. Foi feita a comparação entre os componentes, no momento de escrita deste trabalho, em uso no protótipo do FCAM e os componentes que seriam usados em sua versão atualizada. Relatou-se as vantagens que a atualização de *hardware* pode trazer ao projeto e o próximo capítulo aprofundará nas mudanças que foram feitas em seu processo de atualização e os meios utilizados.

Informações sobre transformadores e corrente alternada podem ser obtidas de [4]. Estudo das interfaces seriais usadas pode ser feito no curso online de sistemas embarcados em [5]. O padrão completo IEEE 802.15.4 de transmissão em radio frequência pode ser lido em [6]. O método CSMA-CA é descrito no padrão IEEE 802.15.4 e é detalhado em [7].

Capítulo 3

Descrição do Projeto

3.1 Configuração de *Hardware* do Projeto Proposto

Com o intuito de atualizar o *hardware* do protótipo do FCAM desenvolvido pelo Cepel, o kit de desenvolvimento da Texas Instruments “CC2530ZDK” foi utilizado para testar a viabilidade de se substituir os módulos de rádio e processamento do modelo anterior pelo SOC CC2530. Este kit inclui o CC2530_EM (“CC2530-Evaluation Module”), escolhido por ser uma alternativa mais barata à combinação do módulo XBee e a MCU *Holtek* e apresentar maior capacidade para o desenvolvimentos futuro do projeto com sua maior capacidade de processamento, ADC interno e perspectivas de produção futura (não garantida para o HT49R30A-1, que por ser um microcontrolador mais antigo, sofre um risco maior de se tornar obsoleto nos próximos anos).



Figura 3.1: Foto do CC2530_EM.

Apesar de ambos processadores realizarem de 1 a 2 ciclos de máquina por instrução, o microcontrolador Holtek não possui um modo de baixo consumo, e portanto foi configurado para operar constantemente a uma frequência de 32.768Hz (mesmo sendo capaz de operações a 4MHz em 2,2V [8]) para diminuir seu consumo. A serialização de dados era implementada pelo microcontrolador Holtek por *software* (método de bit banging) e portanto, estava limitada pela frequência de clock da MCU.

Devido à implementação da interface serial ser feita por software no modelo do FCAM que faz uso do microcontrolador Holtek, a serialização de bits é feita de forma

mais lenta. Com operação a 32.768Hz e 4 ciclos de clocks por ciclo de instrução, obtém-se 8192ips (instruções por segundo). Como o ciclo de serialização de um bit é feito em 7 instruções, consegue-se uma taxa de transmissão de aproximadamente 1170bps. Como a taxa mínima de recepção do módulo XBee é de 1200bps, este consegue transmitir os valores dentro da taxa mínima de transmissão devido à margem de erro de 2,5% da norma para cada dispositivo [10, 11].

O módulo XBee representa o maior consumidor de corrente do projeto FCAM, com um consumo de 50mA no modo *Idle/Receive* e 10 μ A em modo de hibernação [12, 13]. Portanto, fica desligado até o momento da transmissão, no qual apresenta um período de inicialização de 28ms (25ms de inicialização + 3ms de margem de segurança), acrescidos de 42ms de recebimento dos dados a serem transmitidos pela MCU através da entrada UART, e 17ms da transmissão por rádio, até ser novamente desligado para poupar energia. Devido ao período em que o módulo de rádio fica em modo ativo consumir uma corrente consideravelmente maior, fez-se necessário o uso de um supercapacitor para suplementar a alimentação do circuito durante este período para evitar uma queda significativa de tensão que ativasse a interrupção de baixa tensão.

O gráfico temporal da tensão de alimentação do módulo XBee durante este ciclo pode ser visto a seguir.

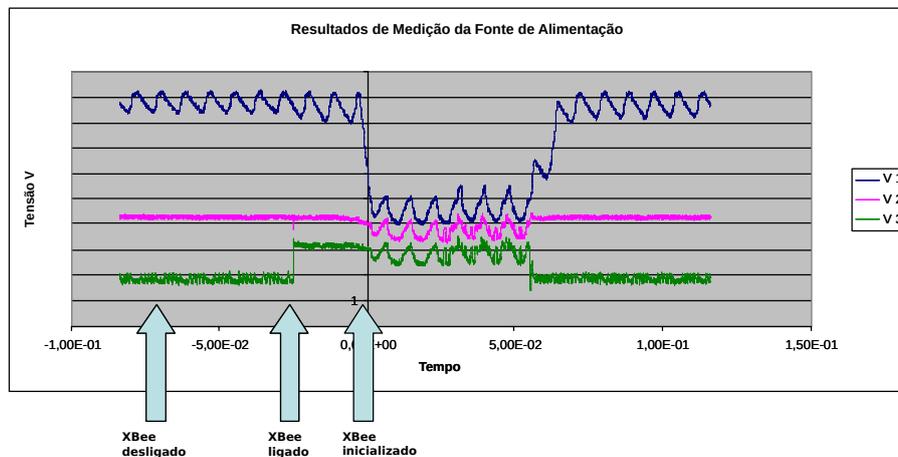


Figura 3.2: Gráfico temporal das tensões do circuito durante um ciclo de transmissão do módulo XBee (corrigida de [13]).

Neste gráfico, a tensão “V 1” representa a tensão sobre a fonte de alimentação do supercapacitor; a tensão “V 2” é a medida de tensão sobre o supercapacitor após passar por um regulador de tensão; e a tensão “V 3” é a tensão da alimentação do módulo XBee.

O módulo CC2530 da Texas possui 4 diferentes modos de baixo consumo, isso permite que este opere em sua frequência máxima de 32MHz a um consumo de 7mA durante o processamento e apresentasse baixo consumo (1 μ A) durante os períodos

de inatividade [14]. Ele também possui uma interface de rádio própria e portanto elimina o tempo de inicialização e recebimento de dados por UART que o módulo XBee apresenta. Como resultado, o uso do módulo CC2530 apresenta uma alternativa onde espera-se que o processamento de dados seja feita de forma mais rápida e apresente um menor consumo.

O protótipo original do sistema é formado por um conjunto de três transformadores de corrente: um transformador principal (TC1) de núcleo dividido que deve ser instalado em uma das fases da unidade comercial e dois transformadores auxiliares (TC2 e TC3). Os transformadores auxiliares TC2 e TC3 são respectivamente: um transformador de medição cujo secundário possui um resistor shunt sobre o qual a tensão é medida para se determinar a corrente do TC principal; e um transformador de alimentação auxiliar que possui a função de carregar o supercapacitor. O esquema de conexão entre os TCs pode ser visto na Figura 3.3 a seguir.

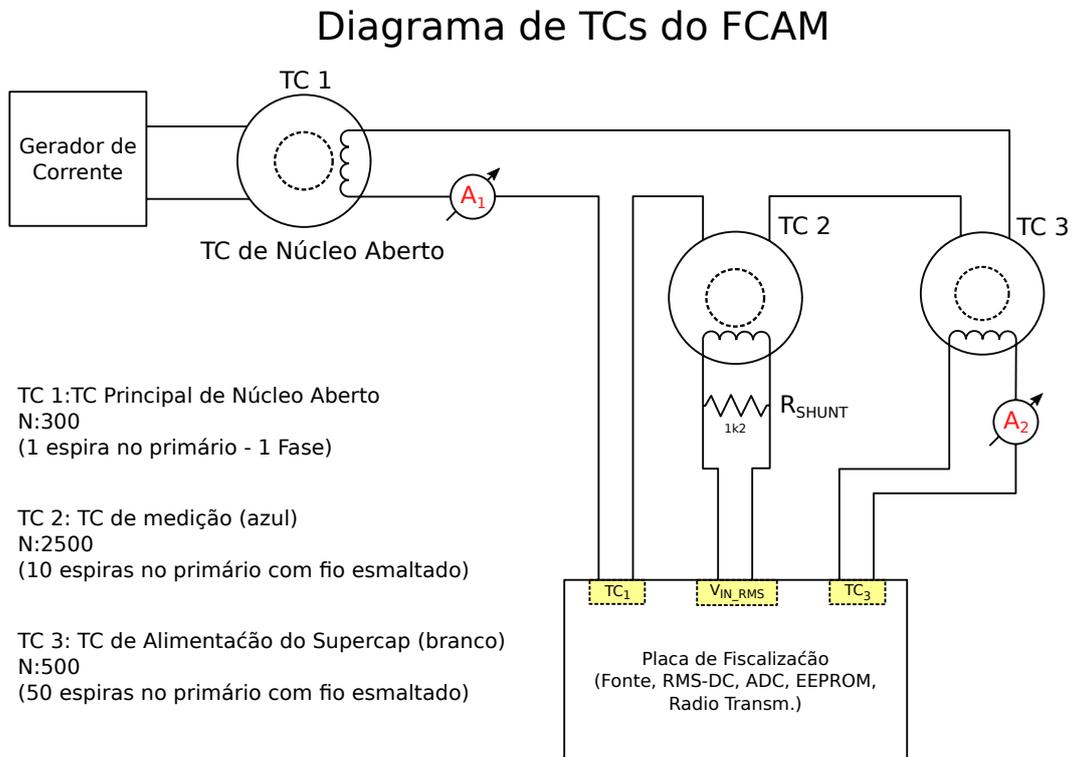


Figura 3.3: Esquema de conexão dos transformadores do sistema.

Resultados experimentais nos mostraram que o supercapacitor revelou-se desnecessário ao novo projeto, sendo os capacitores de alimentação (somando um total de $160\mu\text{F}$) suficientes para suportar o pico de consumo durante a transmissão. Portanto, o circuito de carga e acionamento do supercapacitor foi retirado (incluindo seu transformador de alimentação “T3”). A retirada do circuito do supercapacitor proporcionou uma economia de volume considerável devido ao TC de alimentação auxiliar (TC3) ocupar um grande espaço.

Os diagramas de blocos do projeto antes e após a atualização de *hardware* e retirada do circuito de carga do supercapacitor são apresentados a seguir:

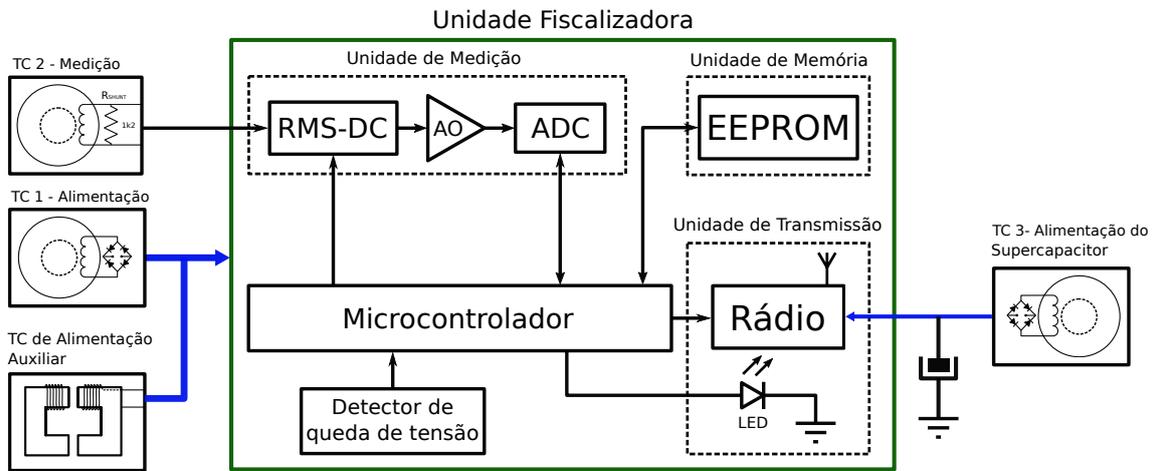


Figura 3.4: Diagrama de blocos do projeto FCAM original.

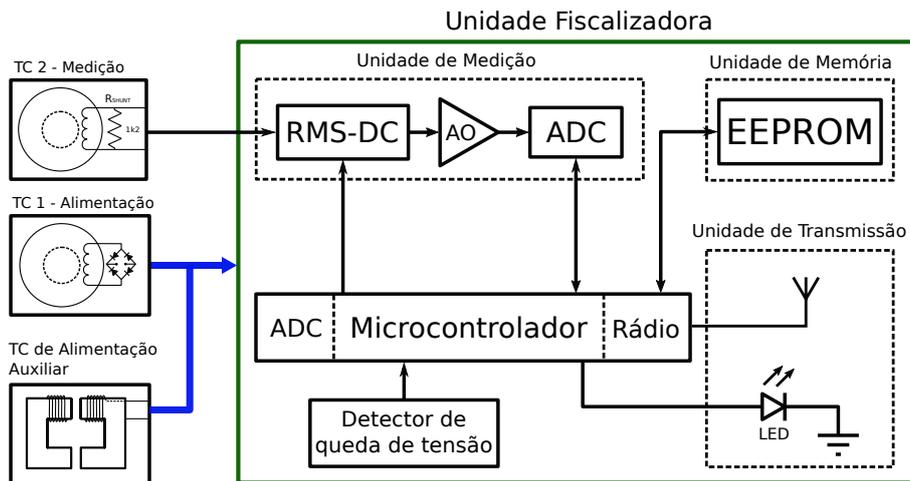


Figura 3.5: Diagrama de blocos do projeto atualizado do FCAM.

O circuito de fiscalização é alimentado pela corrente alternada do secundário do TC1 por meio de dois retificadores de meia onda. Um gera uma tensão de alimentação positiva (+V) a partir do ciclo positivo da onda, enquanto o outro gera uma tensão negativa (-V) a partir do ciclo negativo. A tensão de alimentação negativa é necessária para o funcionamento do conversor RMS-DC.

O projeto faz uso de um conversor “true RMS-DC” de código AD737 o qual captura a forma de onda de um sinal de tensão e fornece um sinal DC de tensão negativa de valor RMS equivalente. O valor de tensão DC negativa passa, em seguida, por um amplificador operacional que inverte o sinal e o amplifica antes de seguir para um conversor analógico para digital (ADC) que fornece o valor de tensão à unidade de processamento.

A unidade de processamento controla o funcionamento dos CIs RMS-DC e ADC e pode desativá-los para poupar energia.

Para os casos de queda de tensão na alimentação do sistema, o sistema apresenta um detector de tensão para 2,7V para enviar um sinal de interrupção ao microcontrolador na forma de uma transição negativa. Adicionalmente, uma memória EEPROM com interface SPI serve de memória não volátil para o armazenamento das medidas colhidas em caso de queda de energia, e dados de configuração do sistema.

No projeto original do FCAM utiliza-se a EEPROM 93LC46, a qual não permite a escrita sequencial de dados e apresenta tensão de operação mínima de 2,5V. Esta foi substituída pela EEPROM AT25640 que suporta escrita sequencial de dados e possui uma tensão de operação mínima de 1,8V. Essa modificação permite uma margem maior de tensão de operação em relação à tensão de interrupção e um número menor de bytes desperdiçados durante a operação de escrita dos dados.

Uma imagem da placa experimental é apresentada a seguir. Nela, o módulo da Texas Instruments com o SOC CC2530 realiza a função de processador de dados e transmissor de rádio. Os componentes são devidamente identificados.

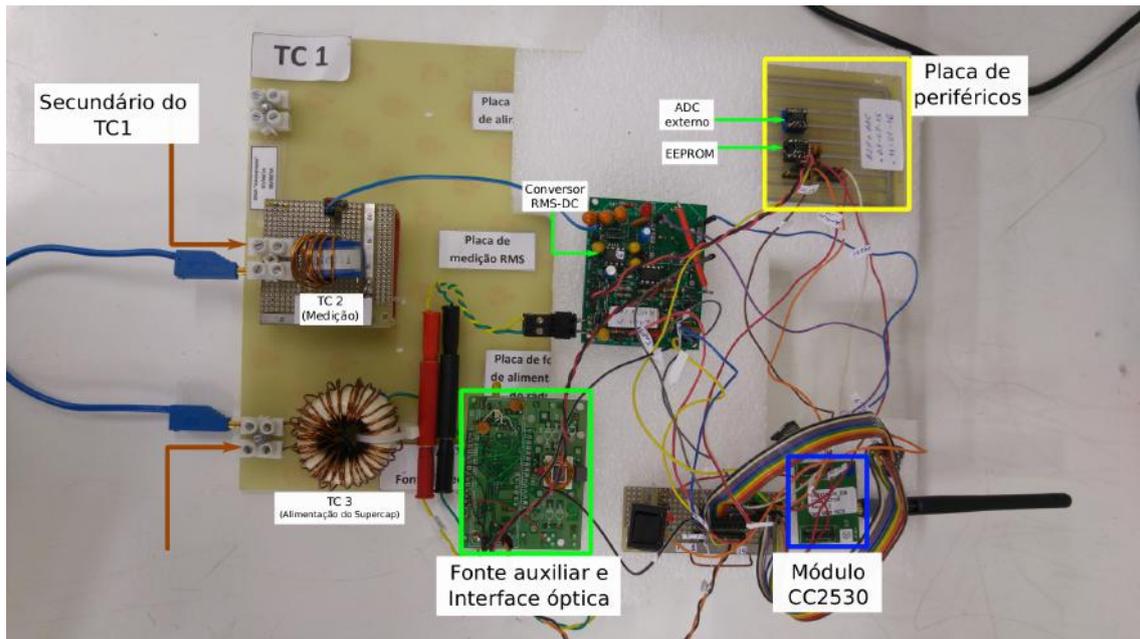


Figura 3.6: Foto do protótipo de testes com seus componentes em placas discretas.

3.2 *Softwares* Usados no Desenvolvimento do Projeto

3.2.1 Ambiente de Desenvolvimento

O *software* original do FCAM foi desenvolvido em linguagem de programação Assembler. Para a nova versão, a IDE de desenvolvimento “IAR Embedded Workbench” foi escolhida por recomendação do fabricante da MCU (TI) para o desenvolvimento do *software* do projeto em linguagem C. Esta IDE apresenta um *debugger* que permite a visualização dos estados dos registradores e captura de variáveis dentro do programa em tempo de execução. Também permite a configuração de *breakpoints* e a execução do programa em passos para uma melhor análise de cada rotina. Estas funcionalidades facilitaram o diagnóstico do software em busca de erros.

3.2.2 Programa de Coleta de Dados

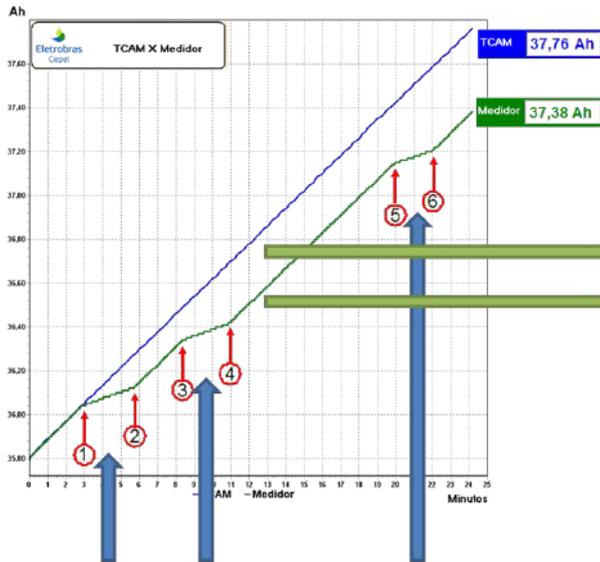
Para a visualização dos pacotes de dados enviados por rádio foi usado o *software* “SmartRF Packet Sniffer” fornecido pela Texas para ser instalado em seus módulos. Este permite a visualização clara dos campos de pacotes de dados identificando quais bytes correspondem a cada subsecção do protocolo de comunicação. Revelou-se muito útil na detecção de pacotes de dados enviados tanto pelo módulo da TI quanto pelo módulo XBee, sendo útil na realização de interoperabilidade entre os módulos.

Os dados do módulo de medição devem ser transmitidos para o computador para aferição. Um *dongle* com um módulo XBee realiza a captura dos pacotes transmitidos e os repassa para o computador através da interface USB usando sua API. A informação serializada pela USB devem ser corretamente interpretada pelo programa de aferição no computador. Para garantir que os dados estão sendo corretamente serializados, o programa “HTerm” é utilizado. Este é um programa terminal de comunicação serial que permite a transmissão e captura de bytes de informação transmitidos pelas diversas portas de comunicação serial do computador.

3.2.3 Programa de Aferição Desenvolvido no Cepel

O programa usado para a comparação entre as medidas colhidas pelo relógio de energia e as medidas do FCAM

A Figura 3.7 mostra o gráfico gerado pelo programa de aferição do FCAM demonstrando o conceito utilizado para a identificação de um furto de energia.



Fraude no circuito de medição de corrente.

Figura 3.7: Figura resultado de um ensaio do FCAM (modificado de [13]).

Os momentos em que os ângulos das linhas do gráfico do medidor de energia diferem dos do gráfico do FCAM (nas regiões 1-2, 3-4 e 5-6) indicam uma diferença na medida de energia entre eles, e assim fornecem o tempo em que uma possível fraude pode ter ocorrido.

3.3 Implementação de Interoperabilidade

A transmissão de rádio do protótipo apresentado neste trabalho baseou-se na interface MRFI desenvolvido pela Texas como parte da camada física do seu protocolo de rede *SimpliciTI*. Para manter compatibilidade com os módulos XBee implementados nos protótipos anteriores de FCAMs, o pacote de dados teve de ser modificado para implementar compressão de PAN. Além disso, o cabeçalho de dois bytes do pacote MRFI foi substituído pelo cabeçalho proprietário do projeto do FCAM. Os pacotes de dados transmitidos pela interface MRFI original e os pacotes modificados para o projeto FCAM foram capturados usando o *software* “SmartRF Packet Sniffer” fornecido pela Texas instalado em um dos módulos CC2530. As figuras 3.8 e 3.9 mostram os pacotes enviados pelo módulo CC2530 usando a interface MRFI e após as alterações para a compatibilidade com o módulo XBee.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source PAN	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
RX	+0	=0	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					00 7E	-19	OK
1		16	DATA	0	0	0	0	0x0A	0x2007	0x25DE	0x2007	CC		
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source PAN	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
RX	+47	=47	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					00 7E	-19	OK
2		16	DATA	0	0	0	0	0x0B	0x2007	0x25DE	0x2007	CC		
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source PAN	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
RX	+95	=95	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					00 7E	-19	OK
3		16	DATA	0	0	0	0	0x0C	0x2007	0x25DE	0x2007	CC		
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source PAN	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
RX	+52	=147	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					00 7E	-19	OK
4		16	DATA	0	0	0	0	0x0D	0x2007	0x25DE	0x2007	CC		

Figura 3.8: Pacotes de dados do protocolo MRFI capturados usando o capturador de pacotes da Texas.

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX	+0	=0	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				DA 59 00	76	OK
1		16	DATA	0	0	0	1	0x00	0xFFFF	0xFFFF	0x43C1		
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX	+9999811	=9999811	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				DA 58 00	76	OK
2		16	DATA	0	0	0	1	0x01	0xFFFF	0xFFFF	0x43C1		
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX	+9999550	=19999361	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				DC 01 00	70	OK
3		16	DATA	0	0	0	1	0x02	0xFFFF	0xFFFF	0x43C1		
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX	+9999811	=29999172	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				DC 01 00	70	OK
4		16	DATA	0	0	0	1	0x03	0xFFFF	0xFFFF	0x43C1		
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX	+9999810	=39998982	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				DC 01 00	65	OK
5		16	DATA	0	0	0	1	0x04	0xFFFF	0xFFFF	0x43C1		

Figura 3.9: Pacotes de dados do protocolo do módulo XBee do FCAM capturados usando o Packet Sniffer da Texas.

O cabeçalho adicionado pela interface MRFI no *MAC payload* é composto de dois bytes. O primeiro corresponde ao número de sequência do pacote de dados e o segundo indica o tipo de transmissão (Seguindo o padrão: 7E para pacotes de dados e 7F para pacotes de reconhecimento de transmissão). Como estas informações podem ser retiradas de subcampos do frame 802.15.4, o cabeçalho foi retirado para economizar o número de bytes transmitidos.

A compressão de pan foi adicionada retirando-se a área de identificação de “PAN de origem” (assumindo-se que está é a mesma que a PAN de destino) e alterando a área de “controle de frame” conformemente.

3.4 Descrição do Algoritmo do FCAM

3.4.1 Método de Integração

A integração da corrente medida ao longo do tempo é feita pelo circuito fiscalizador através de amostragens feitas pelo conversor analógico-digital do sinal convertido do CI RMS-DC no período de amostragem configurado.

Devido ao processador *Holtek* possuir apenas 96x8-bit de memória RAM e estar operando a uma frequência de 32.768Hz, a linearização por partes das medidas de corrente através de operações de multiplicação ou o uso de variáveis de ponto flutuante é inviável sem consumir uma parte razoável da memória ou apresentar um tempo computacional considerável. Por isso, foi adotado o método das bacias para a linearização por partes das medidas de corrente obtidas por possuir um esforço computacional menor.

O método da bacia faz uso de variáveis inteiras para a realização da integração dos valores medidos com possibilidade de ajuste da taxa de integração. O método faz uso de duas variáveis. Uma destas é usada como “bacia” para acumular o valor total medido enquanto a outra é incrementada a todo momento que a bacia “transborda” (ultrapassa seu valor limite) e serve como variável de integração.

O valor medido é somado a variável que serve de bacia até que esta ultrapasse um valor limite estipulado. Quando isso ocorre, a bacia é decrementada de seu valor limite (sobrando apenas o resto pelo qual o limite foi ultrapassado) e a variável de integração é incrementada até que a bacia fique abaixo do seu limite. Através do ajuste do tamanho limite da bacia, é possível controlar a taxa de integração sem o uso de operações multiplicativas.

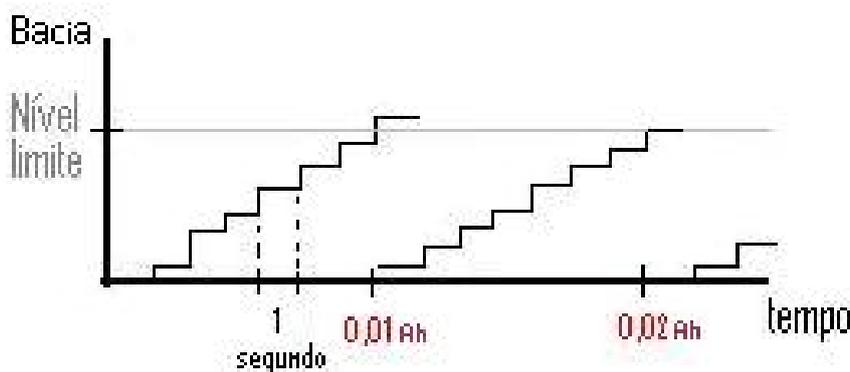


Figura 3.10: Princípio de funcionamento do método das bacias.

A linearização por partes das medidas de corrente do programa FCAM é feita pela separação dos valores medidos em faixas de integração com valores limites diferentes para a bacia acumuladora. Dependendo do valor medido, o tamanho limite

da bacia é escolhido de forma a alterar a taxa com que a medida é integrada (análogo a uma mudança da unidade de integração) e assim é possível compensar a não linearidade da variável medida sem multiplicar o valor medido por uma constante.

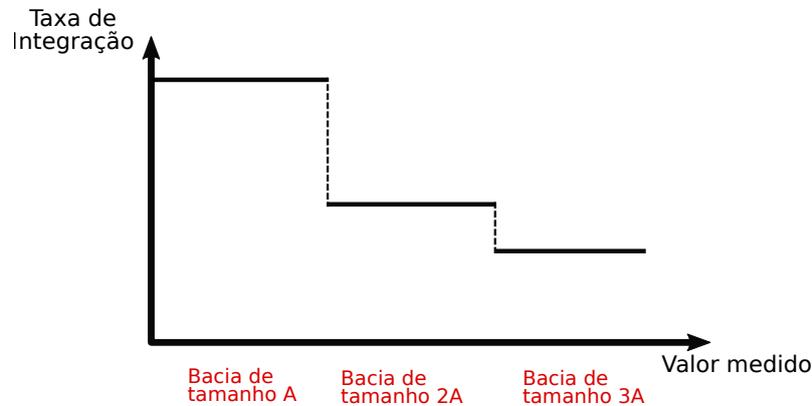


Figura 3.11: Princípio de separação das medidas em faixas de valores com taxas de integração diferentes.

Para o uso deste método, é importante que o valor medido apresente características de um sinal suave com baixa taxa de ruído. Caso contrário, corre-se o risco de um ruído ou mudança brusca e momentânea do sinal medido fazer com que um limite menor da bacia de integração seja usado onde grande parte do valor acumulado foi obtido por medidas em outra faixa de valores.

Portanto, para suavizar o sinal de corrente obtido e reduzir ruídos, as medidas passam por um filtro de média móvel que leva em consideração as últimas 4 medidas obtidas e fornece sua média como valor de saída.

3.4.2 Inicialização

Durante o processo de energização do módulo, diversas funções são chamadas as quais inicializam os valores das variáveis flag usadas, o clock do microcontrolador para 32MHz, a interrupção por baixa tensão, a interrupção por timer, configuram uma porta USART do microcontrolador para comunicação SPI com os periféricos e outra para uma comunicação assíncrona por Led, e definem quais pinos serão de entrada e quais serão de saída.

Para melhor praticidade, os parâmetros que são usados pelo *software* são carregados da memória EEPROM pela interface SPI durante o processo de inicialização. Isso permite que o *software* gravado no microcontrolador permaneça o mesmo e qualquer ajustes necessários devido a variações nas características dos componentes usados sejam gravados na EEPROM, assim como os parâmetros de calibração.

Os seguintes parâmetros do programa são colhidos da memória EEPROM:

- **Sample_Period_ms:** Período de tempo em ms entre as amostragens do ADC.
- **Transmit_Period_ms:** Período de tempo em ms entre as transmissões pelo rádio (deve ser um múltiplo do *Sample_Period_ms*).
- **Offset_Rms:** Valor a ser somado à medida para compensar os Offsets do RMS-DC, ADC e Amplificador Operacional.
- **Irms_Max_Off:** Corrente acima da qual o RMS será ligado (ADC + *Offset_Rms*).
- **Irms_Min_On:** Corrente abaixo da qual o RMS será desligado (ADC + *Offset_Rms*).
- **Cte_Baixa_Corrente_min_1:** Corrente integrada para operação abaixo de 2,7V e com RMS desligado.
- **Cte_Baixa_Corrente_min_2:** Corrente integrada para operação acima de 2,7V, mas abaixo de *Irms_Min_On* (com conversor RMS desligado).
- **Bacias de integração:** *Bacia_B0*, *Bacia_B1*, *Bacia_B2* e *Bacia_B3*.
- **Faixas de tensão de separação entre bacias:** *Ran_V1*, *Ran_V2*, *Ran_V3*.
- **CountLowVolt_Recov:** Quantidade de Amostragens a serem contadas para a recuperação do nível de tensão.

Outras configurações de funcionamento do *software* são determinadas por *jumbers* ligados a pinos de entrada da MCU. Estes são: o *jumper de calibração* e o *jumper de seleção de ADC*.

O modo de calibração do módulo permite que este transmita o valor obtido da conversão feita pelo ADC ao invés do valor integrado ao longo do tempo. As medidas colhidas podem então ser usadas na calibração dos valores ideais dos parâmetros (tamanho das bacias, faixas de tensão, etc) a serem gravados na EEPROM para serem usados pelo *software*.

O SOC CC2530 possui um ADC interno com 12 bits de precisão. O *jumper de seleção de ADC* permite que o *software* mude a sua rotina para utilizar o ADC interno ou o externo. Apesar de o ADC externo contar com 21 bits de precisão, este necessita de um período de 16 ms para realizar a conversão. Em contrapartida, o ADC interno realiza a conversão em apenas 132 μ s e permite uma economia de espaço e dinheiro por não necessitar de um ADC externo ao CC2530.

A inicialização do módulo de rádio ativa o receptor de sinal para gerar um número aleatório a partir do ruído ambiente para servir de semente inicial dos períodos de backoff aleatórios do algoritmo CSMA-CA. Devido ao consumo maior em função

da ativação do receptor de rádio, este deve esperar até que a operação do microcontrolador esteja acima de 2,7V para realizar sua inicialização. Após a inicialização do rádio durante o primeiro ciclo de operação acima de 2,7V, este fica desativado até que seja necessário realizar uma transmissão.

Após a inicialização, a MCU continua sua operação alternando entre dois modos: com alimentação acima de 2,7V e abaixo de 2,7V. O modo de operação é indicado pelo valor do *Above2V7_Flag*.

A tensão de alimentação abaixo de 2,7V é identificada por um detector de tensão (TC54VN) ligado a uma das entradas do microcontrolador. A transição negativa gerada pelo detector de tensão para uma tensão abaixo de 2,7V ativa uma rotina de interrupção no microcontrolador que salva os valores das variáveis de integração (*integrador* que faz o papel de bacia de integração e *Ah_Value* que contém o valor de energia medida) e limpa o *Above2V7_Flag* que indica o modo de operação da rotina.

3.4.3 Operação acima de 2,7V

No início do loop de operação, caso a variável *Above2V7_Flag* esteja ativada, o programa segue a rotina do operação de baixo consumo.

Por razões de economia de energia, a unidade de processamento permanece a maior parte do tempo em modo de baixo consumo. Uma interrupção é gerada pelo timer interno do microcontrolador a cada intervalo de tempo determinado pelo valor de *Sample_Period_ms* para a realização de um ciclo de processamento antes de voltar ao modo de baixo consumo. Um ciclo de processamento envolve: a coleta de dados do ADC através da interface SPI; a adição de um offset calibrado (*Offset_Rms*) para compensar o desvio de medição; passagem da medida por um filtro de média móvel; acumulação das medidas em uma bacia de tamanho variável para combater não-linearidades; incremento do valor de Ah medido ao se completar uma bacia; caso haja a necessidade de transmissão, converter para BCD o valor de Ah medido e transmiti-lo por radiofrequência usando o padrão 802.15.4 com CSMA-CA na faixa de 2,4GHz. O fluxograma do programa pode ser visto no Anexo A.

Para aumentar a precisão e combater a não-linearidade do transformador de núcleo dividido, uma técnica de segmentação foi utilizada. Bacias de integração de diferentes tamanhos são escolhidas de acordo com a corrente medida e uma unidade de medição de corrente (em cAh ou dAh) é adicionada à medida de consumo total cada vez que uma bacia é enchida completamente.

Devido ao microcontrolador CC2530 realizar as operações mais rapidamente que a versão anterior, modificações tiveram que ser realizadas no *software* de fiscalização. O ADC MCP3553 requer um intervalo de 16,67ms para realizar a sua conversão de

acordo com o seu *datasheet* [15]. Este tempo é excessivamente grande para manter a unidade processadora operando a 32MHz. Como solução, foi estipulado que esta deve enviar um sinal para o ADC iniciar a conversão e entrar em modo de baixo consumo por 20ms, para esperar a conversão ser completada. Como há apenas um timer sendo usado para acordar o processador do modo de baixo consumo, o período de amostragem foi dividido em dois períodos: inicialmente, o timer é configurado para acordar a MCU 20ms após o início da conversão pelo ADC, e depois ele é configurado para gerar a interrupção transcorrido *Sample_Period_ms* - 20ms após este instante. Essa rotina é ignorada caso o “jumper de seleção de ADC” não estiver configurado para o uso do ADC externo ou caso o fiscalizador esteja operando em modo de baixo consumo (abaixo de 2,7V).

3.4.4 Operação abaixo de 2,7V

No início do loop de operação, caso o valor do *Above2V7_Flag* seja nulo, o programa segue a rotina do operação de baixo consumo. Neste modo de operação, o consumo do circuito é configurado para ser o mínimo possível. O conversor RMS-DC é desligado, são suspensas quaisquer transmissões por rádio e não são feitas conversões pelo ADC. Um valor constante (*Cte_Baixa_Corrente_min_1*) calibrado conforme a corrente estimada da operação em baixa tensão é integrado à bacia de menor tamanho. O processamento é feito a cada período determinado por *Sample_Period_ms* e a saída do detector de tensão é medida para identificar se a tensão de alimentação está alta suficiente para realizar a mudança para o outro modo de operação.

Para prevenir a ativação excessiva da interrupção de armazenamento de dados na EEPROM, o sinal do detector de tensão é monitorado a cada ciclo e a mudança para o outro modo de operação somente é feita caso a tensão de alimentação se estabilize acima de 2,7V durante um número de ciclos de amostragem maior do que *CountLowVolt_Recov*.

3.5 Considerações Finais

Descreveu-se em maior detalhe o algoritmo e os modos de operação do fiscalizador. Foram apresentadas as mudanças feitas ambas em *hardware* e em *software* no projeto para a adequação ao uso do novo módulo de processamento e transmissão RF e as plataformas de desenvolvimento usadas para tal. Identificou-se que, devido ao menor consumo do módulo de rádio e menor duração do período de operação, não havia a necessidade do circuito de alimentação suplementar pelo supercapacitor, e portanto, este foi retirado do projeto.

4.2 Realização dos Experimentos

Para a realização dos testes, não foi possível encontrar um transformador para altas correntes, portanto um transformador de corrente de núcleo dividido com braçadeira foi usado como transformador principal (TC1). As medidas obtidas para a sua curva de carga com curto no secundário são apresentadas a seguir.

Tabela 4.1: Teste de corrente do TC1 de núcleo dividido com curto no secundário.

$I_{Primário}$ (A)	$I_{Secundário}$ (mA)
0,5	3,6
1	7,4
1,5	11,2
2	14,7
3	22,5
4	30,1
5	37,8
10	76,3
15	115,1

Devido a este ser um transformador com um núcleo magnético menor, espera-se que este não apresente capacidade para grandes correntes e apresente uma eficiência reduzida. Portanto, para os resultados experimentais que se seguem, vale considerar que um transformador de núcleo maior, como o que seria usado para altas correntes, talvez consiga uma corrente menor no primário para a mesma corrente de secundário.

Sendo o consumo do módulo de fiscalização uma das principais preocupações do projeto, o teste seguinte foi realizado na placa de avaliação fornecida pelo kit Texas.

Um resistor de 10Ω foi colocado em série à alimentação do módulo CC2530_EM para medir seu consumo durante os períodos de operação. Um pino de saída do microcontrolador foi configurado para ficar em nível lógico alto assim que a MCU inicia um ciclo de processamento e em nível lógico baixo assim que esta entra em modo de baixo consumo.

Nas imagens seguintes, o canal 2 do osciloscópio foi usado para capturar a tensão sobre o resistor de alimentação enquanto o sinal do pino de saída indicador de processamento foi conectado ao canal 1 e serviu de *trigger* para a captura do sinal. A forma de onda obtida nos fornece uma ideia da curva de carga que o módulo TI exige do circuito.

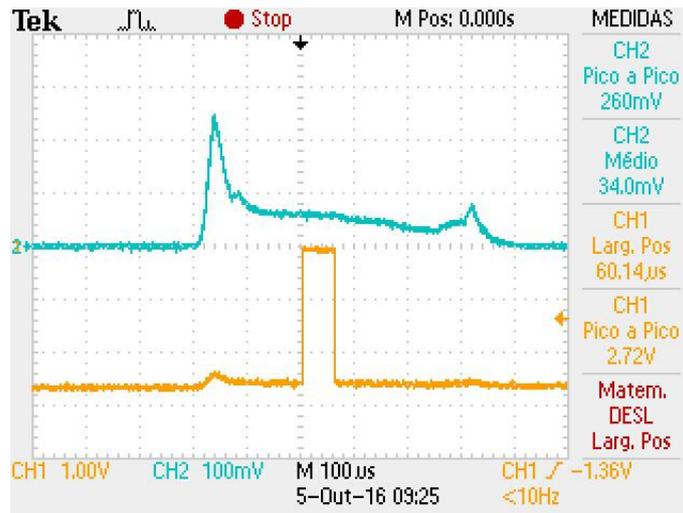


Figura 4.2: A curva de carga em baixo consumo durante operação abaixo de 2,7V.

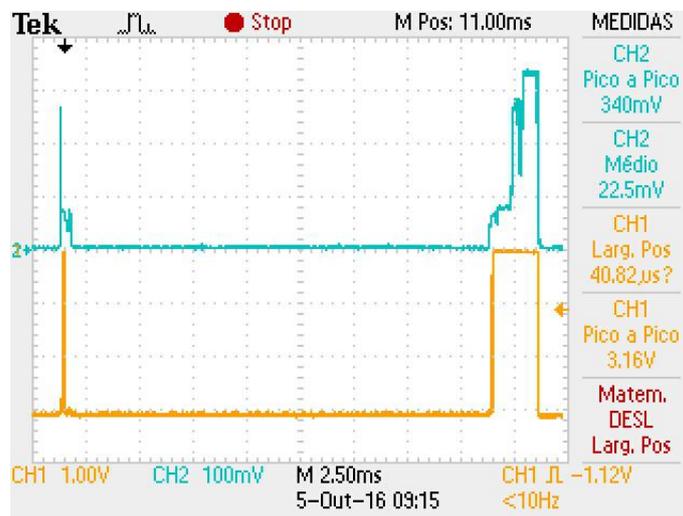


Figura 4.3: Curva de carga obtida pelo osciloscópio durante operação acima de 2,7V.

É possível observar os dois períodos de atividade que ocorrem a cada ciclo de processamento do algoritmo em sua operação acima de 2,7V: o primeiro, que inicia a conversão feita pelo ADC externo; e o segundo, que colhe os dados e os transmite.

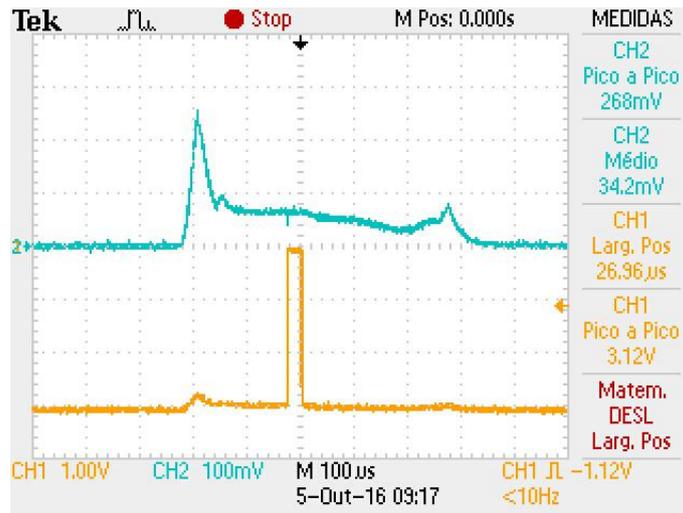


Figura 4.4: A curva de carga durante o envio do sinal de início de conversão para o ADC.

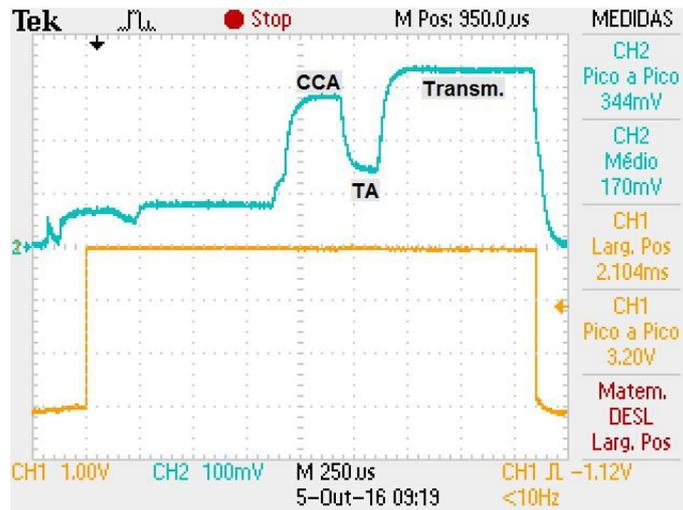


Figura 4.5: A curva de carga durante a transmissão 20ms após o início da conversão pelo ADC.

Identificou-se que o módulo CC2530_EM apresenta um pico de consumo quando este sai de seu estado de baixo consumo e somente depois de $180\mu\text{s}$ este inicia o processamento. O ciclo de processamento do envio do sinal de início de conversão ao ADC dura $27\mu\text{s}$. Após este, o processador leva $300\mu\text{s}$ para alcançar novamente o estado de baixo consumo.

Durante o ciclo de processamento da transmissão de dados o módulo CC2530_EM inicia o processamento a 16MHz consumindo 7mA. A troca para 32MHz é feita $250\mu\text{s}$ depois, na qual o módulo passa a consumir 8mA.

É possível observar o reflexo da execução do algoritmo CSMA-CA no consumo do módulo durante seu ciclo de transmissão. Inicialmente o receptor de rádio é ligado (consumindo 28mA) para a realização do CCA, seguidamente há um tempo

aleatório (TA) de espera escolhido pelo algoritmo onde o receptor é desligado antes da saída dos dados pelo transmissor de rádio (a um consumo de 34mA).

Após estes testes iniciais, verificou-se que o pico de consumo durante a transmissão de rádio era muito pequeno (tanto em duração quanto em amplitude) quando comparado com o modelo original do projeto para justificar o uso do supercapacitor. Além disso, o supercapacitor de 1 Farad apresenta desvantagens como seu alto tempo de recarga, o qual impede a transmissão imediata de dados após a energização do circuito devido a dependência do seu nível de tensão para transmissão pelo módulo XBee. Os capacitores de alimentação do microcontrolador foram mantidos. Estes constituem $160\mu\text{F}$ e mostraram-se suficientes para suportar o pico de consumo durante a transmissão. O resultado experimental apresentado na Figura 4.6 para o circuito do FCAM alimentado por 5,5mA no secundário do TC principal demonstra uma queda de 0,3V sobre os capacitores de alimentação do módulo CC2530 ($160\mu\text{F}$), no limiar da interrupção de baixa tensão.

Em seguida, o segundo canal foi usado para medir a tensão da fonte regulada do circuito de medição que alimenta o módulo CC2530 e os CIs periféricos do ADC e da EEPROM. O primeiro canal continuou medindo o pino de saída indicador de processamento.

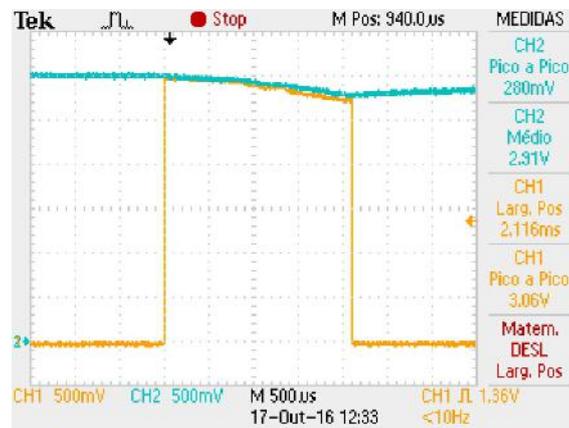


Figura 4.6: A tensão de alimentação do módulo durante a transmissão.

O teste foi realizado para uma corrente de 3A medida no enrolamento principal do TC e 5,5mA em seu enrolamento secundário. Observou-se que o TC principal é capaz de manter a corrente de processamento da MCU (7,5mA) sem que ocorra uma queda significativa na tensão de alimentação. Entretanto, durante o período de transmissão dos dados pelo rádio, nota-se uma queda de aproximadamente 300mV indicando este ser o limite mínimo da corrente de operação para garantir uma transmissão a cada ciclo de amostragem sem que ocorra a interrupção de baixa tensão de alimentação.

Posteriormente, para testar o caso de uma queda brusca da corrente que passa pelo TC principal, o primeiro canal do osciloscópio foi ligado ao CS da EEPROM e

usado como *trigger* enquanto o segundo canal foi ligado à tensão de alimentação para observar a que ponto abaixo de 2,7V esta decai até que os dados de medição sejam salvos. A alimentação foi cortada bruscamente através de uma chave de contato.

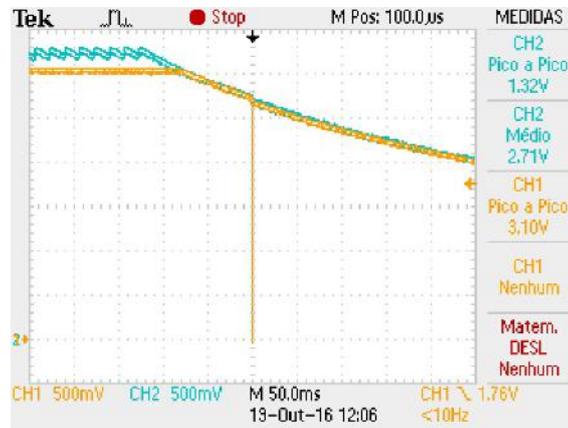


Figura 4.7: Gravação de dados na EEPROM devido à interrupção por queda de tensão.

Constata-se que, 50ms após a gravação dos dados devido à interrupção de baixa tensão, a tensão de alimentação decai por volta de 200mV. Isso mostra que foi gerado uma margem de tensão de pelo menos 0,7V para a gravação dos dados na EEPROM visto que a tensão de operação mínima da AT25640 é de 1,8V e esta possui um ciclo de escrita de 20ms. Em seguida, o primeiro canal do osciloscópio foi ligado ao pino MOSI para a visualização mais próxima da transmissão dos dados pela interface SPI.

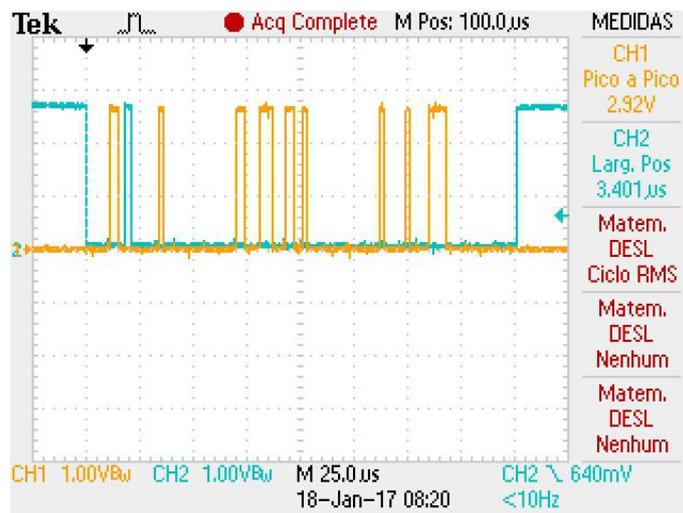


Figura 4.8: Visualização do pino CS e MOSI durante o processo de gravação dos dados de medição na EEPROM.

Observa-se que o processo de gravação dos dados na EEPROM leva ao todo 200µs. No total, são enviados 11 bytes à EEPROM: o byte de instrução de habilitação de escrita (WREN de código hexadecimal 0x06); o byte de instrução de

escrita (WRITE de código hexadecimal 0x04); 2 bytes de endereço de memória onde os dados serão gravados (neste caso eles são gravados iniciando-se no endereço de posição 0 da EEPROM); e os 8 bytes de dados (4 para a variável integradora e 4 para variável que faz o papel de bacia).

Inicialmente a instrução de habilitação de escrita (WREN) é enviada, o sinal do CS é alternado por um período de $3,4\mu\text{s}$ (dentro da especificação mínima da EEPROM de $2\mu\text{s}$) e, em seguida, a instrução de escrita (WRITE) acompanhada do endereço de memória de 2 bytes onde os dados serão gravados. Após isso, os 8 bytes de medidas são enviados de forma sequencial. Foi possível confirmar a transmissão dos bits no formato MSB primeiro e LSB por ultimo a uma taxa de 500kbps como especificado.

Para o teste da fonte auxiliar com interface óptica, metade de um TC de núcleo dividido com um enrolamento ligado a um gerador de sinais fornece energia ao circuito enquanto nenhuma corrente passa pelo transformador de corrente principal (TC 1). O meio núcleo é aproximado de sua outra metade no circuito que contém o enrolamento secundário como apresentado na Figura 2.7 e o gerador de sinais é configurado para gerar uma onda de forma quadrada de frequência 10kHz e amplitude 10V. O osciloscópio é conectado à alimentação retificada obtida do TC auxiliar em seu primeiro canal, e ao sinal de saída que vai ao Led em seu segundo canal. O sinal transmitido pela UART é ligado ao catodo do Led de forma que o estado de alta tensão apaga o Led e o sinal de baixa tensão o acende.

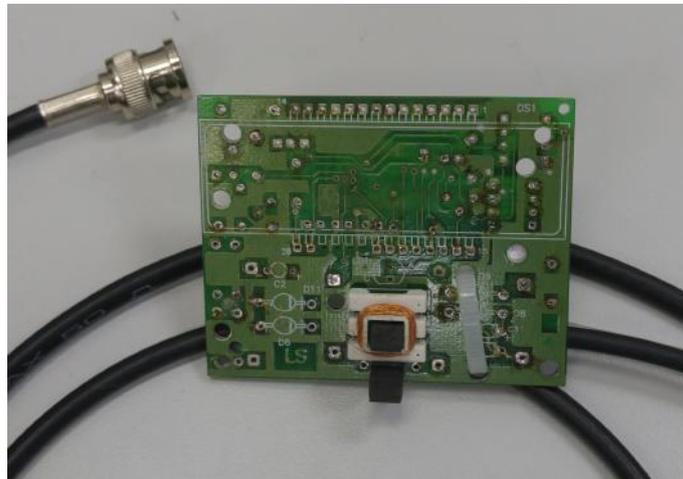


Figura 4.9: Imagem do enrolamento com meio núcleo de um TC.

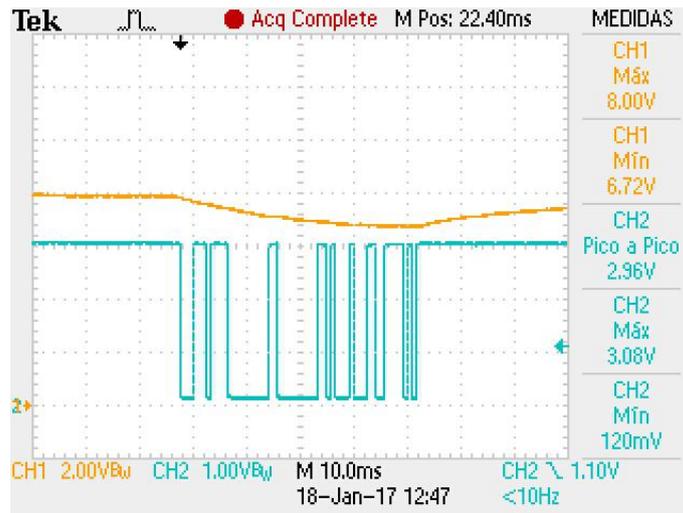


Figura 4.10: Imagem capturada pelo osciloscópio da saída da UART para a transmissão por Led.

O sinal capturado mostrou um *bug* reconhecido pela fabricante do microcontrolador onde, apesar da configuração para apenas 1 bit de pausa, pode-se observar no sinal 2 bits de pausa para cada byte transmitido. Foi possível confirmar a taxa de transmissão de 1200bps com LSB primeiro e MSB por ultimo pelo tempo que levou a transmissão e pela identificação do primeiro byte que faz parte do cabeçalho do pacote de dados do projeto (neste caso, 0xDC para transmissão da medida em dAh).

Para o teste de compatibilidade entre o pacote de dados transmitido pelo módulo CC2530 e o módulo XBee usado anteriormente, um *dongle* com módulo XBee foi usado conectado a um computador. Este recebe dados enviados pelo protótipo do FCAM com o CC2530 e os transmite pela porta serial USB usando a API do módulo XBee. Os dados serializados na porta USB são capturados e exibidos pelo programa Hterm.



Figura 4.11: *Dongle* com módulo XBee usado na captura de dados transmitidos pelo FCAM.

Received Data													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
7E	00	0A	81	43	C1	50	06	DA	00	00	11	17	22
7E	00	0A	81	43	C1	55	06	DA	00	00	11	93	A1
7E	00	0A	81	43	C1	52	06	DC	00	00	44	23	DF
7E	00	0A	81	43	C1	52	06	DC	00	00	44	24	DE
7E	00	0A	81	43	C1	55	06	DC	00	00	44	26	D9
7E	00	0A	81	43	C1	50	06	DC	00	00	44	27	DD
7E	00	0A	81	43	C1	55	06	DC	00	00	44	29	D6
7E	00	0A	81	43	C1	58	06	DC	00	00	44	43	B9

Figura 4.12: Dados recebidos pelo *dongle* com módulo XBee e lidos pela interface USB com o programa *HTerm*.

Em seguida foi feito o teste com o programa de aferição desenvolvido no Cepel descrito na seção 3.2. O programa capta dados serializados pelo *Dongle* XBee identificando sua API e gerando um gráfico com os dados obtidos. Devido ao protótipo atualizado ainda não ter sido calibrado, as medidas feitas não refletem os valores reais gerados pela fonte de corrente experimental. Portanto, buscou-se apenas a consistência entre os valores integrados visualizados no gráfico gerado pelo programa de aferição e os valores de corrente que foram fornecidos pela fonte experimental.

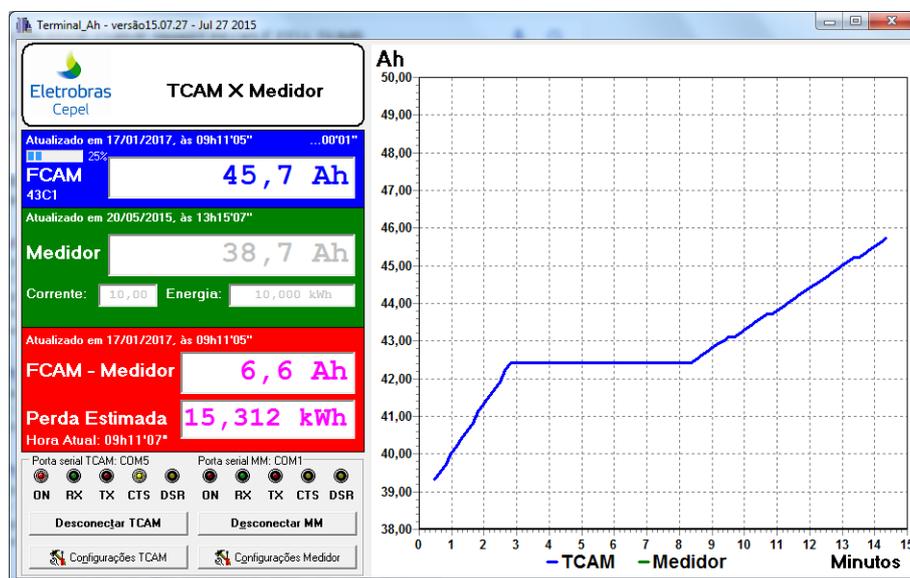


Figura 4.13: Tela do programa de aferição desenvolvido pelo Cepel.

Na imagem 4.13, foi possível observar o funcionamento do protótipo atualizado em sua função de integrar o valor medido. A fonte de corrente experimental é inicialmente configurada para uma determinada corrente, é desligada por um período de 6 minutos, e volta a ser ligada fornecendo uma corrente menor que a configurada inicialmente. Este comportamento é refletido na inclinação das retas onde espera-

se uma inclinação mais acentuada quanto maiores forem os valores de correntes medidos.

O resultado coincide com o comportamento esperado confirmando que o processo de aquisição da medida pelo ADC, integração em bacias e a transmissão pelo protótipo funcionam da forma esperada e necessitam apenas de ajustes e calibrações. Também confirmou-se a retenção dos dados medidos na EEPROM pelo processo de salvamento por interrupção de baixa tensão e leitura dos dados salvos no processo de inicialização.

4.3 Observações dos Resultados Experimentais

A análise dos resultados experimentais demonstraram um aumento da velocidade de coleta e processamento dos dados pelo fiscalizador. Com o tempo operacional total de um ciclo de amostragem e transmissão de apenas 2,125ms este é consideravelmente menor do que o tempo exigido pelo protótipo anterior (87ms). Consequentemente, seu consumo também foi reduzido a um consumo estimado de 16nAh por ciclo (ao integrar a área em baixo da curva de carga sobre o resistor de alimentação medida pelo osciloscópio) menor do que 819nAh por ciclo consumido apenas pelo módulo XBee na versão anterior (50mA em modo idle por 59ms após sua inicialização). A redução do pico de carga levou à retirada do supercapacitor e seu circuito de carga e os experimentos confirmaram a sua capacidade do fiscalizador funcionar sem este.

Com a retirada do supercapacitor, há de se considerar a futura retirada do tempo de recuperação da fonte representada pelo número de ciclos *CountLowVolt_Recov*, uma vez que esta foi incluída para permitir a recarga parcial do supercapacitor e não seria mais necessária para capacitores de alimentação menores.

Durante os experimentos, observou-se um desbalanceamento da fonte retificadora de meia onda uma vez que a tensão de alimentação positiva foi usada para sustentar o CC2530 e todos os seus periféricos e componentes do circuito, enquanto a tensão de alimentação negativa foi usada apenas como uma fonte de referência negativa para o conversor RMS-DC possuindo portanto, um consumo menor. Este desbalanceamento levou à consideração de modificar a fonte do circuito para uma retificadora dobradora de tensão de onda completa possibilitando a redução da corrente mínima de operação à metade da atual.

Foi testado com sucesso o funcionamento das interfaces seriais testando-se a ordem e velocidade de serialização dos bits e a sua interpretação pelos periféricos.

Finalmente, o fiscalizador mostrou-se capaz de distinguir entre diferentes valores de correntes e reagir em tempo de operação a mudanças no *jumper* de calibração.

Capítulo 5

Conclusões

O objetivo proposto foi alcançado com a substituição de *hardware* do módulo de processamento e de rádio do FCAM pelo módulo CC2530. Com isso, este trabalho contribuiu na proteção do projeto do fiscalizador contra a possível obsolescência de seus componentes e na expansão de fornecedores de componentes viáveis para sua construção.

Os experimentos mostraram uma economia de componentes, tempo de processamento, consumo de energia e volume total do circuito fiscalizador. Estas economias atenderam os objetivos almejados por este trabalho na atualização do FCAM e ampliação da sua funcionalidade.

As maiores capacidades de processamento do novo microcontrolador leva à consideração de futuras mudanças no *software*. A capacidade de recepção da nova versão trás a possibilidade de implementação de confirmação de recebimento de pacotes de dados e a configuração e ajuste de parâmetros de operação em tempo de operação em um modo de calibração que podem ser gravados na memória pelo próprio microcontrolador. Sua capacidade de recebimento também permite que, em versões futuras, os fiscalizadores se comuniquem entre si em uma rede integrada à rede elétrica inteligente.

Referências Bibliográficas

- [1] ANEEL. *Metodologia de tratamento regulatório para perdas não técnicas de energia elétrica*. Nota Técnica 106/2015-SGT/SRM/ANEEL, ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Regulação Econômica – SRE SGAN 603 / Módulo “I” – 1º andar, Abr. 2015.
- [2] SOUZA, F. C., BANDIM, C. J., ALVES JUNIOR, J. E. R., et al. “Combate às perdas não-técnicas no Brasil: tecnologia e inovação como ferramentas de efficientização”. In: *XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Anais do XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, Nov. 2009.
- [3] CEPTEL. “Cepel instala primeiros protótipos de Fiscalizador de Corrente Auto-monitorado”. Ago. 2016. Disponível em: <<http://www.cepel.br/sala-de-imprensa/noticias/menu/noticias/cepel-instala-primeiros-prototipos-de-fiscalizador-de-corrente-automonitorado.htm>>. Acessado em: 02/12/2016.
- [4] DE MEDEIROS FILHO, S. *Medição de Energia Elétrica*. 2 ed. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 1980.
- [5] ELECTRONICS ENGINEERING HERALD. “Free online course on Embedded Systems”. Disponível em: <<http://www.eeherald.com/section/design-guide/esmod.html>>. Acessado em: 28/08/2016.
- [6] IEEE. “IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”, *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, pp. 1–320, Set. 2006. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.232110.
- [7] MATHIAS, A. P. “DFWMAC-DCF básico (CSMA/CA)”. Nov. 2000. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/00_2/ieee/CSMA.htm>. Acessado em: 28/11/2016.
- [8] HOLTEK. *HT49R30A-1/HT49C30-1/HT49C30L LCD Type 8-Bit MCU*, Jul. 2012. Rev. 2.10.

- [9] TEXAS INSTRUMENTS. *A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications*, Abr. 2009. Revisado em fevereiro de 2011.
- [10] ROBOT ROOM. “Timing Errors in Serial Communication”. Disponível em: <http://www.robotroom.com/Asynchronous-Serial-Communication-2.html>>. Acessado em: 24/01/2017.
- [11] DA CUNHA LUIZ, F. *Sistema de Calibração de Energia Sem Fio Usando ZigBee*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [12] DIGI INTERNATIONAL. *XBee®/XBee-PRO® RF Modules*, Fev. 2014. 90000982_N.
- [13] BERQUÓ, D. F. *Transformador de Corrente Auto-monitorado com Transmissor de Dados sem Fio*. Trabalho de conclusão de curso em engenharia elétrica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Jan. 2014.
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *CC253x System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee® Applications*, Abr. 2009. SWRU191F.
- [15] MICROCHIP. *Low-Power, Single-Channel 22-Bit Delta-Sigma ADCs*, Mar. 2014. DS20001950F.
- [16] ATMEL. *SPI Serial EEPROMs AT25080/160/320/640*, Jun. 2012. 0675M-SEEPR-9/03.

Apêndice A

Fluxograma do Algoritmo

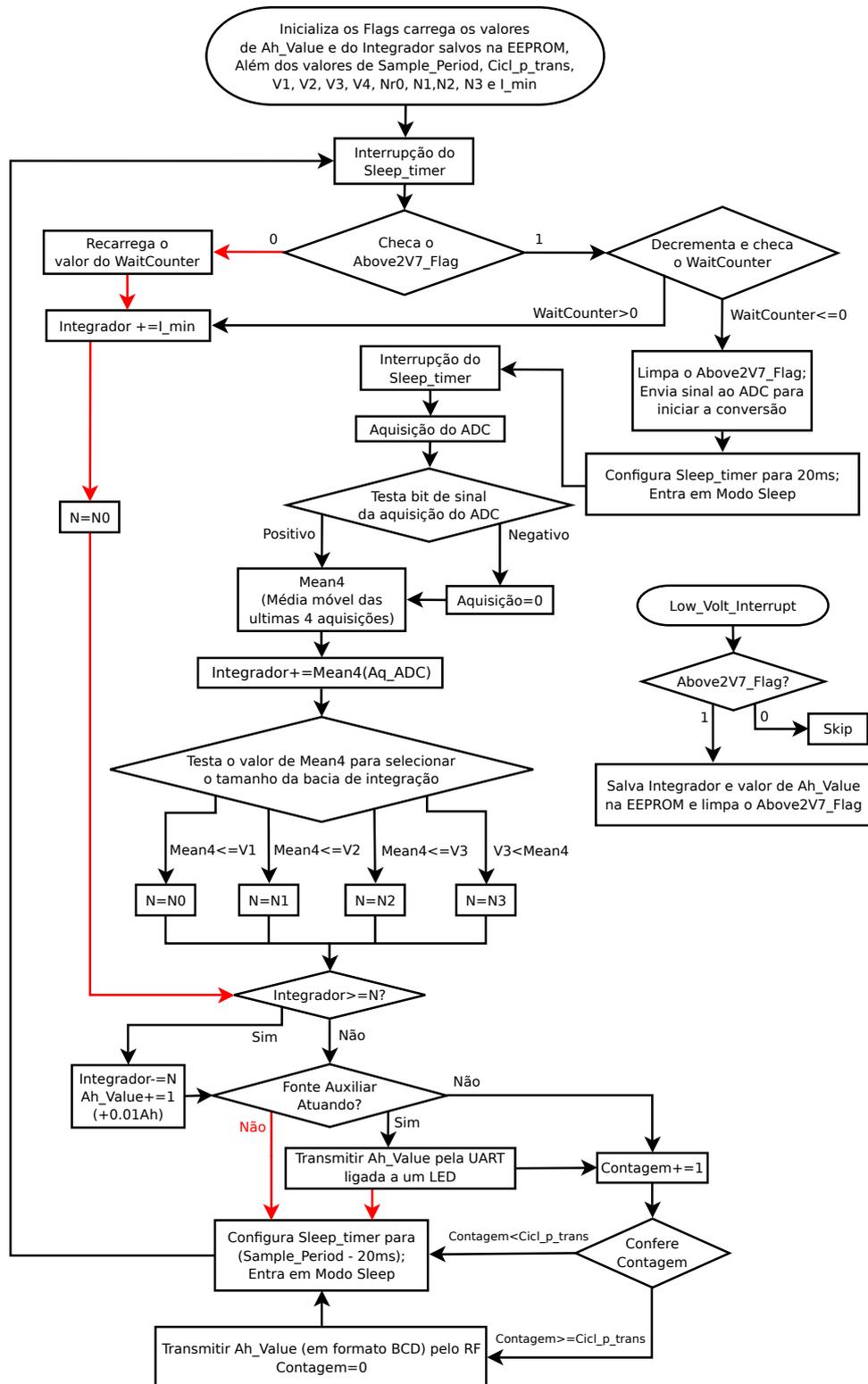


Figura A.1: Fluxograma do programa do FCAM.