

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – MESTRADO

JOÃO CARLOS SILVA DOS SANTOS

**SISTEMA DE MONITORAMENTO BASEADO EM IDENTIFICAÇÃO POR
RADIOFREQUÊNCIA (RFID) PARA CADEIA FRIA FARMACÊUTICA**

PORTO ALEGRE

2015

SISTEMA DE MONITORAMENTO BASEADO EM IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA (RFID) PARA CADEIA FRIA FARMACÊUTICA

Dissertação apresentada como
requisito para obtenção do grau de Mestre
pelo Programa de Pós-Graduação da
Faculdade de Engenharia Elétrica da
Pontifícia Universidade Católica do Rio
Grande do Sul

ORIENTADORA: Prof.^a Dr.^a Marlise Araujo dos Santos

CO-ORIENTADORA: Prof.^a Dr.^a Maria Cristina Felippetto de Castro

Porto Alegre

2015

FOLHA DE APROVAÇÃO



SISTEMA DE MONITORAMENTO BASEADO EM IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA (RFID) PARA CADEIA FRIA FARMACÊUTICA

CANDIDATO: JOÃO CARLOS SILVA DOS SANTOS

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DRA. MARLISE ARAÚJO DOS SANTOS - ORIENTADORA



DRA. MARIA CRISTINA F. DE CASTRO - CO-ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA



DRA. TEMIS WEBER FURLANETTO CORTE - DA FACULDADE DE FARMÁCIA - PUCRS



DR. FERNANDO CÉSAR COMPARSI DE CASTRO - PPGE - FENG - PUCRS



DRA. THAIS RUSSOMANO - PPGE - FENG - PUCRS

AGRADECIMENTOS

Às professoras Marlise Araujo dos Santos e Maria Cristina Felippetto de Castro pela paciência e orientação neste trabalho.

À empresa WaveTech Soluções Tecnológicas por oferecer o suporte financeiro e equipamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa RFIDO Design por auxiliar no desenvolvimento da antena através do seu programa universitário.

Ao programa PROBOLSAS da PUCRS pela concessão da bolsa e apoio financeiro concedidos no início do mestrado.

A Natan Grando, Rodrigo Travessini e Romano Weirich pelo companheirismo, incentivo, empenho e suporte essenciais para a sua realização.

A Francisco Osman Oliveira Gomes pelo apoio, incentivo, e disponibilidade na realização deste trabalho.

A Leticia Gabriel Abdala por sua paciência, companheirismo e compreensão em diversos momentos difíceis durante este processo.

À minha família e amigos pela compreensão e participação ao longo de toda a trajetória.

RESUMO

A área da saúde possui diversos insumos que exigem cuidados especiais, os quais incluem um correto manuseio em ambiente monitorado e controlado durante todo o processo de produção, transporte e armazenagem. Dentre estes insumos podemos destacar os medicamentos sensíveis a variações de temperatura, os quais precisam ser mantidos resfriados durante todo esse processo até serem administrados no paciente. Esses cuidados são extremamente importantes para manter a integridade físico-química do medicamento, prevenindo seu descarte desnecessário devido deterioração ou inativação e evitando possíveis danos ao paciente. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para a cadeia fria farmacêutica baseada em RFID para ser utilizado durante o transporte e armazenagem dos medicamentos antes da administração nos pacientes. O sistema é composto por leitoras de RFID, *tags* passivas, *tags* semi-passivas acopladas com sensores (BAP *tags*), um banco de dados e um servidor web remoto. Para viabilizar a concepção do sistema uma BAP *tag* foi desenvolvida para monitorar as condições de temperatura durante o transporte e armazenagem dos produtos, utilizando técnicas de ultrabaixo consumo e uma gestão inteligente de memória. Os resultados demonstram que a BAP *tag* desenvolvida consome apenas 0,1 μA no modo *Sleep* e 3,28 μA no modo Ativo, tem uma alta sensibilidade de -27 dBm e pode armazenar até 32,7 k amostras de temperatura em uma memória de 128 kbits. Com este perfil de consumo, a BAP *tag* pode monitorar continuamente a temperatura por até 7 anos seguidos sem substituição da bateria com um intervalo de amostragem de 5 minutos. Além da BAP *tag*, dois softwares para leitoras de RFID foram desenvolvidos para serem utilizados em conjunto com a BAP *tag* mencionada, enviando os dados de monitoramento ao servidor remoto.

Palavras-chave: RFID, RFID semi-passiva com sensor, *data logger* de temperatura, baixo consumo, cadeia fria farmacêutica.

ABSTRACT

The healthcare has several goods that require special care, which include a correct handling in monitored and controlled environment throughout the production, transport and storage processes. Among these goods we can highlight temperature-sensitive drugs, which need to be kept cold throughout the whole process until be administered to the patient. These precautions are extremely important to maintain the physical and chemical integrity of the medication, preventing unnecessary waste due to its deterioration or inactivation, and avoiding possible damage to the patient. This work proposes the development of a monitoring system for the pharmaceutical cold chain based on RFID to be used during transport and storage of drugs prior to administration in patients. The system consists of RFID readers, passive tags, semi-passive tags coupled with sensors (BAP tags), a database and a remote web server. To collaborate with the system conception, a BAP tag was developed to monitor temperature conditions during transport and storage of products, using ultra-low power techniques and smart memory management. The results demonstrate that the developed BAP tag consumes only 0.1 μA in Sleep mode and 3.28 μA in Active mode, it has a high sensitivity of -27 dBm and it can store up to 32.7 k temperature samples in a 128 kbits memory. With this consumption profile, BAP tag can continuously monitor temperature for up to 7 years without battery replacement with a 5 minute sampling interval. In addition to the BAP tag, two software for RFID readers have been developed for use in conjunction with the mentioned BAP tag, sending the monitoring data to the remote server.

Key Words: RFID pharmaceutical cold chain, sensor-enabled BAP *tag*, temperature data logger, low power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Variação da temperatura ambiente em um almoxarifado catarinense	19
Figura 2. Variação da umidade ambiente em um almoxarifado catarinense.....	19
Figura 3. Formulário de controle de temperatura do hospital Badim.....	20
Figura 4. Projeção do mercado de biofármacos de 2012 a 2018.....	22
Figura 5. Leitor e <i>Tag</i> UHF RFID	23
Figura 6. Modelo MVP.....	33
Figura 7. Sistema Monitoramento para cadeia fria de medicamentos.....	36
Figura 8. Metodologia Adotada.....	38
Figura 9. Fluxo de desenvolvimento da <i>tag</i>	39
Figura 10. BAP Tipo 1	40
Figura 11. BAP Tipo 2	40
Figura 12. BAP Tipo 3	40
Figura 13. BAP Tipo 4	40
Figura 14. Resultados da medida do sensor EM4325 para 96 chips calibrados.....	41
Figura 15. Consumo energia do μ C por modo de operação	44
Figura 16. Esquemático do protótipo inicial da BAP Tipo 1	45
Figura 17. Ambiente de desenvolvimento.....	46
Figura 18. Kits de desenvolvimento	47
Figura 19. Comunicação SPI entre o EM4325 e o μ C	47
Figura 20. Protótipo da segunda versão feito na fresadora.....	48
Figura 21. Esquemático do segundo protótipo - BAP Tipo 3	49
Figura 22. Protótipo Inicial BAP Tipo 1	50
Figura 23. Segundo protótipo BAP Tipo 3.....	50
Figura 24. Fluxo de desenvolvimento do <i>software</i> do μ C.....	51
Figura 25. Máquina de Estado da <i>Tag</i> no Modo Linear.....	55
Figura 26. Máquina de Estados da <i>Tag</i> no Modo Circular.....	56
Figura 27. Fluxo de download dos dados do μ C para RFID	61
Figura 28. Autonomia da bateria para diferentes modos de monitoramento.....	64
Figura 29. Kit de desenvolvimento MSP420 e o MSP-FET	65
Figura 30. Estimativa de consumo pelo EnergyTracer do CCS	66
Figura 31. Distribuições de temperatura utilizadas	68
Figura 32. Comparação das formas de gravação em memória	68

Figura 33. Distribuição normal de temperatura para os modos de gravação: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$	69
Figura 34. Motorola MC9190-z.....	70
Figura 35. AretePop.....	70
Figura 36. Estrutura de pastas do padrão MVP desenvolvido.....	72
Figura 37. Estrutura das classes seguindo o MVP.....	72
Figura 38. Herança das classes seguindo o modelo apresentado	73
Figura 39. AretePop Inventariado, Setup e Viewer.....	75
Figura 40. Sensitividade do protótipo inicial.....	76
Figura 41. Sensibilidade do segundo protótipo	77
Figura 42. Perda <i>mismatch</i> entre EM4325 e antena no protótipo inicial	78
Figura 43. Medida de consumo de energia da BAP Tipo 3.....	81
Figura 44. Tela do site para visualização dos dados do sistema.....	82
Figura 45. Exemplo de pacotes SPI entre μC e RFID.....	85
Figura 46. Medidas do tempo de transmissão e recepção da comunicação SPI.....	85
Figura 47. Intervalo de requisições do AretePop	86
Figura 48. Circuito de amplificação para o sinal Aux	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Mapa de temperaturas do transporte de fármacos nos EUA	21
Quadro 2. Princípios, vantagens e desvantagens dos sistemas de monitoramento de temperatura existentes.	27
Quadro 3. Resumo e Comparação de Desempenho de <i>Smart Tags</i>	30
Quadro 4. Análise de mercado de alguns <i>data loggers</i> existentes.	32
Quadro 5. Exemplo Modo Fixo Normal.....	59
Quadro 6. Exemplo Modo Relativo Normal	59
Quadro 7. Exemplo Modo Fixo Circular.....	59
Quadro 8. Exemplo Modo Relativo Circular.....	59
Quadro 9. Comando proprietário EM4325 do leitor para <i>tag</i>	74
Quadro 10. SPI Packet do comando SendSPI.	74
Quadro 11. Resposta do comando proprietário SendSPI da <i>Tag</i> para Leitor.....	75
Quadro 12. Comparação de outras Smart Tags com este trabalho.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Chips de RFID com interface para microcontroladores	42
Tabela 2. Lista de componentes e seus preços para o segundo protótipo	48
Tabela 3. Configurações do EM4325	50
Tabela 4. Valores para representação dos dados do tipo relativo.....	53
Tabela 5. Comparação dos modos relativos	54
Tabela 6. Cálculo da data do evento do tipo Intermitente	54
Tabela 7. Exemplo memória no modo relativo circular	60
Tabela 8. Reconstrução de temperaturas no modo circular relativo.....	60
Tabela 9. Estimativa de consumo de energia <i>in-shelf</i>	62
Tabela 10. Estimativa de consumo de energia durante monitoramento	62
Tabela 11. Estimativa de consumo de acordo com <i>EnergyTracer</i>	66
Tabela 12. Sensibilidade teórica protótipo inicial	77
Tabela 13. Comparação entre as BAP <i>tags</i> desenvolvidas.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	-	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BAP	-	<i>Battery Assisted Passive RFID Tag</i>
CCS	-	<i>Code Composer Studio</i>
CCS	-	<i>Code Composer Studio</i>
EAN/GTIN13	-	<i>International Article Number barcode</i>
EEPROM	-	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
FDA	-	<i>Food and Drug Administration</i>
FSM	-	<i>Finite State Machine</i>
I ² C	-	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICH	-	<i>International Conference Harmonization</i>
JTAG	-	<i>Joint Test Action Group</i>
LAN	-	<i>Local Area Network</i>
MTP	-	<i>Multiple-Time Programmable</i>
MVC	-	<i>Model-View-Controller</i>
MVP	-	<i>Model-View-Presenter</i>
NFC	-	<i>Near Field Communication</i>
NVM	-	<i>Non-Volatile Memory</i>
OTP	-	<i>One-Time Programmable Memory</i>
RFID	-	<i>Radio Frequency Identification</i>
SoC	-	<i>System on Chip</i>
SPI	-	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	-	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	-	<i>Universal Serial Bus</i>
UTC	-	<i>Coordinated Universal Time</i>
WHO	-	<i>World Health Organization</i>
WSN	-	<i>Wireless Sensor Networks</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

Comun.	-	Comunicação
Dist.	-	Distância
Semi.	-	Semi-passiva
Sensib.	-	Sensibilidade
Temp.	-	Temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

μA	-	Microampères
μC	-	Microcontrolador
μV	-	Micro-voltage
μW	-	Microwatts
dBm	-	miliDecibel

SUMÁRIO

1. Introdução	16
2. Fundamentação Teórica.....	18
2.1. Insumos na Saúde.....	18
2.2. Identificação por Radiofrequência.....	23
2.3. Microcontroladores e Sensores	24
2.4. Alternativas Disponíveis para Monitoramento de Temperatura em Mercadorias	25
2.4.1. <i>Data loggers</i> utilizados nas referências bibliográficas consultadas	28
2.4.2. <i>Data loggers</i> disponíveis no Mercado	31
2.5. Padrão de Desenvolvimento de Software MVP.....	33
3. Sistema de Monitoramento Baseado em RFID para Cadeia Fria Farmacêutica.....	34
3.1. Justificativa	34
3.2. Objetivo Geral.....	37
3.3. Objetivos Específicos.....	37
4. Materiais e Métodos.....	38
4.1. Desenvolvimento da <i>Tag</i> Semi-passiva – BAP <i>Tag</i>	38
4.1.1. Arquiteturas das BAPs.....	39
4.1.2. Escolha do RFID.....	40
4.1.3. Escolha do Microcontrolador.....	43
4.1.4. Protótipo Inicial - BAP Tipo 1.....	44
4.1.5. Design da Antena.....	45
4.1.6. Comunicação entre RFID e Microcontrolador	46
4.1.7. Segundo Protótipo – BAP Tipo 3	47
4.2. Desenvolvimento do Software Microcontrolador.....	51
4.2.1. Formas de gravação	52
4.2.2. Modo Linear	55

4.2.3. Modo Circular.....	56
4.2.4. <i>Download</i> dos Dados do μ C para o RFID.....	61
4.3. Modelos de Estimativa do Consumo de Energia das BAPs Tags.....	61
4.3.1. Estimativas de Consumo através do CCS.....	65
4.4. Modelo das Formas de Gravação.....	67
4.5. -Desenvolvimento do Software da Leitora	69
4.5.1. Escolha da leitora.....	69
4.5.2. Arquitetura dos Softwares das Leitoras	70
5. Resultados e Discussão.....	76
5.1. Testes e Medidas de Sensibilidade das BAP Tags.....	76
5.1.1. Testes do Perfil de Consumo - BAP Tipo 3.....	80
5.1.2. Testes do Software da Leitora	81
5.2. Problemas Comunicação entre BAP <i>Tag</i> e Leitora	83
5.2.1. Problemas com a Leitora MC9190-Z	83
5.2.2. Problemas com o SendSPI da Leitora AretePop	83
5.3. Problemas e Observações Relacionados à BAP <i>tag</i>	87
5.3.1. A flag Aux do RFID para o Microcontrolador	87
5.3.2. Desenvolvimento da BAP Tipo 4	88
5.3.3. Problema do ano 2038	88
5.4. <i>Data logger</i> Desenvolvido vs Data Loggers existentes	89
5.5. Sistema Desenvolvido VS Sistemas existentes.....	91
6. Conclusões.....	92
6.1. Trabalhos Futuros	93
Referências Bibliográficas.....	95

1. INTRODUÇÃO

A área da saúde possui diversos insumos que exigem cuidados especiais, os quais incluem um correto manuseio em ambiente monitorado e controlado durante todo o processo de produção, transporte e armazenagem. Alguns desses insumos são sensíveis a variações de temperatura, comumente chamados de insumos da cadeia fria, e precisam ser mantidos resfriados durante todo esse processo até serem administrados no paciente (RAPKIEWICZ e GROBE, 2014). Esses cuidados são extremamente necessários para manter a integridade físico-química de cada insumo. No caso dos medicamentos, eles podem perder sua eficácia se submetidos a transporte e/ou à estocagem inadequados, ocasionando sua deterioração ou inativação e, desta forma, terem que ser descartados e não administrados no paciente, resultando, conseqüentemente, em desperdício.

Além do monitoramento do ambiente, existe a necessidade de gerenciar o estoque destes insumos, evitando desperdícios de produtos devido a prazos de validade vencidos ou até mesmo à falta de produtos no estoque (LIRA, 2013). Um controle de estoque eficiente depende de uma contagem contínua dos produtos disponíveis, chamada de inventário; porém isto demanda tempo e dinheiro, que poderiam ser reduzidos se um sistema inteligente e automatizado fosse utilizado (LIRA, 2013).

Os medicamentos estão sujeitos à falsificação, prática muito comum no Brasil e nos países que não possuem um controle rígido na distribuição destes produtos. O órgão governamental dos Estados Unidos da América (EUA) chamado FDA (do inglês, *Food and Drug Administration*), responsável pelo controle de medicamentos e alimentos, definiu uma série de regras para evitar estas situações. Dentre elas, pode-se citar a criação do *e-pedigree* (do inglês, *eletronic-pedigree*) que serve como comprovação de origem do medicamento/insumo (FOOD AND DRUG ADMINISTRATION, 2006). No Brasil, foi criado pelo governo federal o Sistema Nacional de Controle de Medicamentos, um mecanismo para gerenciar e controlar os medicamentos durante toda a cadeia de distribuição, que engloba o uso de códigos de barras EAN/GTIN13, o qual permite a identificação do número do lote, data de fabricação e validade, juntamente com informações coletadas ao longo do processo, as quais são enviadas para um servidor público central. Desta forma as farmácias podem realizar o rastreamento do medicamento através de um *software* integrado com o servidor (CONGRESSO NACIONAL BRASILEIRO, 2002).

Embora existam dispositivos chamados de *dataloggers* que realizam o monitoramento da temperatura ao longo da cadeia fria, este monitoramento é, muitas vezes, feito manualmente, por um profissional que verifica se o produto foi transportado e mantido nas condições pré-estabelecidas. Esta verificação, principalmente em países onde o acesso à tecnologia é difícil e custoso como no Brasil, é realizada através de anotações em planilhas (MADGETECH, 2015).

Neste contexto, surge a necessidade de criação de um sistema autônomo para monitorar as condições específicas às quais estes insumos da cadeia fria são submetidos desde a expedição, envolvendo o transporte inicial até o armazenamento em seu destino final.

No contexto das informações supracitadas, este estudo propõe criar um sistema baseado em RFID para monitorar as condições de transporte e armazenagem de insumos da área da saúde pertencentes à cadeia fria. Este sistema também auxiliará no controle de estoque dos insumos, tanto na empresa produtora como no seu destino final, evitando, desta forma, não só o desperdício de insumos vencidos como também a falsificação, trazendo ganhos reais à saúde dos pacientes e economia aos órgãos de saúde. O sistema propõe uma forma prática e rápida para realizar o inventário dos medicamentos, enviando os dados coletados e armazenados pelo monitoramento para um servidor de forma segura e aumentando a rastreabilidade dos medicamentos.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica desta dissertação, abordando os principais conceitos dos insumos da área da saúde envolvidos no trabalho, bem como os principais conceitos e componentes eletrônicos presentes em sistemas baseados em RFID. O Capítulo 3 apresenta as justificativas para o sistema de monitoramento baseado em RFID para a cadeia fria farmacêutica proposto nesta dissertação, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos. A metodologia adotada no desenvolvimento é apresentada no Capítulo 4, explicando cada etapa e decisões tomadas ao longo deste trabalho. O Capítulo 5 traz os resultados obtidos, os problemas encontrados no decorrer do trabalho e confronta o sistema proposto com outras propostas e soluções semelhantes. Finalmente, o Capítulo 6, apresenta as conclusões deste estudo além de propor possíveis futuros trabalhos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento dos conceitos básicos utilizados neste trabalho, sendo dividido em cinco grandes partes: insumos na saúde; identificação por rádio frequência (RFID); microcontroladores e sensores; as alternativas disponíveis para o monitoramento de temperatura de mercadorias; e os padrões para desenvolvimento de *software*.

2.1. Insumos na Saúde

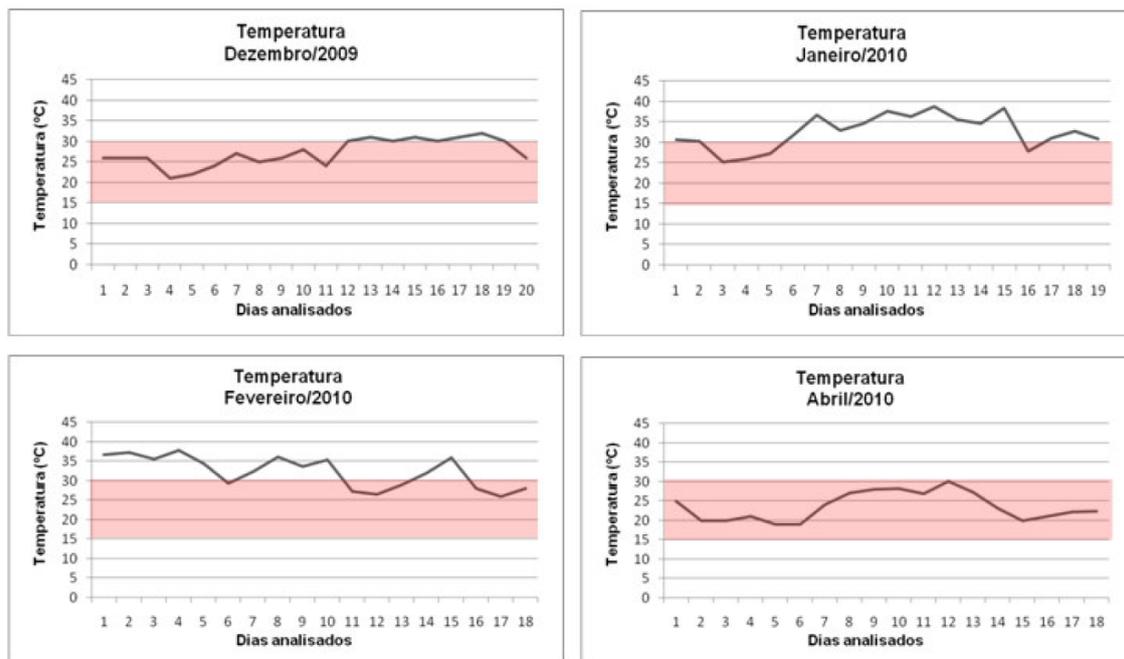
A área da saúde possui diversos insumos pertencentes à cadeia fria, como por exemplo: medicamentos, hemoderivados e materiais biológicos. Os medicamentos da cadeia fria precisam de um cuidado especial, pois tratam diretamente com a saúde do paciente. Cada medicamento apresenta restrições específicas de armazenagem, sendo os cuidados mais comuns o abrigo da luz, temperatura e umidade. Todos necessitam de um controle eficaz de estoque, evitando perdas devido à expiração do prazo de validade e permitindo a reposição quando necessário, evitando, assim, compras desnecessárias. A importância do tema é reforçada pelo evidente crescimento mundial no mercado de medicamentos da cadeia fria (PHARMACEUTICAL COMMERCE, 2014).

Normas da WHO¹ e da ICH² definem metodologias de testes em medicamentos para avaliar a degradação ao serem submetidos a testes de estresse, variando os parâmetros de temperatura, umidade e tempo de exposição à luz (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009; INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONIZATION, 1994). As condições da armazenagem, muitas vezes, são prejudicadas devido ao descaso/desconhecimento e descuido dos municípios, como demonstrou uma pesquisa realizada em um almoxarifado no estado de Santa Catarina, incluindo uma análise durante um mês com as variações de temperatura e umidade conforme apresentadas na Figura 1 e na Figura 2 respectivamente (TEIXEIRA, 2010).

¹ Do inglês *World Health Organization*, Organização Mundial da Saúde.

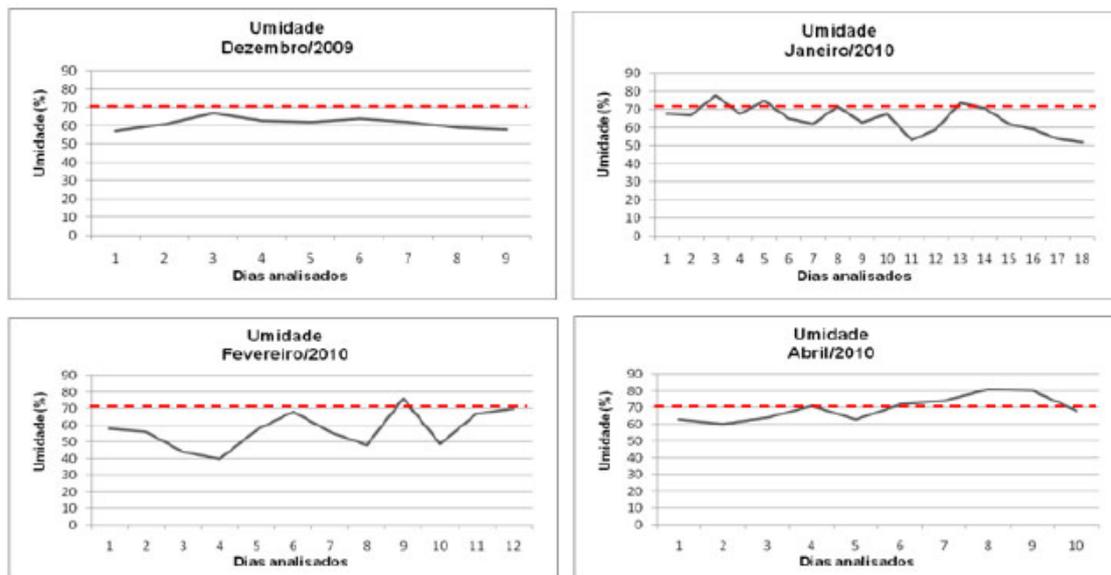
² Do inglês, *International Conference Harmonization*

Figura 1. Variação da temperatura ambiente em um almoxarifado catarinense



Fonte: (TEIXEIRA, 2010).

Figura 2. Variação da umidade ambiente em um almoxarifado catarinense.



Fonte:(TEIXEIRA, 2010).

Alves e colaboradores (2014) mostraram as vantagens da implantação de um sistema eletrônico de monitoramento de temperatura e umidade em um hospital. Antes do sistema, o monitoramento era feito de forma manual, verificando a temperatura a intervalos regulares em termômetros espalhados pelo hospital e tomando nota em planilhas de controle que, posteriormente, eram repassadas para um computador,

conforme mostra a Figura 3. O procedimento era realizado em intervalos de quatro horas, totalizando 180 medições mensais. No entanto, esse procedimento era falho, pois havia esquecimento por parte dos colaboradores, rasura nos formulários, falta de conhecimento para manusear o termômetro ou perda dos formulários preenchidos. Com o novo sistema, são realizadas 432 medições diárias, totalizando um total de quase 13 mil contagens mensais.

Figura 3. Formulário de controle de temperatura do hospital Badim.

HOSPITAL Badim 3 **Controle de temperatura e Umidade** 12/13

Ambiente - 9° a 25°C Umidade - 40 a 70%

Data	Dia			Noite			Dia			Noite			Rubrica	
	Min	Max	ATUAL	Min	Max	ATUAL	Min	Max	ATUAL	Min	Max	ATUAL	Dia	Noite
1	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
2	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
3	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
4	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
5	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
6	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
7	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
8	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
9	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
10	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
11	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
12	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
13	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
14	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
15	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
16	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
17	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
18	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
19	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
20	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
21	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
22	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
23	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
24	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
25	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
26	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
27	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
28	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
29	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
30	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		
31	17.0	21.0	19.5	18.5	24.3	20.1	19.0	23.0	20.1	18.0	22.0	19.0		

Plano de Contingência:
 Quando a temperatura Ambiente estiver fora dos limites, fazer a correção no ar-condicionado
 Quando necessitamos uma temperatura menor, devemos aumentar a graduação do ar e vice-versa
 Se o problema não for resolvido, deve-se entrar em contato com a manutenção.

Farmacêutico Técnico Responsável Coordenador Almoxxarifado

Fonte: (ALVES, MORIM, *et al.*, 2014).

Os problemas de acondicionamento não ocorrem somente durante a armazenagem dos medicamentos nos hospitais, mas também durante o transporte. Silverman (2012) durante sua pesquisa no *Rochester Institute of Technology*, enviou 500 *data loggers* pelos Estados Unidos no período de um ano através de três centros de

distribuição diferentes para avaliar as condições de temperaturas as quais produtos farmacêuticos estariam sujeitos durante o transporte, conforme consta no Quadro 1 (SILVERMAN, 2012).

Quadro 1. Mapa de temperaturas do transporte de fármacos nos EUA

Centro de Distribuição	Mínima	Duração < -10°C	Duração < 0°C	Máxima	Duração >40°C	Duração >50°C	Duração >60°C
<i>Eastern DC</i> ³	-11,5°C	7,7h	32,3h	46,0°C	12,2h	--	--
<i>Western DC</i>	-19,8°C	38,0h	89,5h	60,9°C	39,3h	24,3h	2,3h
<i>Southern DC</i>	-10,8°C	0,7h	41,3h	45,9°C	13,7h	---	--

Fonte: Adaptado de (SILVERMAN, 2012).

Além das perdas decorrentes de péssimas condições de armazenagem, existem as perdas relacionadas aos prazos de validade e ao desaparecimento ou roubo dos medicamentos. Essas perdas possuem impacto socioeconômico relevante. Um estudo realizado durante quatro meses em um hospital localizado em Montes Claros, Minas Gerais, indicou o índice de perdas durante este período decorrente de vencimento do prazo de validade dos medicamentos. Houve uma média de perdas de 2581 comprimidos (2,28%), 3760 injetáveis (2%), 165 medicamentos líquidos (1,95%) e 924 medicamentos controlados (2,06%) (RABELO e FERREIRA, 2013). O jornal digital Olhar Jurídico apresentou uma investigação realizada pelo Ministério da Saúde para apurar as perdas de medicamentos enviados ao Mato Grosso com recursos federais e estaduais. As perdas ocorreram em um período de seis meses, entre novembro de 2012 a abril de 2013 e alcançaram um prejuízo de R\$ 646.652,48 (OLHARJURÍDICO, 2013).

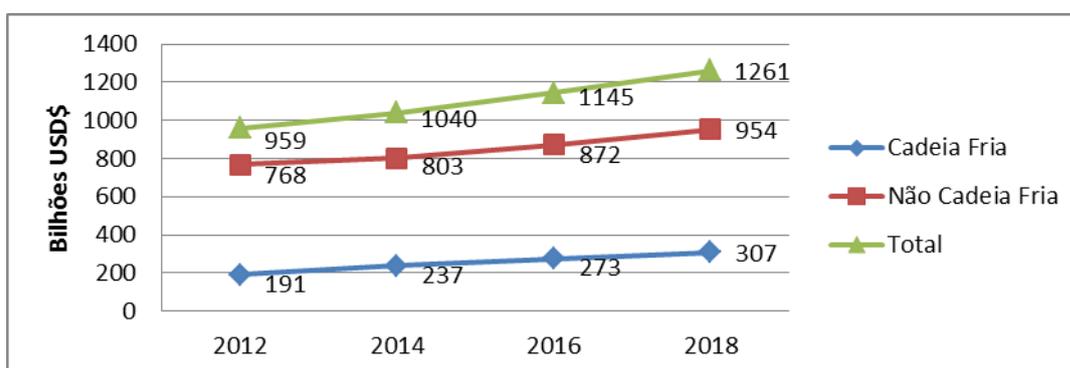
Um relatório realizado pelo Centro Universitário Estadual da Zona Norte do Rio de Janeiro mostra a ameaça crescente dos medicamentos falsificados e seus diferentes tipos de falsificação de medicamentos e toda sua abrangência no Brasil e no mundo. Segundo o relatório, estima-se que 10% do total do comércio mundial sejam de medicamentos falsificados, sendo que cerca 25% dos fármacos consumidos em países em desenvolvimento são falsificados e que em alguns países, esse número sobe para 50% (SILVA, 2012).

³ DC, do inglês *Distribution Center*

A prática de falsificação de medicamentos é muito comum no Brasil e nos países que não possuem um controle rígido na distribuição destes produtos. No ano de 2014, o faturamento com produtos contrabandeados, falsificados e pirateados chegou à R\$ 30 bilhões no Brasil, sendo que os produtos ilegais representam uma perda de arrecadação de impostos em torno de R\$ 9 bilhões ao ano (DIÁRIO DO NORDESTE, 2015). A distribuição de medicamentos falsos é extremamente grave, não apenas no que se refere aos danos nocivos diretos que eles causam a saúde do usuário, como também pelo desperdício econômico. Apenas os medicamentos falsos representam uma perda de R\$ 5 bilhões em arrecadação de impostos e ocupam 20% do mercado total no setor (DIÁRIO DO NORDESTE, 2015).

O *Biopharma Cold Chain Sourcebook*⁴ determina as cadeias frias (do inglês, *cold chains*) que necessitam de cuidados especiais, explica o crescimento deste segmento ao longo dos anos e informa a importância do mesmo no mercado mundial. Em 2009, cinco dos dez fármacos mais vendidos no mundo eram derivados de grandes moléculas que necessitam de uma armazenagem refrigerada entre 2° e 8°C⁵. Em 2018, a previsão é que as vendas mundiais em cadeias frias de insumos de saúde estarão em torno de US\$ 300 bilhões, em um mercado global de biofármacos de US\$ 1,2 trilhões, conforme descrito na Figura 4 (PHARMACEUTICAL COMMERCE, 2014).

Figura 4. Projeção do mercado de biofármacos de 2012 a 2018



Fonte: Adaptado de (PHARMACEUTICAL COMMERCE, 2014).

⁴ Livro publicado anualmente pela *Pharmaceutical Commerce* sobre as previsões econômicas na cadeia fria mundial

⁵ Os medicamentos citados no estudo são: Enbrel®, Rituxan®, Remicade®, Avastin® e Humira®.

O crescimento do setor, os problemas com perdas, roubos e falsificações criaram a necessidade de melhorar o monitoramento da cadeia de medicamentos. Visando aumentar a rastreabilidade, o controle, a segurança e também a confiança na origem destes medicamentos, a indústria farmacêutica considerou a utilização de uma nova tecnologia baseada em radiofrequência, o RFID, para substituir o antigo sistema de códigos de barra. Coreia do Sul, Argentina e alguns outros países iniciaram projetos pilotos aplicando RFID nas suas cadeias de distribuição, demonstrando que a utilização do RFID é possível e benéfica para o sistema (ZAINO, 2014).

2.2. Identificação por Radiofrequência

Identificação por radiofrequência, ou RFID, é o termo genérico para tecnologias que usam ondas de rádio para identificar automaticamente pessoas ou objetos com o objetivo de substituir sistemas de identificação que utilizam etiquetas impressas de códigos de barras. Existem vários métodos de identificação, mas o mais comum é armazenar um número de série que identifica uma pessoa ou objeto num microchip de RFID, acoplado com uma antena, criando a chamada *tag* RFID, conforme ilustrado na Figura 5. A leitora se comunica com a *tag* transmitindo uma onda de rádio e aguarda a resposta através de ondas refletidas (do inglês, *backscattering*). Esta ligação permite que o chip transmita a informação de identificação à leitora. Essas informações digitais podem ser repassadas depois a computadores que podem fazer uso delas (FINKENZELLER, 2010).

Figura 5. Leitor e *Tag* UHF RFID



Fonte: O autor (2015).

As *tags* RFID podem operar em diversas frequências: LF (do inglês, *Lower Frequency*), HF (do inglês, *High Frequency*), UHF (do inglês, *Ultra High Frequency*) e SHF (do inglês, *Super High Frequency*); sendo divididas em três grandes categorias:

- Passivas: não possuem energia própria. Alimentam-se da energia emitida pelo leitor e se comunicam através de *backscattering*. Permitem leituras de curto alcance, de alguns centímetros até 10 metros. Custam alguns centavos de dólar (AMARAL, 2013).
- Semi-Passivas: Possuem uma fonte de energia própria, usualmente uma bateria, para realizar suas atividades; porém ainda se comunicam através de *backscattering* como as *tags* passivas. Também são conhecidos como BAP *tags* (do inglês, *Battery Assisted Passive Tags*). Possibilitam leituras de médio alcance e custam mais que as passivas (AMARAL, 2013).
- Ativas: Possuem uma fonte de energia própria, usualmente uma bateria, para realizar suas atividades e para transmitir dados, diferentemente das passivas e semi-passivas. Propiciam leituras de longo alcance, em torno de 20 a 100 metros e são as mais caras dentre as *tags* (AMARAL, 2013).

Diversos estudos sugerem a utilização de RFIDs em conjunto com microcontroladores e sensores, tornando-as inteligentes e permitindo que elas não funcionem somente como simples identificadoras. Essas são chamadas de *smart tags* ou de *smart labels*. Algumas não possuem bateria, mas, mesmo assim, são capazes de detectar diversas variações no ambiente. Um dos mais notáveis trabalhos nesta área é o WISP (*Wireless Identification and Sensing Platform*) (SMITH, JIANG, *et al.*, 2005) e todas as suas evoluções ao longo dos anos, como o WISP-Mote (SAMPLE, YEAGER, *et al.*, 2008).

2.3. Microcontroladores e Sensores

Microcontroladores são dispositivos programáveis que controlam a maioria dos dispositivos eletrônicos complexos utilizados no dia a dia, desde máquinas de lavar e cafeteiras automáticas até os sistemas de *airbags* e freios ABS (do inglês, *Anti-lock Braking System*) nos carros. Microcontroladores podem possuir um circuito mais simples que um processador normal, com poucas funcionalidades, chegando até a arquiteturas muito complexas. Por esse motivo são ditos como dependentes da

aplicação, possuindo características únicas, onde o engenheiro deve ser capaz de escolher o melhor custo-benefício para o seu projeto (BARRETT e PACK, 2006).

Sensores são dispositivos utilizados para detectar ou medir uma grandeza física, em geral, enviando esta informação, de forma elétrica, para um microcontrolador. Para isso, os sensores convertem a forma de energia medida (radioativa, mecânica, gravitacional, elétrica, térmica ou magnética) em energia elétrica (SINCLAIR, 2001).

Os avanços tecnológicos, a miniaturização, a redução no consumo de energia e a redução da tensão de alimentação permitiram a integração dos RFIDs com microcontroladores, gerando um novo conceito de *tags* inteligentes, as *smart tags*, dotadas de diversos sensores. As *smart tags* podem funcionar de forma passiva ou até mesmo com bateria, viabilizando diversas aplicações, dada as suas características de leitura de múltiplos nós simultaneamente, baixo custo, baixo consumo e comunicação sem fio. Dentro das aplicações possíveis está a de monitoramento de medicamentos, órgãos, tecidos, alimentos perecíveis e todos os outros produtos da cadeia fria.

2.4. Alternativas Disponíveis para Monitoramento de Temperatura em Mercadorias

Um estudo realizado por Raab, Petersen e Kreyenschmidt (2011), analisou as diferentes tecnologias disponíveis no mercado hoje para o monitoramento de temperaturas em câmaras frias, demonstrando as diferentes opções, as quais são apresentadas no Quadro 2.

Os *data loggers* existentes possuem diversas formas de comunicação, como USB, RS232, I²C, WiFi, Bluetooth, NFC, ZigBee e RFIDs. Alguns sugerem a utilização de uma solução híbrida ao invés de uma única opção, tentando explorar os pontos fortes de cada uma delas, como é o caso dos WSN (do inglês, *Wireless Sensors Networks*) com RFIDs.

Os *data loggers* mais utilizados no mercado ainda são os que possuem conexão física via conectores ou cabos, pois eles conseguem atender a demanda de robustez, tamanho de memória e duração da bateria. No entanto, esses *data loggers* possuem um tamanho relativamente grande, um alto custo, e necessitam ser lidos individualmente para que seja possível fazer o *download* dos dados para um *software* de análise ou servidor.

Os avanços tecnológicos, a miniaturização, a redução no consumo de energia, e o desenvolvimento de tecnologias como o SoC (em inglês, *System On Chip*), que

integram várias tecnologias em uma única pastilha de silício, permitiram o avanço dos *data loggers*. Atualmente, o momento é de transição da tecnologia, onde a transmissão de dados sem fio é uma realidade, as redes de sensores são baratas, de baixo consumo e capazes de fornecer informações importantes não somente de um único item, mas possibilitando o mapeamento de uma região inteira nas três dimensões.

Quadro 2. Princípios, vantagens e desvantagens dos sistemas de monitoramento de temperatura existentes.

Categoria	Princípios	Vantagens	Desvantagens
Termômetro de Contato	Mecânico. Dilação do volume de líquidos, metais ou gás. Alteração de resistência elétrica.	Simples, robusto e barato. Medições são feitas diretamente no produto de interesse.	Amostragem arbitrária, sem histórico. Higiene pode ser afetada e é fator crítico. Pré-congelamento necessário. Necessita abrir as embalagens.
Termômetro Infravermelho	Pirômetro: mede as radiações térmicas. Dispositivo possui um sistema óptico, com detector, controle e análise do sinal.	A temperatura superficial pode ser medida sem contato. Curto tempo de resposta. Não destrutivo. Não reativo.	A precisão depende do material e de sua superfície. Sem histórico. Necessita de contato visual e de abrir a embalagem.
Gravadores Gráficos	Bobinas metálicas são usadas como sensores e para escrever o registro.	Temperatura do ambiente pode ser monitorada continuamente.	Sem informação digital. Apenas mede a temperatura ambiente.
<i>Data loggers</i> antigos	Microcontroladores que coletam e armazenam informação digital das medidas. Os sensores transformam a variação de temperatura em tensão ou corrente que é convertida pelo microcontrolador.	Temperatura do ambiente pode ser monitorada continuamente. Análise automatizada através de <i>softwares</i> . Funções de alerta. Integração com algoritmos de vida útil possível.	Necessita de uma conexão física para transferência de dados. Muito caro para várias aplicações. Principalmente para monitoração da temperatura ambiente. Tempo de reação alto para variações de temperatura lentas.
<i>Data loggers Wireless</i>	Semelhante com os <i>data loggers</i> antigos; porém utilizam a transmissão de dados sem fio.	Transmissão de dados sem fio. Leitura paralela de múltiplos <i>data loggers</i> . Informação em tempo real. Temperatura ambiente monitorada continuamente. Análise automática dos dados via <i>software</i> . Rápida aquisição dos dados e otimização do fluxo do produto.	Falta padronização para algumas frequências, como o RFID. Interferência na leitura de materiais metálicos, líquidos ou fluidos com alta viscosidade.
<i>Smart Active Labels</i>	Etiqueta de RFID conectada a uma fonte de energia, realizando a transferência de informação sem fio.	Baixo custo. Etiquetas adesivas flexíveis. Utilizável em pequenos itens. Integração com algoritmos de .	Aquisição de dados e armazenagem limitados.
Indicadores de temperatura – TTIs ⁶	Químicos, fotoquímicos, microbiológicos ou por reações enzimáticas que estão fortemente relacionadas ao tempo e a temperatura.	Utilizáveis unitariamente. Baixo custo. Controle indireto de frescor.	Sem registro digital. Apenas um aviso colorido. Necessita conhecimento da produto para decidir onde anexar à etiqueta.

Fonte: Adaptado de (RAAB, PETERSEN e KREYENSCHMIDT, 2011).

⁶ em inglês, *Time Temperature Indicators*

2.4.1. *Data loggers* utilizados nas referências bibliográficas consultadas

Diversos estudos propõem a utilização de RFID em conjunto com sensores e, às vezes, com microcontroladores, para realizar o monitoramento do ambiente. O

Quadro 3 faz um comparativo entre algumas soluções de *smart labels*, tanto passivos como semi-passivos, apresentados em publicações acadêmicas, sendo que todas operam dentro da faixa de frequência de 860 a 960 MHz do protocolo EPC Gen2.

Os artigos diferem bastante na sensibilidade, intervalo de operação dos sensores e no consumo de energia. Tanto as *tags* passivas quanto as *tags* semi-passivas podem ser utilizadas para monitoramento de temperatura, mas as passivas necessitam de um leitor de RFID presente em todo o processo para fornecer energia enquanto as semi-passivas podem funcionar sozinhas por possuírem bateria.

Além das diferenças referentes ao tipo de *tag*, nem todos os trabalhos possuem a capacidade de armazenar o histórico de medidas dentro da memória das *tags*. Esta funcionalidade é de extrema importância quando se precisa monitorar o ambiente durante o transporte e não se possui leitoras disponíveis para realizar as leituras periódicas e realizar o *download* dos dados.

Quadro 3. Resumo e Comparação de Desempenho de *Smart Tags*

Artigo	(LAW, BERMAK e LUONG, 2010)	(YIN, 2010)	(QIAN, 2011)	(DONNO, CATARIN UCCI e TARRICO NE, 2014a)	(DONNO, CATARIN UCCI e TARRICO NE, 2014b)	(YU, FENG e WU, 2015) ⁷
Tecnologia	0,18um CMOS	0,18um CMOS	0,18um CMOS	PCB	PCB	0,18um CMOS
Área do chip	--	1,1mm ²	1,2mm ²	--	--	1,44mm ²
Tipo <i>Tag</i>	Passiva	Passiva	Passiva	Semi	Passiva e Semi	Passiva e Semi
Sensibilidade	0 dBm	-6 dBm	-5 dBm	-24 dBm	-17 a -24 dBm	-15 a -11 dBm
Distância Leitura	--	4 m	5 m	22 m	22 m	9,5 a 6 m
Tamanho (cm ²)	--	4,5 x 4,5	--	8 x 6	8 x 8	8 x 5
Sensores	Temp.	Temp.	Temp.	Temp. Aceleração Luz	Temp. Aceleração Luz	Temp.
Operação Sensores	Passivo	Passivo	Passivo	Bateria	Passivo / Bateria	Passivo
Intervalo Sensores (°C)	-10 a 30	-20 a 30	-35 a 105	-50 a 150	-50 a 150	-20 a 50
Precisão (°C)	1 a -0,8	±0,8	+2,3 a -1,1	±2,7	±2,7	-1/0,8
Resolução (°C)	0,14/0,21	0,35	0,31	--	--	0,02
Comunicação	--	--	--	I ² C	I ² C	I ² C
Potência	119nW	2,4uW	6,5uW	600uW	410uW	28,3uW ⁸
Alimentação	0,5V a 1V	1,2V	1V	3V	1,8V	1,2V
<i>Clock</i> (MHz)	--	2,17	2	1	1	2
Memória	OTP	OTP	OTP	16kb MTP	EEPROM	192bit MTP

Fonte: Adaptado de (YU, FENG e WU, 2015).

⁷ Apenas o sensor on-chip foi mostrado por simplificação.

⁸ Simplificação dos valores de potência apresentados

2.4.2. *Data loggers* disponíveis no Mercado

Foi realizado um breve levantamento sobre os *data loggers* disponíveis no mercado e suas especificações são apresentadas no Quadro 4. Os *data loggers* existentes possuem diversos tamanhos de memória, sendo capazes de armazenar entre 4k até 32k de amostras de temperatura; diferentes formas de enviar as informações salvas, como RS232, USB, NFC ou RF; intervalos de temperatura que variam entre -40°C a 85°C, com precisões de 0,1 a 0,5°C.

Os preços apresentados no Quadro 4 foram obtidos por pesquisas na *internet* e através da solicitação de cotações diretamente os fabricantes. Os produtos apresentados em dólares estão com a cotação no exterior, não sendo considerados os custos com importação e revenda no Brasil.

Quadro 4. Análise de mercado de alguns *data loggers* existentes.

Modelo	Fabricante	Comun.	Preço Unitário	Duração bateria @ período amostragem	Amostras ⁹	Dist. ¹⁰	Tamanho ¹¹ LxCxA(mm)	Temperatura @ precisão
TurboTag ZT-8000	SealedAir	USB	R\$ 336	3 anos @ --	8k	--	--	-40°C a 85°C @ +/-0,5°C
TurboTag ZH-8000	SealedAir	USB	R\$ 580	3 anos @ --	8k	--	--	-40°C a 85°C @ +/-0,5°C
miniNOMAD	Omega	RS232	US\$19	90d@1'	10k	--	44x67x16	-20°C a 70°C @ +/-0,1°C
TagTemp Stick	Novus	USB	R\$ 171	400d@1'	32k	--	--	--
TagTemp USB	Novus	USB	R\$ 263	400d@1'	32k	--	55x37	-20°C a 70°C @ +/-0,1°C
TagTemp NFC	Novus	HF	R\$ 252	400d@30'	4k	--	65x44	-40°C a 70°C @ +/-0,5°C
Klima Log Smart	MetaQuimica	USB	R\$ 396	--	16k + 16k	--	101x25x25	-40°C a 70°C @ +/-0,5°C
Track-It Temp	Monarch Inst.	HF	US\$79	1 ano @ --	8k	--	50x33x12	-20°C a 60°C @ +/-0,5°C
Track-It Temp/Humidity	Monarch Inst.	HF	US\$168	1 ano @ --	8k	--	50x33x12	-20°C a 60°C @ +/-0,5°C
SensTag	PhaseIvEngr	UHF	--	15 meses @ 1''	800	--	86x54	20°C a 140°C @ +/-1,0°C
RT0005	CAEN	UHF	US\$ 45	1 ano @ --	4k	10m	107x107	-20°C a 70°C @ +/-0,5°C

Fonte: O autor (2015).

⁹ Capacidade de armazenamento de amostras

¹⁰ Distância de leitura

¹¹ Largura, Comprimento e Altura

2.5. Padrão de Desenvolvimento de Software MVP

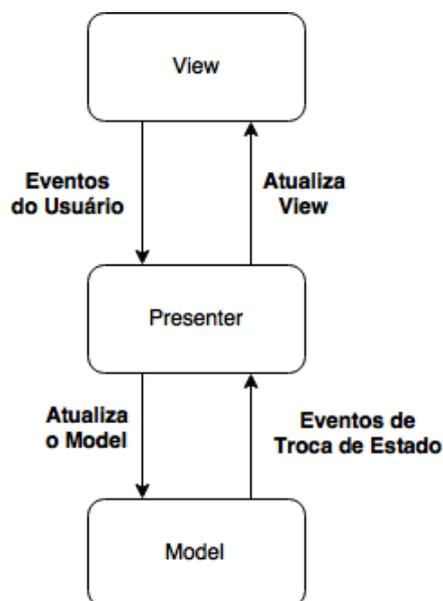
Nas aplicações que utilizam RFID é necessária a utilização de leitoras para coletar os dados das *tags*. As leitoras possuem um *software* com interface para o usuário e por isso adotam algum padrão de desenvolvimento de *software* para construí-lo. Dentro dos diversos padrões existentes podemos destacar o MVP (do inglês, *Model-View-Presenter*).

O MVP é um padrão de arquitetura de interface de usuário projetado para facilitar a automação de testes unitários e separar a lógica de apresentação nos três conceitos que seguem:

- *Model*: define os dados para serem mostrados ou interagidos através de uma interface com o usuário.
- *View*: interface passiva que apresenta os dados e controles ao usuário. Os eventos disparados pelas interações do usuário são redirecionados para a camada *Presenter*.
- *Presenter*: age tanto no *Model* quanto na *View*. Recebe os redirecionamentos dos eventos disparados pelas interações do usuário com a *View*, resgata dados do *Model*, os formata e os envia para a *View*, onde serão exibidos.

A Figura 6 mostra as comunicações entre as camadas do MVP.

Figura 6. Modelo MVP



Fonte: O autor (2015).

3. SISTEMA DE MONITORAMENTO BASEADO EM RFID PARA CADEIA FRIA FARMACÊUTICA

Este capítulo apresenta as justificativas para o sistema proposto de monitoramento baseado em RFID para a cadeia fria farmacêutica, além de explicar o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

3.1. Justificativa

O controle eficiente e eficaz do estoque de medicamentos é de extrema importância para garantir que medicamentos de qualidade estejam disponíveis para a população sempre que necessário, evitando, por exemplo, a falta de medicamentos e a perda por validade expirada, oriunda do excesso de estoque ou pela má gestão do estoque (LIRA, 2013). A gestão de estoque bem realizada ajuda a reduzir os altos custos com os medicamentos, reduzindo o capital de giro da empresa e auxiliando no processo de remanejo dos produtos entre os diversos centros de distribuição (LIRA, 2013). O descuido com o controle de estoque pode ocasionar prejuízos imensos ao governo conforme aconteceu no estado do Mato Grosso, onde mais de R\$ 600 mil em medicamentos foram perdidos em seis meses, no ano de 2012 (OLHARJURÍDICO, 2013).

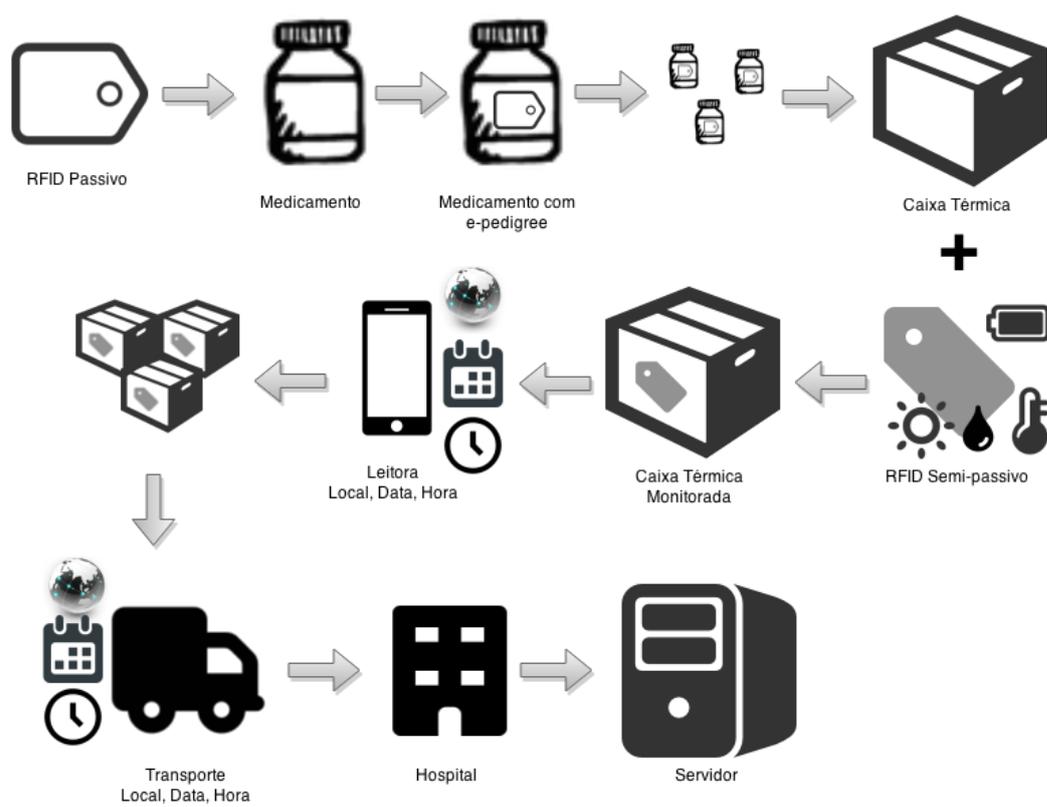
Além dos problemas localizados sobre a gestão e controle de estoque, ainda existe o problema mundial da falsificação de medicamentos. Somente em 2004, a OMS estima que a indústria de medicamentos falsificados faturou mais de US\$ 40 bilhões e para o ano de 2010 este valor pode ter alcançado US\$ 75 bilhões (SILVA, 2012). Visando minimizar o problema com falsificações algumas medidas preventivas foram propostas, que incluem a inspeção visual do medicamento, a análise laboratorial e até mesmo um programa nacional brasileiro (CONGRESSO NACIONAL BRASILEIRO, 2002). A FDA propôs a utilização de um sistema eletrônico de rastreabilidade de medicamentos, chamado de *e-pedigree*, como forma de reduzir as falsificações (FOOD AND DRUG ADMINISTRATION, 2006).

O controle de estoque eficiente e as técnicas para evitar a falsificação não são suficientes para garantir a qualidade do medicamento utilizado, o sistema de controle de medicamentos deve incluir também as informações de acondicionamento do produto ao longo de toda cadeia de distribuição até chegar ao paciente final (AMES, 2006). O fabricante de medicamentos deve garantir que o produto entregue tenha sido

transportado corretamente e dentro das condições especificadas, mas infelizmente a cadeia possui diversas falhas e não consegue garantir as condições de armazenamento nem durante o transporte e nem durante o armazenamento (SILVERMAN, 2012).

Com base nas limitações dos sistemas disponíveis no mercado, um novo sistema de monitoramento baseado em RFID para cadeia fria farmacêutica foi desenvolvido. A Figura 7 mostra o fluxo proposto do sistema, em suas diversas etapas, aplicado para medicamentos da cadeia fria. Inicialmente o medicamento recebe ao final da linha de produção um RFID passivo, responsável pela identificação individual. Este RFID contém a informação do número de lote, horário e data de fabricação e o seu prazo de validade. Através do código individual da *tag* é possível aplicar o *e-pedigree* (FOOD AND DRUG ADMINISTRATION, 2006), mantendo a rastreabilidade do medicamento ao longo de toda a cadeia. Após, este é colocado dentro de embalagens refrigeradas de transporte. Esta embalagem recebe um *datalogger*, um RFID do tipo BAP, o qual é configurado por uma leitora registrando a data, hora e local do início do transporte. Um servidor dedicado armazena estas informações, atrelando as caixas de medicamentos transportadas ao *datalogger* utilizado. As caixas, por sua vez, são transportadas por um veículo que pode ser dotado de um aparelho de GPS (do inglês, *Global Positioning System*) e conectividade, possibilitando o acompanhamento dos dados em tempo real durante o deslocamento. Ao longo de todo o tempo de transporte e armazenagem, o *datalogger* capta as informações do ambiente e as grava em uma memória não volátil. Quando o insumo for retirado da caixa, o usuário recupera os dados armazenados, lendo-os com uma leitora apropriada, verificando se os medicamentos permaneceram dentro das condições limites pré-estabelecidos, de forma a garantir a qualidade do produto para então armazená-lo no local de recebimento e posterior administração ao paciente.

Figura 7. Sistema Monitoramento para cadeia fria de medicamentos



Fonte: O autor (2015).

3.2. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para a cadeia fria farmacêutica, de forma a garantir a eficácia e a segurança dos medicamentos durante o transporte e armazenagem, antes de serem administrados ao paciente, além de auxiliar na rastreabilidade, para evitar a utilização de medicamentos falsificados.

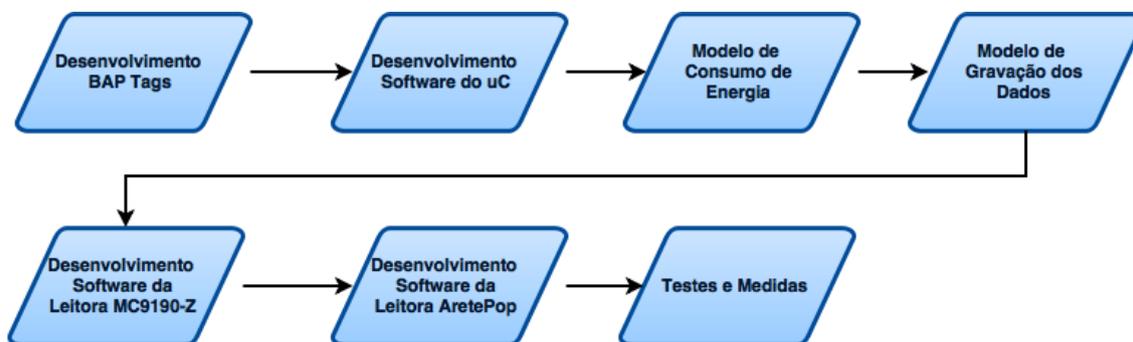
3.3. Objetivos Específicos

- Objetivo 1: Desenvolver duas *tags* de RFID semi-passivas, podendo estar acopladas com microcontroladores e/ou sensores para prova de conceito;
- Objetivo 2: Desenvolver um *software* embarcado para o microcontrolador escolhido, permitindo a organização dos dados medidos e alguns ajustes de alarmes e regras de monitoramento;
- Objetivo 3: Realizar a análise de consumo de energia das diferentes arquiteturas propostas visando desenvolver sistemas de baixo consumo, aumentando a autonomia das baterias;
- Objetivo 4: Desenvolver um *software* para leitora de RFIDs, permitindo a leitura das *tags* desenvolvidas, mostrando as variáveis de interesse em um gráfico e avaliando as distâncias alcançadas para diferentes tipos de configuração.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi adotada a metodologia de desenvolvimento apresentada na Figura 8, para alcançar os objetivos desta dissertação. Cada uma das etapas possuiu sub-etapas que serão discutidas nas seções seguintes.

Figura 8. Metodologia Adotada

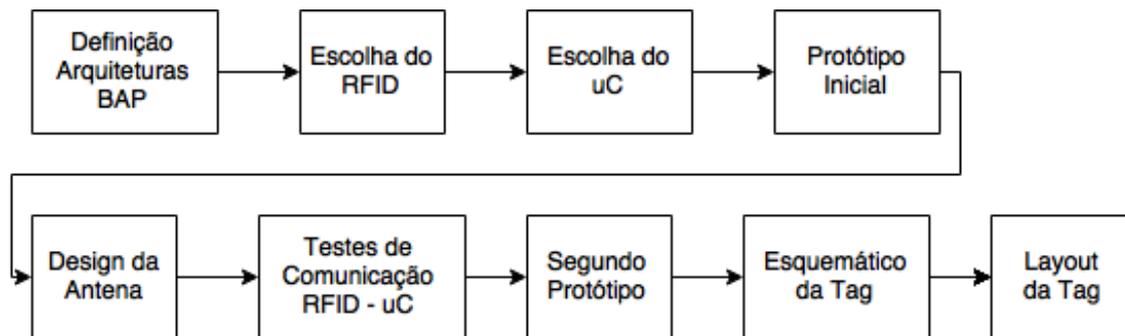


Fonte: O Autor (2015).

4.1. Desenvolvimento da *Tag* Semi-passiva – BAP *Tag*

O fluxo de desenvolvimento da BAP *tag* está descrito na Figura 9. Primeiramente foi realizada uma exploração de arquiteturas possíveis para o desenvolvimento das BAPs. Após, foram analisados os chips de RFIDs disponíveis no mercado que se adequavam às arquiteturas propostas, seguido da escolha do μ C. A seguir, foi fabricado um protótipo inicial, uma primeira versão da BAP *tag* tipo 1, para avaliação de utilização em conjunto com a leitora. Posteriormente, foram realizados testes de comunicação SPI (em inglês, *Serial Peripheral Interface*) entre o RFID e o μ C. A seguir foi desenvolvida uma nova BAP *tag* do tipo 3, visando o aprimoramento do protótipo inicial, sendo necessário o desenvolvimento de uma nova antena, esquemático e, por fim, o *layout* da *tag*.

Figura 9. Fluxo de desenvolvimento da tag



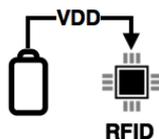
Fonte: O Autor (2015).

4.1.1. Arquiteturas das BAPs

As arquiteturas desenvolvidas das BAP tags estão detalhadas abaixo, visando à redução do consumo de energia para quando as tags estiverem “*in-shelf*”, ou seja, sem uso e guardadas em um armário, funcionando da seguinte forma:

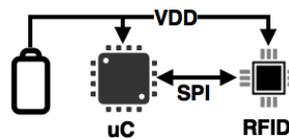
- BAP Tipo 1 (Figura 10): somente o RFID está conectado diretamente à bateria. Funciona como uma BAP tradicional alimentada continuamente pela bateria.
- BAP Tipo 2 (Figura 11): RFID e μ C conectados à bateria.
- BAP Tipo 3 (Figura 12): μ C conectado diretamente à bateria enquanto a alimentação do RFID é controlada por um pino do μ C. Dependendo do comando que o RFID receber, o μ C liga a alimentação do RFID para realizar o monitoramento.
- BAP Tipo 4 (Figura 13): RFID opera no modo de *energy harvesting* e provê energia para o μ C na presença de campo RF. Dependendo do comando recebido, o μ C fecha uma chave externa, permitindo que ambos recebam energia da bateria para realizar o monitoramento.

Figura 10. BAP Tipo 1



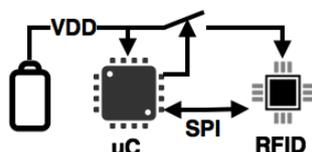
Fonte: O autor (2015)

Figura 11. BAP Tipo 2



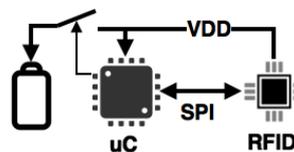
Fonte: O autor (2015).

Figura 12. BAP Tipo 3



Fonte: O autor (2015)

Figura 13. BAP Tipo 4



Fonte: O autor (2015)

4.1.2. Escolha do RFID

Foi realizada pesquisa de mercado para avaliar os RFIDs UHF disponíveis, funcionalidades, características e custos associados, além de verificar todos os outros produtos associados a soluções com RFID, como leitoras, antenas, etiquetas, etc.

Existem várias opções para RFIDs passivos, inclusive com sensores, porém eles só monitoram o ambiente na presença de campo RF (SAMPLE, YEAGER, *et al.*, 2008). A tecnologia de RFIDs semi-passivos com interface para microcontroladores ainda é muito recente e apenas algumas empresas possuem este tipo de produto. Dentre estes produtos podem ser destacados os apresentados na Tabela 1. Os chips de RFID semi-passivos descritos utilizam dois protocolos de comunicação seriais diferentes para a interação com os microcontroladores, podendo ser o SPI (em inglês, *Serial Peripheral Interface*) ou o I2C (em inglês, *Inter-IC bus*).

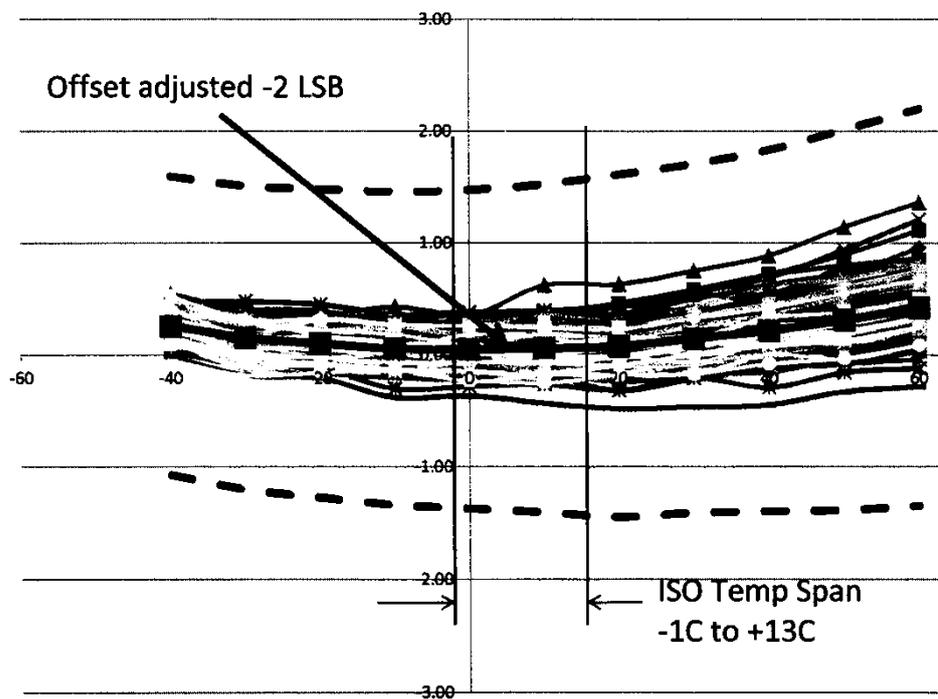
Para o desenvolvimento do *data logger*, informações como precisão e resolução do sensor, tamanho da memória e consumo de energia são características que devem ser levadas em consideração na hora da escolha do RFID. Como estes chips estarão conectados a uma bateria, o consumo de energia passa a ser um ponto crítico.

Das opções analisadas de RFID, a que melhor se adequou com a proposta deste trabalho foi o RFID do fabricante EM Microelectronic, o EM4325, devido a sua alta sensibilidade, baixo custo, interface de comunicação rápida, baixo consumo de energia, e por possuir um sensor de temperatura integrado (EM MICROELECTRONIC, 2015).

O sensor de temperatura interno do EM4325 possui nove bits, com uma resolução de 0,25°C e um intervalo de temperatura de -40°C até 60°C, com uma

precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ em todo o intervalo e $\pm 0.6^\circ\text{C}$ no intervalo ISO (-1°C até 13°C) para cadeia fria, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14. Resultados da medida do sensor EM4325 para 96 chips calibrados.



Fonte: Adaptado de (EM MICROELECTRONIC, 2015).

Tabela 1. Chips de RFID com interface para microcontroladores

Fabricante	Modelo	Sensib. ¹² (dBm)	US\$ ¹³	Sensor Temperatura Intervalo@precisão	RF	Mem. (bits)	StandBy $\mu\text{A}@V$	Active $\mu\text{A}@V$	Tensão (V)	Comunicação
NXP	UCODE I ² C	-23	0,60	Não Possui	UHF	3k	10	?	1,8-3,6	I2C
EM	EM 4325	-31	1,02	-40 a 60°C @ +/- 0,6°C	UHF	4k	1,7	10	1,25- 3,6	SPI
Impinj	Monza X 2k/8k	-19.5	0,90	Não Possui	UHF, HF	2k/8k	15@1,8	100@1,8	1,6-3,6	I2C
MAS	SL900A	-15	3,63	-20 a 60°C @ +/-1°C	UHF	9k	1,6@1,5	200@1,5	1,2-3,6	SPI
Ramtron	WM72016-6	-6	5,00	Não Possui	UHF	16k	--	--	2,1-4,5	SPI

Fonte: O autor (2015).

¹² Sensibilidade do RFID

¹³ Preço considerando 1000 unidades

4.1.3. Escolha do Microcontrolador

Foi realizada uma análise dos microcontroladores de baixo consumo para serem utilizados com bateria. Atualmente existe uma gama muito grande de opções de microcontroladores de diferentes fabricantes como, por exemplo, Texas Instruments, ATmel, STMicroelectronics, Microchip, entre outros. Uma forma útil de comparação é a utilização de *benchmarks*, conforme realizado por (EEMBC, 2015).

Objetivava-se encontrar um microcontrolador com interface de comunicação serial SPI ou I²C, possibilidade de acoplar outros sensores ao RFID, diferentes modos de operação, temporizadores (em inglês, *timers*), tipo e tamanho da memória. Para sistemas de ultrabaixo consumo, é muito importante que o acesso à memória seja rápido e de baixo consumo, e que o microcontrolador possua diferentes modos de operação de baixo consumo, habilitando e desabilitando blocos internos de acordo com a necessidade.

Após a análise dos microcontroladores existentes optou-se por trabalhar com o microcontrolador MSP430G2553 da família MSP430 da Texas Instruments (TEXAS INSTRUMENTS, 2015a), devido à facilidade de programação, grande suporte da empresa e a larga adoção da indústria e da comunidade de pesquisa, como o exemplo da *tag* WISP (SAMPLE, YEAGER, *et al.*, 2008) e da *tag* RAMSES (DONNO, CATARINUCCI e TARRICONE, 2014b).

O μ C escolhido possui três *clocks* internos, explicados a seguir, que podem ser ligados ou desligados, dependendo do modo de operação de baixo consumo escolhido.

Clocks do μ C:

- MCLK (*Master Clock*): Frequência principal do μ C. Utiliza como fonte principal o DCO ();
- SMCLK (*Sub-system Master Clock*): utilizado por periféricos rápidos do μ C;
- ACLK (*Auxiliary Clock*): Utiliza o oscilador VLO (do inglês, *Very Low Oscillator*) ou um cristal externo como fonte de sincronismo para periféricos lentos.

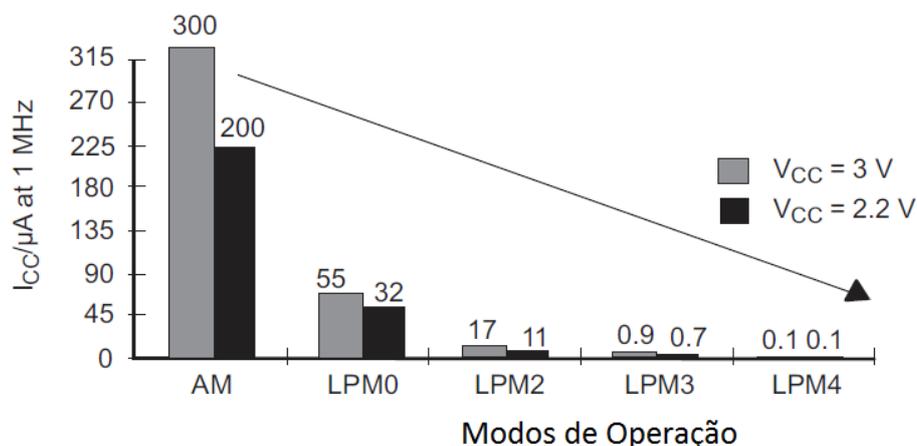
O microcontrolador possui cinco modos de operação de baixo consumo, detalhados no *datasheet* do μ C (TEXAS INSTRUMENTS, 2015b), sendo eles basicamente:

- *Active Mode* (AM): CPU ativa, todos os *clocks* habilitados ativos.

- *Low Power Mode 0* (LPM0): CPU, MCLK desabilitados. SMCLK e ACLK ativos.
- *Low Power Mode 1* (LPM1): CPU, MCLK desabilitados. DCO e gerador DC estão desabilitados se o DCO não for utilizado para o SMCLK. ACLK ativo.
- *Low Power Mode 2* (LPM2): CPU, MCLK, SMCLK, DCO desabilitados. Gerador DC habilitado. ACLK ativo.
- *Low Power Mode 3* (LPM3): CPU, MCLK, SMCLK, DCO desabilitados. Gerador DC desabilitado. ACLK ativo.
- *Low Power Mode 4* (LPM4): CPU e todos os *clocks* desabilitados.

A Figura 15 apresenta o consumo médio típico para os chips da família MSP430F21x1, extremamente semelhantes ao μC utilizado.

Figura 15. Consumo energia do μC por modo de operação



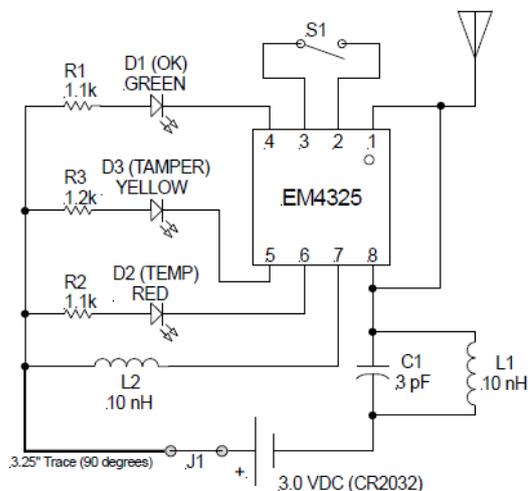
Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2015a).

4.1.4. Protótipo Inicial - BAP Tipo 1

A primeira etapa da construção das BAPs foi o desenvolvimento da BAP Tipo 1, conforme esquemático apresentado na Figura 16. Este protótipo inicial permitiu validar a comunicação da leitora com as *tags*, permitindo desenvolver um *software* de demonstração com a leitora MC9190-z escolhida, aprendendo as funcionalidades e peculiaridades do chip escolhido.

O esquemático e *layout* deste protótipo inicial foram fornecidos pelo fabricante do EM4325 e foram desenvolvidos por uma empresa terceirizada chamada *RF Design Studios* (WEAKLEY, 2014).

Figura 16. Esquemático do protótipo inicial da BAP Tipo 1



Fonte: Adaptado de (WEAKLEY, 2014).

4.1.5. Design da Antena

Visando melhorar o desempenho da BAP *tag*, uma nova antena foi desenvolvida para operar dentro do intervalo de frequências de 860 MHz a 960 MHz, garantindo a interoperabilidade entre as Américas, Europa e Japão. Sendo assim, uma antena dipolo banda larga foi projetada para casar a impedância do chip de RFID escolhido $Z_{\text{chip}} = 7,6 - j114$ em 915 MHz. Para o projeto da antena é feito um casamento da impedância da antena projetada com a impedância do chip, garantindo a transferência de energia do campo RF absorvido pela antena para o chip de RFID.

Foram utilizados *softwares* de modelamento para antenas de RF, levando em consideração a impedância do chip utilizado, o tipo de substrato que a *tag* seria feita, espessuras, dimensões e frequência de interesse, de acordo com as normas brasileiras.

A antena possuiu comprimento de $\lambda/2$ e o seu comprimento pode ser calculado de acordo com a equação (4.1.1). A antena deve possuir em torno de 16 cm de comprimento, o que ocuparia uma grande área da *tag*, por esse motivo foi proposto à utilização da técnica de *meandering* (FAUDZI, ALI, *et al.*, 2013), onde é possível reduzir o seu comprimento sem grandes perdas na eficiência da antena.

Este processo foi realizado em parceria com a empresa RFiDO *Design* através do seu programa universitário.

$$L_{ant} = \frac{\lambda}{2} \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{915 \text{ MHz}} \quad (4.1.1)$$

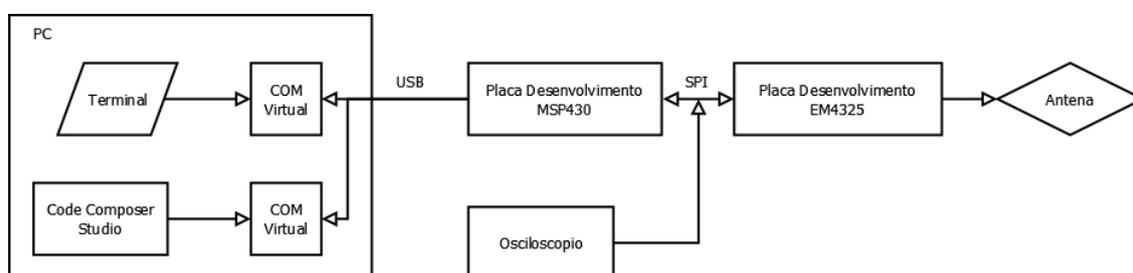
$$L_{ant} \approx 0,1639 \text{ m}$$

4.1.6. Comunicação entre RFID e Microcontrolador

O desenvolvimento do *software* do microcontrolador iniciou com um programa mais simples que permitisse o entendimento do acesso ao RFID via SPI, implementando cada uma de suas funcionalidades, realizando *debug* em tempo real, interagindo diretamente com um terminal no PC via interface UART, observando as respostas decodificadas no código fonte e confrontando-as com os valores visualizados no osciloscópio, conforme Figura 17. Os kits de desenvolvimento utilizados podem ser vistos na Figura 18, enquanto a Figura 19 apresenta a comunicação entre o EM4325 (*SPI Slave*) e o μC (*SPI Master*). Toda a programação e *debug* foram realizados na ferramenta *Code Composer Studio* (CCS), uma ferramenta distribuída gratuitamente pela Texas Instruments para o desenvolvimento de aplicações para o MSP430.

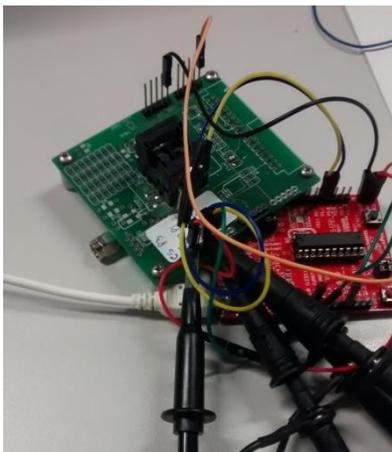
Esta etapa foi de extrema importância para garantir que a comunicação e interconexão entre o RFID e o μC estavam corretas antes da fabricação da segunda versão da *tag*.

Figura 17. Ambiente de desenvolvimento

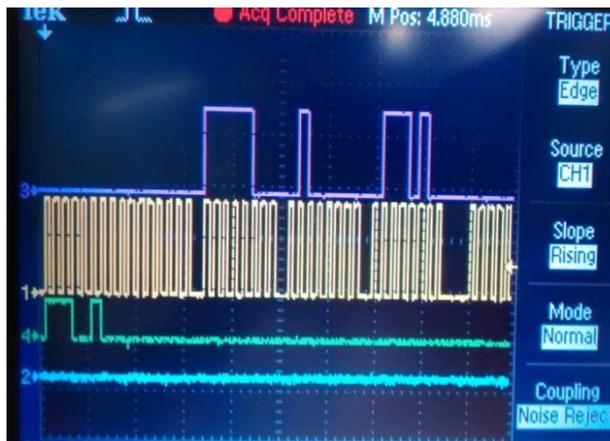


Fonte: O autor (2015)

Figura 18. Kits de desenvolvimento



Fonte: O Autor (2015)

Figura 19. Comunicação SPI entre o EM4325 e o μ C

Fonte: O Autor (2015)

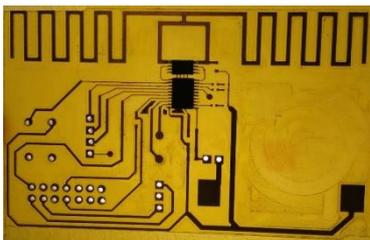
O EM4325 possui uma configuração especial que utiliza o pino 7 (Aux) para notificar o μ C toda a vez que ele receber uma mensagem via RF sendo isso apenas possível quando está no modo *SPI Slave*. É através dessa interrupção que o μ C pode ser acordado do seu modo de operação de ultrabaixo e realizar as verificações necessárias para realizar novas tarefas, dependendo da configuração adotada na BAP. Este comportamento será melhor explicado nas próximas seções.

4.1.7. Segundo Protótipo – BAP Tipo 3

O esquemático utilizado no desenvolvimento na segunda versão do protótipo da BAP Tipo 3 está na Figura 21. Tanto o esquemático quanto o *layout* da placa foram feitos no *software* Proteus. Para a fabricação do segundo protótipo foram necessárias várias etapas:

1. Geração dos arquivos Gerbers pelo *software* CAD Proteus;
2. Correção dos Gerbers pelo *software* GerbV;
3. Edição dos *layouts* dos Gerbers no *software* FlatCAM;
4. Geração dos arquivos G-Codes pelo *software* FlatCAM;
5. Utilização dos G-Codes na fresadora Engraver 3025 para fabricação da placa protótipo de fenolite conforme Figura 20.

Figura 20. Protótipo da segunda versão feito na fresadora



Fonte: O Autor (2015)

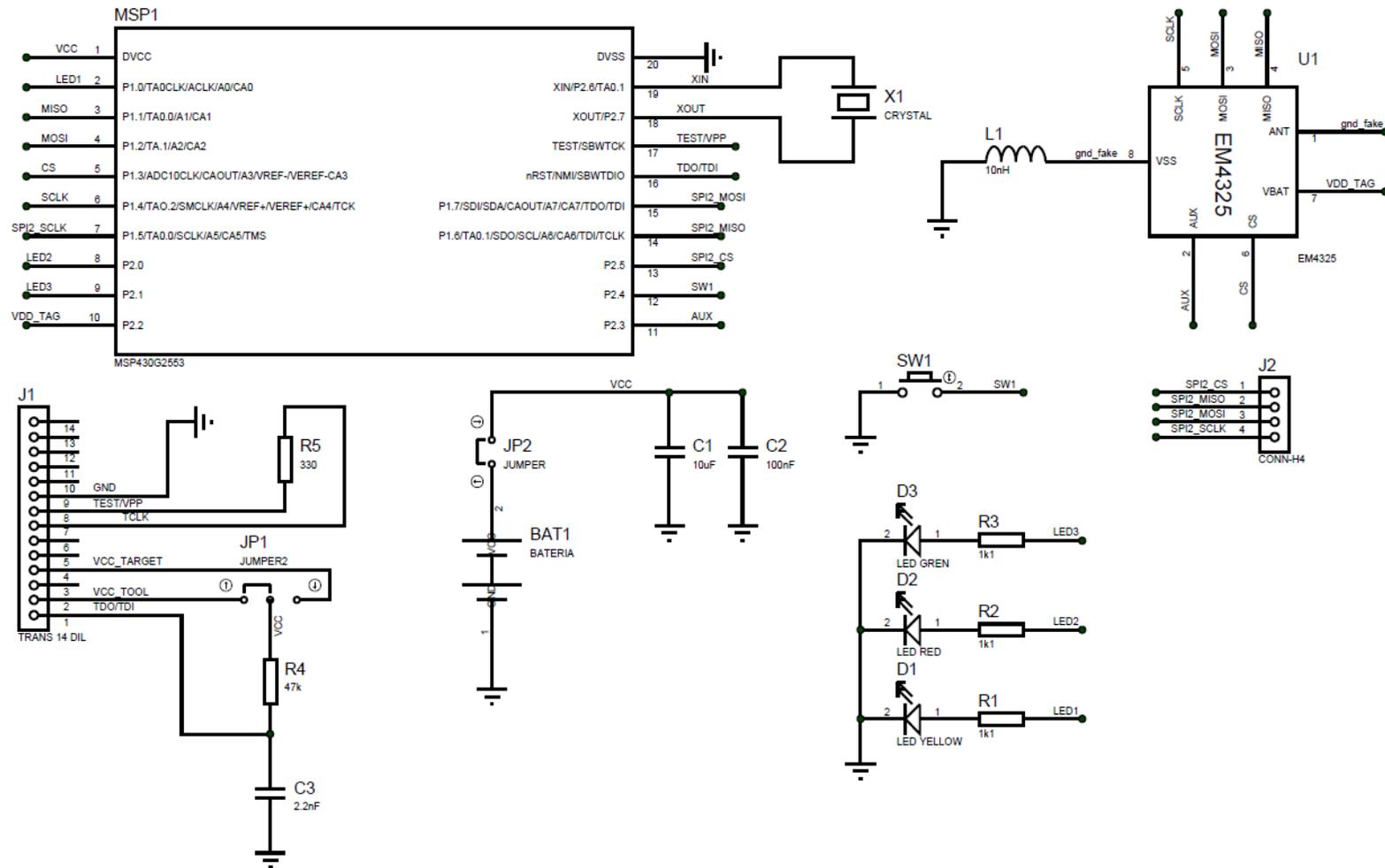
A Tabela 2 mostra os componentes utilizados para a fabricação da BAP Tipo 3 e seus respectivos preços unitários para compras em larga escala, começando em uma unidade, dez, cem, mil e cem mil.

Tabela 2. Lista de componentes e seus preços para o segundo protótipo

Descrição	Quantidade	Preços por quantidades (US\$)				
		1	10	100	1k	100k
Indutor 10nH	1	0,36	0,32	0,23	0,17	0,101
Resistor 330	1	0,08	0,07	0,04	0,02	0,001
Resistor 47k	1	0,08	0,07	0,04	0,02	0,001
Resistor 1,2k	3	0,08	0,08	0,04	0,02	0,003
LEDs	3	0,54	0,40	0,21	0,10	0,052
Bateria CR2032	1	0,28	0,26	0,23	0,16	0,050
Suporte Bateria	1	1,07	0,95	0,75	0,59	0,060
Capacitor 10uF	1	0,13	0,09	0,04	0,03	0,013
Capacitor 100nF	1	0,10	0,01	0,01	0,00	0,001
Capacitor 2,2nF	1	0,10	0,02	0,01	0,01	0,002
MSP430G2553	1	2,01	1,81	1,46	0,79	0,700
EM4325	1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,020
PCB	1	8,20	4,92	1,15	0,50	0,250
Total (US\$)		15,30	10,99	5,74	3,65	2,365

Fonte: O autor (2015)

Figura 21. Esquemático do segundo protótipo - BAP Tipo 3



Fonte: O autor (2015).

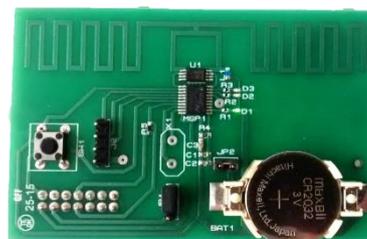
A Figura 22 e a Figura 23 mostram o protótipo inicial e o segundo protótipo desenvolvidos, respectivamente. As *tags* foram fabricadas através da empresa CurtaCircuitos, uma *startup* brasileira cuja iniciativa visa à produção de protótipos em baixa escala com um custo bem mais acessível. O protótipo inicial possui casamento de impedância para que ela funcione tanto como *tag* passiva como uma *tag* semi-passiva com um diâmetro de 3,80 cm. A segunda versão do protótipo foi desenvolvida visando um melhor funcionamento quando operado no modo semi-passivo, sendo mais robusto do que a versão inicial, alcançando distâncias maiores de leitura e possibilitando a inclusão de um microcontrolador.

Figura 22. Protótipo Inicial BAP Tipo 1



Fonte: O autor (2015).

Figura 23. Segundo protótipo BAP Tipo 3



Fonte: O autor (2015).

Após a fabricação dos protótipos, as BAP *tags* têm que ser configuradas corretamente, de acordo com o modo que se deseja operar. A Tabela 3 mostra os valores que devem ser escritos em diversas posições no banco de memória do usuário (*UserBank*) que permitem que o RFID se configure no modo *SPI Slave* ou no modo *SPI Master*.

Tabela 3. Configurações do EM4325

Descrição	Endereço (hexa)	Valor para	
		<i>SPI Slave</i> (hexa)	<i>SPI Master</i> (hexa)
<i>Temp. Sensor Control Word 1</i>	0xEC	0x0000	0x0000
<i>Temp. Sensor Control Word 2</i>	0xED	0x0000	0x0000
<i>Temp. Sensor Control Word 3</i>	0xEE	0x0000	0x0000
<i>I/O Control Word</i>	0xF0	0x2700	0xE400
<i>Battery Management Word 1</i>	0xF1	0xE001	0xE001
<i>Battery Management Word 2</i>	0xF2	0x8001	0x8001

<i>TOTAL Word</i>	0xF3	0x0000	0x0000
<i>BAP Mode Word</i>	0x10D	0x0001	0x0001
<i>SPI WE Page 1 – 15</i>	0xF4	0x003F	0x0000
<i>SPI WE Page 16 – 58</i>	0xF5 – 0xF7	0xFFFF	0x0000

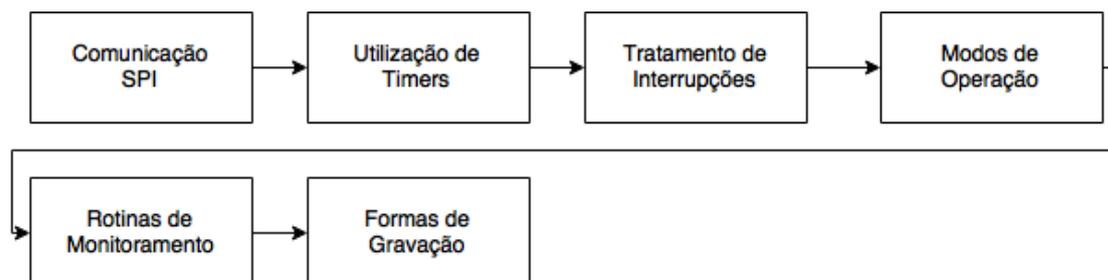
Fonte: O Autor (2015).

4.2. Desenvolvimento do Software Microcontrolador

Os *softwares* desenvolvidos para o μ C implementam as arquiteturas de BAPs mencionadas na seção 4.1.1. Em alguns casos o μ C funciona como *SPI Master* e em outros casos como *SPI Slave*. O *software* foi desenvolvido em camadas, conforme mostra Figura 24, começando com as camadas mais baixas e básicas, como tratamento de interrupções, modos de operação, comunicação SPI entre outras, que seriam utilizadas pela camada da aplicação do monitoramento. Inicialmente foi criada uma versão só da comunicação SPI, enviando e recebendo vários bytes. Depois foi incorporada a utilização dos temporizadores do microcontrolador, necessários para as rotinas de monitoramento. Posteriormente foi adicionada a utilização de interrupções, seguida do uso dos diferentes modos de operação visando redução de consumo. A seguir, foram criadas rotinas de monitoramento de alto nível, com máquina de estados necessária para a utilização da *tag*. Finalmente foram implementadas as rotinas de monitoramento com as diferentes formas de gravação propostas.

O *software* incluiu diferentes formas de gravação de dados, visando à otimização do uso da memória, além de técnicas inteligentes de redução de consumo para aumentar a autonomia da bateria.

Figura 24. Fluxo de desenvolvimento do *software* do μ C



Fonte: O autor (2015).

4.2.1. Formas de gravação

Tanto o RFID quanto o μC são chips que possuem uma capacidade de armazenamento reduzida. O EM4325, por exemplo, possui 192 palavras de 16 bits, totalizando 3072 bits de memória, que podem ser utilizadas pelo usuário. Se uma medida de temperatura de nove bits fosse gravada por posição na memória diretamente, isso permitiria registrar apenas 192 amostras. Pensando em aperfeiçoar a utilização da memória, diferentes formas de gravação de dados foram propostas e são descritas abaixo.

- Modo de gravação:
 - Linear: começa na posição inicial da memória e pára ao chegar ao fim;
 - Circular: grava as leituras infinitamente, realizando um *rollover* ao chegar ao fim da memória.
- Tipos de dados:
 - Absoluto: grava os dados do sensor conforme foram lidos de acordo com intervalo de amostragem;
 - Relativo: grava um dado cru do sensor, seguido de valores menores que demonstram o quanto o valor aumentou ou diminuiu baseado na referência inicial ou na medida anterior;
 - Intermitente: quando uma medida do sensor ultrapassar o limite inferior ou superior configurado, o dado será registrado na memória juntamente com o a informação de data e hora UTC (do inglês, *Coordinate Universal Time*) de quanto o evento ocorreu.

Os dados absolutos do sensor de temperatura do EM4325 possuem nove bits em complemento de dois, com o bit menos significativo representando uma variação de $0,25^{\circ}\text{C}$, sendo possível representar um intervalo de $-64,00^{\circ}\text{C}$ até $63,75^{\circ}\text{C}$, representados -255 até 254 em decimal, respectivamente.

No caso dos valores relativos de temperatura, foi adotado o padrão de quatro bits em complemento de dois, representando 16 valores de -8 até 7. Neste caso, para flexibilizar a aplicação, é possível definir a resolução desejada para as medidas relativas, desde que sejam múltiplas da resolução máxima do sensor de $0,25^{\circ}\text{C}$. Por exemplo, com a resolução padrão de $0,25^{\circ}\text{C}/\text{bit}$ pode-se representar uma variação -2°C até $+1,75^{\circ}\text{C}$, ou então com uma resolução de $0,50^{\circ}\text{C}/\text{bit}$ pode-se representar uma

variação -4°C até $3,50^{\circ}\text{C}$, ou seja, o dobro da representação padrão apresentada anteriormente.

Eventualmente o valor da temperatura atual pode ultrapassar o valor representado pelos quatro bits, algumas palavras reservadas tiveram que ser adotadas para notificar a leitora, de forma que a mesma pudesse reconstruir os dados posteriormente. Foi adotado o valor 7 para indicar que o limite superior de representação foi ultrapassado e o valor -7 para indicar que o limite inferior de representação foi ultrapassado. Existe a necessidade de se representar um valor de temperatura inválido, quanto algum problema ocorre na medida, neste caso o valor -8 foi escolhido para representar um dado inválido. Devido a essas três palavras reservadas, o intervalo de representação possível foi reduzido de 16 valores para 13 valores, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Valores para representação dos dados do tipo relativo

Valores em Decimal	Notação em Binário	Descrição
-8	1000	Dado Inválido
-7	1001	Limite Inferior Ultrapassado
-6 a 6	1010 a 0110	Intervalo permitido
7	0111	Limite Superior Ultrapassado

Fonte: O Autor (2015).

Além da flexibilidade de escolher a resolução para os valores relativos, existiam duas possibilidades de se calcular as diferenças relativas:

- Modo Referencial: baseado sempre na referência inicial absoluta armazenada. A temperatura atual medida é sempre comparada com o último valor de temperatura absoluto medido, armazenando apenas a diferença entre elas.
- Modo Cumulativo: a temperatura atual medida é comparada com a última temperatura e apenas a diferença entre as duas é armazenada.

A temperatura é uma grandeza que não varia bruscamente em um curto intervalo de tempo, variando gradativamente ao longo do dia. Considerando o modo relativo de armazenagem, com uma resolução de $0,25^{\circ}\text{C/bit}$, tem-se um intervalo $\pm 1,50^{\circ}\text{C}$ para ser representado pelos quatro bits. Toda vez que este intervalo é ultrapassado, uma

temperatura absoluta deve ser armazenada na memória e o processo se reinicia gravando os valores relativos. A Tabela 5 demonstra como a memória ficaria utilizando os dois modos (referencial vs. cumulativo), onde T_x é a temperatura absoluta armazenada em nove bits, R_x é o valor relativo em quatro bits, e o “x” representa o índice da amostra de temperatura. Dado a economia de bits para variações pequenas de temperatura, foi adotado o algoritmo cumulativo para o cálculo do modo relativo.

Tabela 5. Comparação dos modos relativos

Temperatura	Modo Referencial (bits utilizados)	Modo Cumulativo (bits utilizados)
$T1 = 25^{\circ}\text{C}$	$T1 = 25^{\circ}\text{C}$ (9)	$T1 = 25^{\circ}\text{C}$ (9)
$T2 = 26^{\circ}\text{C}$	$R2 = T2 - T1 = +1^{\circ}\text{C}$ (4)	$R2 = T2 - T1 = +1^{\circ}\text{C}$ (4)
$T3 = 27^{\circ}\text{C}$	$R3 = T3 - T1 = +2^{\circ}\text{C}$ L.S.U. ¹⁴ (4)	$R3 = T3 - T2 = +1^{\circ}\text{C}$ (4)
$T4 = 28^{\circ}\text{C}$	$T3$ e $R4 = T4 - T3 = 1^{\circ}\text{C}$ (9+4)	$R4 = T4 - T3 = +1^{\circ}\text{C}$ (4)
$T5 = 29^{\circ}\text{C}$	$R5 = T5 - T3 = +2^{\circ}\text{C}$ L.S.U. (4)	$R5 = T5 - T4 = +1^{\circ}\text{C}$ (4)
Total de Bits	34 bits	25 bits

Fonte: O autor (2015).

O tipo de dados Intermitente grava um dado de nove bits de temperatura seguido do índice de 23 bits da amostra de temperatura. Cruzando a informação do UTC¹⁵ de 32 bits, o intervalo de amostragem e o índice da amostra configurados na BAP *tag* é possível identificar quando a violação dos limites de temperatura ocorreu, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Cálculo da data do evento do tipo Intermitente

Data Inicial	UTC Inicial (decimal)	Intervalo Amostragem	Índice Amostra	UTC do Evento	Data do Evento
01/07/2015 08:00:00	1435737600	1 segundo	3600	1435741200	01/07/2015 09:00:00

Fonte: O Autor (2015)

¹⁴ L.S.U. – Limite Superior Ultrapassado

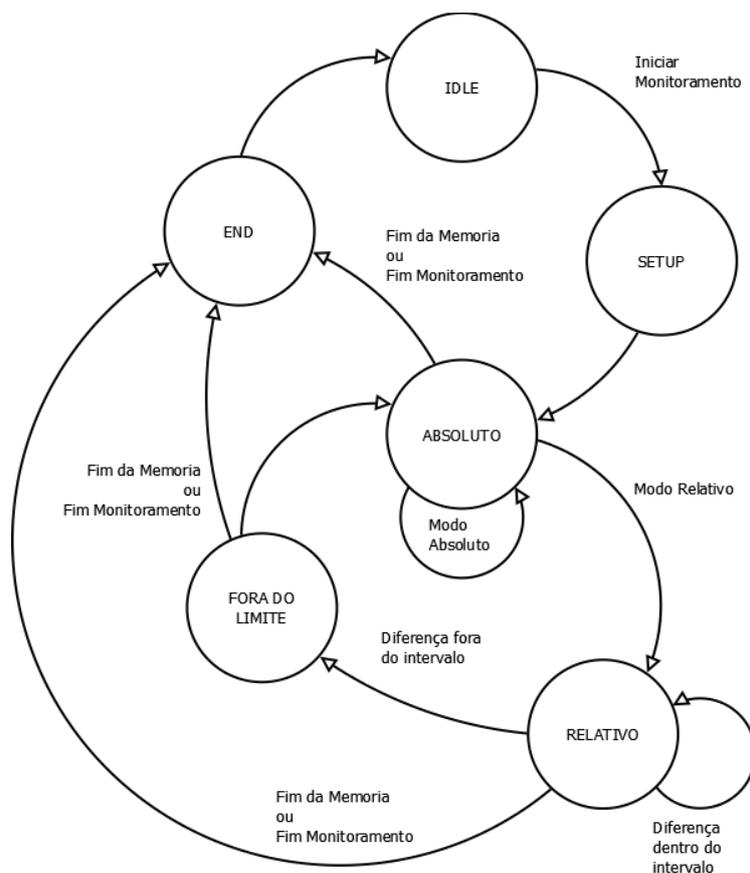
¹⁵ UTC considera os segundos que passaram desde 00:00:00 de 01/01/1900.

O modo linear e o modo circular de gravação de dados serão explicados nas seções seguintes devido a suas complexidades.

4.2.2. Modo Linear

A máquina de estado (FSM, do inglês *Finite State Machine*) do modo linear está descrita na Figura 25. O modo linear inicia sua máquina de estado em “Idle” aguardando uma configuração da leitora e um comando para iniciar o monitoramento. Em seguida vai para um estado de “Setup”, onde o μC lê as configurações para o monitoramento: intervalo, precisão, limites inferiores e superiores. No estado “Absoluto” uma medida de temperatura absoluta é armazenada. Dependendo do tipo de dados escolhido, é possível permanecer no mesmo estado ou então trocar para o “Relativo”. No estado “Relativo” são realizadas medidas diferenciais e armazenadas na memória. A *tag* vai para o estado “End” em dois momentos: ao chegar ao fim da memória e quando receber um comando da leitora encerrando o monitoramento.

Figura 25. Máquina de Estado da *Tag* no Modo Linear



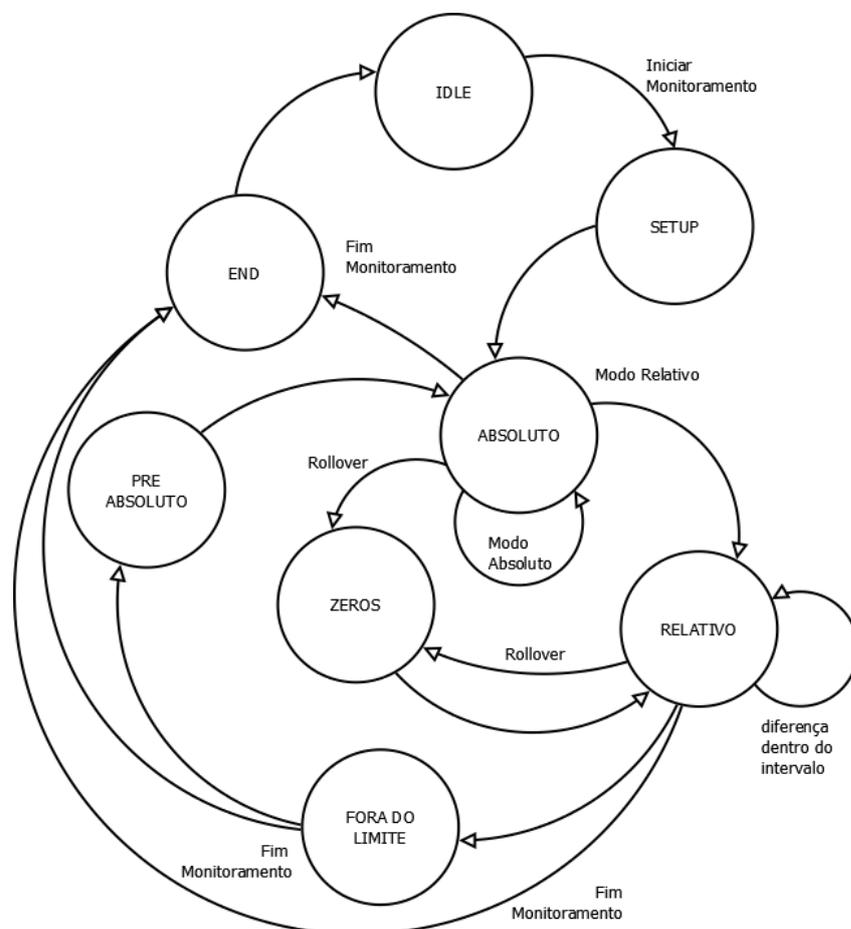
Fonte: O Autor (2015).

4.2.3. Modo Circular

A FSM do modo circular está representada na Figura 26. Ela difere da FSM do modo linear e adiciona uma complexidade maior, pois precisa sobrescrever os dados quando chega ao fim da memória, após realizar o *rollover*, e mesmo assim, permitir que a leitora reconstrua os dados na ordem cronológica correta para mostrar para o usuário.

É importante ressaltar que as memórias dos μC e RFIDs têm um valor finito de ciclos em que podem ser escritas/apagadas. De acordo com a especificação do EM4325, a memória dela tem um *endurance* de 100.000 ciclos. Por esse motivo, dependendo da forma que a gravação do modo circular for implementada, a memória pode se deteriorar muito rapidamente. Devido a este tipo de limitação, algoritmos de gravação como o *wear leveling* foram propostos, conforme consta em (DONNO, CATARINUCCI e TARRICONE, 2014b), visando o prolongamento da vida da memória. Estes algoritmos visam reduzir o número de escritas na memória ao máximo.

Figura 26. Máquina de Estados da *Tag* no Modo Circular



Fonte: O autor (2015)

Uma das formas possíveis de implementação seria gravar em uma posição de memória fixa quantas amostras de temperaturas foram realizadas e, através de pós-processamento, as amostras poderiam ser reconstruídas cronologicamente na leitora. Esta forma é eficaz, porém deteriora rapidamente a posição de memória que grava a informação do contador em comparação com as outras posições.

Existe também a possibilidade de calcular a quantidade de temperaturas lidas com base na data e hora inicial registrada na *tag* e o intervalo de medida adotado. Conhecendo dois parâmetros é possível inferir que as gravações na memória sofreram *rollover*. Esta forma apenas indica à leitora que alguns dados gravados na *tag* tenham sido sobrescritos, porém não fornece a informação exata de qual é o dado mais antigo gravado e qual é o dado mais novo.

Na presente dissertação, para solucionar estes problemas da gravação do modo circular, algumas palavras reservadas precisaram ser definidas para permitir que a leitora entendesse a separação dos valores antigos dos mais novos. Para o modo absoluto circular, foi adotado nove bits de zeros, pois a memória tem seus valores todos zerados no início do monitoramento. Para o modo relativo circular, foi adotado o padrão de quatro bits de zeros. Em ambos os casos, o valor zero de temperatura nos modos absoluto e relativo tiveram que ter seus valores alterados para -256 e -8, respectivamente, pois, em função disso, o valor absoluto e relativo “zero” possui um novo significado.

Levando em consideração todos estes pontos, algumas regras foram criadas para permitir a releitura destes valores pela leitora de forma que os próprios dados gravados indicassem o próximo valor a ser lido, permitindo também a reconstrução das temperaturas mesmo no caso do modo circular onde existe sobrescrita das temperaturas. São elas:

1. A primeira temperatura armazenada na primeira posição de memória será sempre de nove bits;
2. No modo absoluto, quando a temperatura for 0°C deve se armazenar o valor em nove bits de -255 ao invés do 0. No modo relativo, quando a diferença entre as temperaturas for de 0°C deve ser armazenar o valor -8 ao invés de 0.
3. No modo relativo normal, após uma *flag* de limite ultrapassado, a próxima temperatura será a mesma registrada em nove bits;

4. No modo fixo, somente serão salvas temperaturas absolutas ou relativas que caibam na última linha da memória de forma completa, sendo os últimos bits restantes deixados vazios;
5. No modo circular, a última linha da memória deve gravar obrigatoriamente um valor de absoluto para permitir a reconstrução das temperaturas;
6. No modo circular relativo, quando ocorrer uma *flag* de limite ultrapassado (L), a próxima temperatura será uma temperatura absoluta antiga seguida pela nova temperatura absoluta com o valor;
7. No modo circular relativo, quando houver o *rollover* da memória existe a necessidade de inserir o zero (Z) para controles. A lógica para inserção deve respeitar a seguinte regra: quatro bits de zeros, seguidos de n-bits de zeros (P) até completar a palavra que foi sobrescrita, podendo ser ela uma absoluta ou relativa, sendo que os últimos dois bits antes de completar a palavra devem ser usados como bits de controle (C) que informarão a leitora se o próximo valor é um dado absoluto (A) ou relativo (R). O valor em binário “10” é usado para valores relativos e o valor “11” para valores absolutos:
 $Z[0:3] + P[0:N] + C[0:1] \rightarrow Ax[0:8] \text{ ou } Rx[0:3]$

O Quadro 5, o Quadro 6, o Quadro 7 e o Quadro 8 exemplificam o conteúdo de uma memória com palavras de 16 bits para cada um dos modos: Fixo Normal; Relativo Normal; Fixo Circular; Relativo Circular. Todos utilizando as regras acima descritas. As seguintes nomenclaturas foram utilizadas nas tabelas, por simplificação:

- $Tx[0:N]$: “T” é o tipo de dado salvo, “x” é o índice da medida de temperatura, “[0:N]” é o número de N bits que o dado ocupa na memória;
- Ax: temperaturas absolutas de nove bits;
- Rx: temperatura relativa de quatro bits;
- Lx: limite de temperatura ultrapassado;
- Z: zeros utilizados para sincronização no modo circular;
- P: *zero padding*. Utilizado no modo circular para preencher uma determinada área com N zeros;
- C: bits de controle para o modo circular que indicam que tipo de dado é a próxima amostra (absoluta ou relativa);

Quadro 5. Exemplo Modo Fixo Normal

Linha\Bits	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L0	A1[0:8]								A2[0:6]							
L1	A2[7:8]		A3[0:8]								A4[0:4]					
L2	A4[5:8]				A5[0:8]											

Fonte: O autor (2015)

Quadro 6. Exemplo Modo Relativo Normal

Linha\Bits	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L0	A1[0:8]								R2[0:3]			R3[0:2]				
L1	R3[3]		R4[0:3]			L4[0:3]			A4[0:6]							
L2	A4[7:8]			R5[0:3]			R6[0:3]			R7[0:3]						

Fonte: O autor (2015)

Quadro 7. Exemplo Modo Fixo Circular.

Linha\Bits	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L0	A6[0:8]								Z[0:6]							
L1	Z[7:8]		A3[0:8]								A4[0:4]					
L2	A4[5:8]				A5[0:8]											

Fonte: O autor (2015)

Quadro 8. Exemplo Modo Relativo Circular.

Linha\Bits	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L0	A9[0:8]								Z[0:3]			P[0:1]		C[0]		
L1	C[1]	R4[0:3]			L4[0:3]			A4[0:6]								
L2	A4[7:8]		A5[0:8]								R6[0:3]			R7[0]		
L3	R7[1:3]			A8[0:8]												

Fonte: O autor (2015)

A Tabela 7 exemplifica uma memória de oito posições de uma BAP *tag* operando no modo relativo circular. Nos próximos parágrafos é explicado como a leitora reconstrói os valores mesmo após o *rollover*.

Tabela 7. Exemplo memória no modo relativo circular

Posição	Memória	Temperaturas	Equações
0	A0	$T0 = A0$	(4.2.1)
1	R1	$T1 = A0 + R1$	(4.2.2)
2	R2	$T2 = A0 + R1 + R2$	(4.2.3)
3	R3	$T3 = A0 + R1 + R2 + R3$	(4.2.4)
4	R4	$T4 = A0 + R1 + R2 + R3 + R4$	(4.2.5)
5	UL	Limite Ultrapassado	
6	A4	$T4 = A4$	(4.2.6)
7	A5	$T5 = A5$	

Fonte: O Autor (2015).

Utilizando as relações das equações (4.2.5) e (4.2.6), tem-se a relação entre A4 e as temperaturas medidas anteriores, de acordo com (4.2.7). A Tabela 8 mostra os dados na memória após a sobrescrita da posição zero.

$$A4 = A0 + R1 + R2 + R3 + R4 \quad (4.2.7)$$

Tabela 8. Reconstrução de temperaturas no modo circular relativo

Posição	Memória	Temperaturas	Equações
0	Z	Zeros	(4.2.8)
1	R1	$T1 = A0 + R1$	(4.2.9)
2	R2	$T2 = A0 + R1 + R2$	(4.2.10)
3	R3	$T3 = A0 + R1 + R2 + R3$	(4.2.11)
4	R4	$T4 = A0 + R1 + R2 + R3 + R4$	(4.2.12)
5	UL	Limite Ultrapassado	
6	A4	$T4 = A4$	(4.2.13)
7	A5	$T5 = A5$	(4.2.14)

Fonte: O Autor (2015).

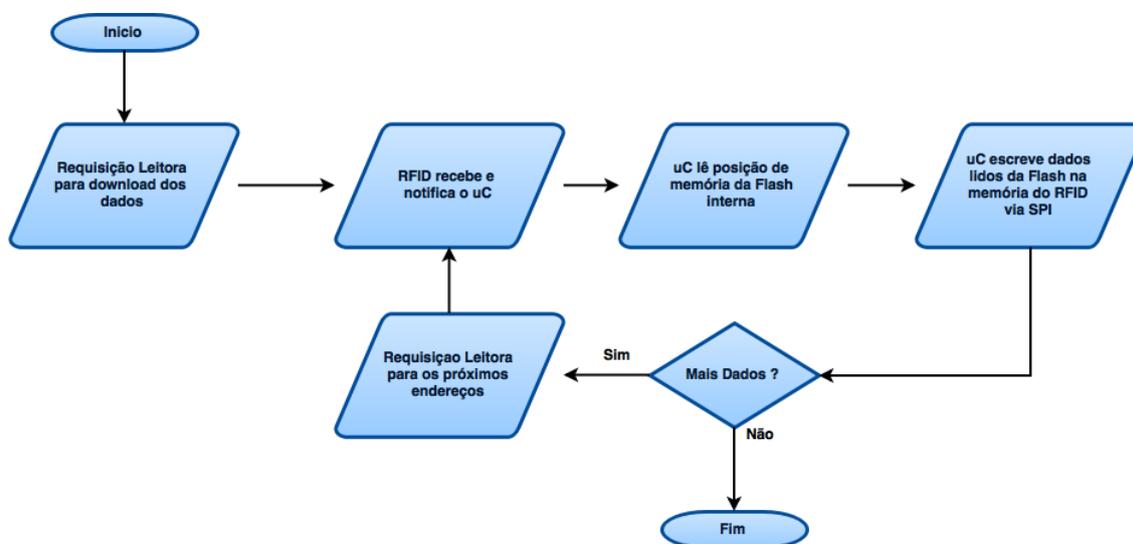
Quando ocorre o *rollover* e os zeros são escritos no início da memória, a leitora precisa reconstruir as temperaturas mesmo não possuindo a referência inicial A0. Isto só é possível utilizando a relação da equação (4.2.7), a qual resolve o valor de A0, originando a equação (4.2.15). Tendo A0 e todos os valores relativos (Rx) na memória é possível reconstruir as temperaturas desejadas.

$$A0 = A4 - (R1 + R2 + R3 + R4) \quad (4.2.15)$$

4.2.4. Download dos Dados do μ C para o RFID

Para realizar o *download* dos dados de temperatura armazenados na BAP *tag*, a leitora de RFID tem que seguir o fluxo apresentado na Figura 27. A leitora inicia o processo enviando uma requisição de leitura dos dados do μ C para o RFID. O RFID notifica o μ C, o qual lê um bloco de 3056 bits de dados a partir da posição de memória requisitada pela leitora e os copia para as posições para o banco de memória do usuário do RFID através do SPI. A leitora por sua vez, pode requisitar o restante dos dados enviando um novo comando para o RFID até o término dos dados, sendo necessárias 43 mensagens para ler a memória de 128kbits inteira do μ C.

Figura 27. Fluxo de download dos dados do μ C para RFID



Fonte: O Autor (2015).

4.3. Modelos de Estimativa do Consumo de Energia das BAPs Tags

A Tabela 9 apresenta a estimativa de consumo de energia para cada uma das arquiteturas propostas e a duração da bateria em anos durante o período em que a BAP não está sendo utilizada.

Tabela 9. Estimativa de consumo de energia *in-shelf*

	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4
Modo Operação μC	--	LPM4	LPM3	LPM4
Corrente do μC (μA)	0	0,1	0,5	0,1
Modo Operação RFID	<i>Sleep</i>	<i>Sleep</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>
Corrente do RFID (μA)	1,70	1,70	0	0
Total de Corrente (μA)	1,70	1,80	0,5	0,1
Bateria CR2032 (mAh)	220	220	220	220
Vida útil da bateria em anos	14,77	13,95	50,23	251,14

Fonte: O autor (2015)

A Tabela 10 apresenta o consumo de energia durante o monitoramento de temperatura considerando um intervalo de 1 segundo entre as medidas e com o μC operando com um *clock* de 1 MHz. As BAPs do tipo 2, 3 e 4 podem realizar as mesmas transições entre os modos de operação do μC , obtendo a mesma autonomia da bateria, em torno de 3,4 anos. Porém, para fins de comparação, são demonstradas as variações do tempo de vida útil da bateria quando utilizados outros modos de operação. É importante ressaltar que os consumos podem ser reduzidos drasticamente se a frequência de operação do μC for reduzida, se as trocas de modo de operação do μC forem modificadas ou se o intervalo de monitoramento for ampliado.

Tabela 10. Estimativa de consumo de energia durante monitoramento

Descrição	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4
Modo Operação μC	--	LPM2+XTAL	LPM3+XTAL	LPM3
Corrente do μC (μA)	0	22	0,7	0,5
Modo Operação RFID	Active	Sleep	Sleep	Sleep
Corrente do RFID (μA)	10	1,7	1,70	1,70
Tempo no modo <i>Sleep</i> (ms)	992	984,2	984,2	984,2
Consumo médio modo <i>Sleep</i> (μAs)	9,92	23,3	2,36	2,17
Modo Operação μC	--	AM	AM	AM
Corrente do μC para 3V (μA)	0	320	320	320
Modo Operação RFID	Active	Active	Active	Active
Corrente do RFID (μA)	10	10	10	10
Tempo no modo Ativo ¹⁶ (ms)	8	15,8	15,8	15,8
Consumo médio modo Ativo (μAs)	0,08	5,22	5,22	5,22
Corrente média por segundo (μA)	10	28,5	7,59	7,39
Bateria CR2032 (mAh)	220	220	220	220
Vida útil da bateria em anos	2,51	0,88	3,31	3,40

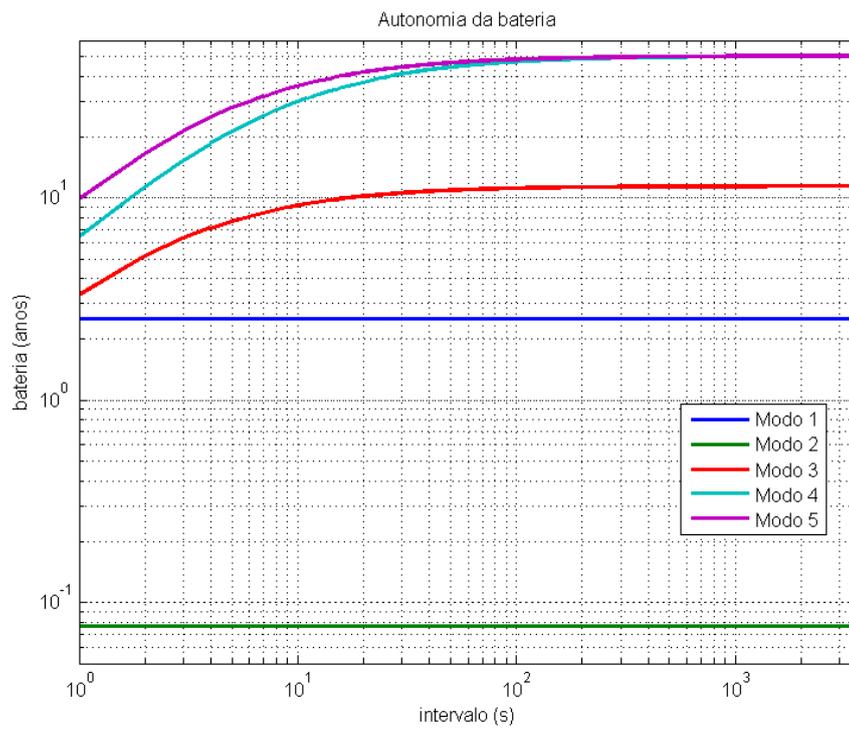
¹⁶ O tempo ativo considera uma leitura temperatura, ler e escrever em posições de memória do RFID.

Fonte: O autor (2015)

A Figura 28 apresenta o efeito que a variação do intervalo de amostragem para medir a temperatura nos diferentes modos de monitoramento no consumo de energia. A bateria considerada foi CR2032 de 220mAh. Para intervalos curtos, predomina o consumo no modo Ativo, porém para intervalos longos, prevalece o consumo no modo *Sleep*. A figura ainda apresenta o efeito no consumo de energia quando se altera a frequência básica do μC de 1 MHz para 580 kHz. Em alguns casos, quando não há restrição de velocidade de comunicação dos dispositivos, é possível reduzir a frequência principal da CPU, visando à redução de consumo geral do sistema durante o modo AM.

- Modo 1: BAP Tipo 1, o RFID está sempre ativo. Consumo médio é de $10\mu\text{A}$. Autonomia da bateria em torno de 2,5 anos;
- Modo 2: BAP Tipo 2. O RFID e o μC estão sempre ativos. Consumo médio é de $330\mu\text{A}$. Autonomia da bateria em torno de 0,07 anos;
- Modo 3: BAP Tipo 2. O RFID e o μC alternam entre modo *sleep* e o ativo. A leitura de temperatura é feita pelo sensor do RFID. O Consumo médio variável, com autonomia da bateria de 3,3 anos até 11 anos;
- Modo 4: BAP Tipo 3 ou Tipo 4. O μC desliga o RFID da energia, somente ligando-o para escrever o resultado na memória. O μC realiza as medidas de temperatura com seu sensor interno. O μC opera numa frequência de 1 MHz. Consumo médio variável, com autonomia da bateria de 6,3 anos até 49 anos;
- Modo 5: BAP Tipo 3 ou Tipo 4. O μC desliga o RFID da energia, somente ligando-o para escrever o resultado na memória. O μC realiza as medidas de temperatura com seu sensor interno. O μC opera numa frequência de 580 kHz. Consumo médio variável, com autonomia da bateria de 9,8 anos até 50 anos;

Figura 28. Autonomia da bateria para diferentes modos de monitoramento



Fonte: O Autor (2015)

4.3.1. Estimativas de Consumo através do CCS

A ferramenta de desenvolvimento CCS possui um *plug-in* chamado *EnergyTracer* o qual permite a medição do consumo de energia do microcontrolador enquanto esta sendo utilizado no modo de depuração.

Esta medida só é possível através da utilização de um gravador especial mostrado a direita da Figura 29, chamado de MSP-FET, para os microcontroladores da família MSP430 que utilizam o JTAG para programação.

Figura 29. Kit de desenvolvimento MSP420 e o MSP-FET



Fonte: O Autor (2015).

O *plug-in* consegue fazer uma estimativa do consumo durante o processo de depuração do código, mas contém algumas restrições quando os modos de operação de ultrabaixo consumo do MSP430 são utilizados, não oferecendo os valores confiáveis de consumo do sistema. Este problema se deve por utilizar mais recursos de *hardware*, incluindo o próprio MSP-FET, para realizar o *debug* e não conseguindo.

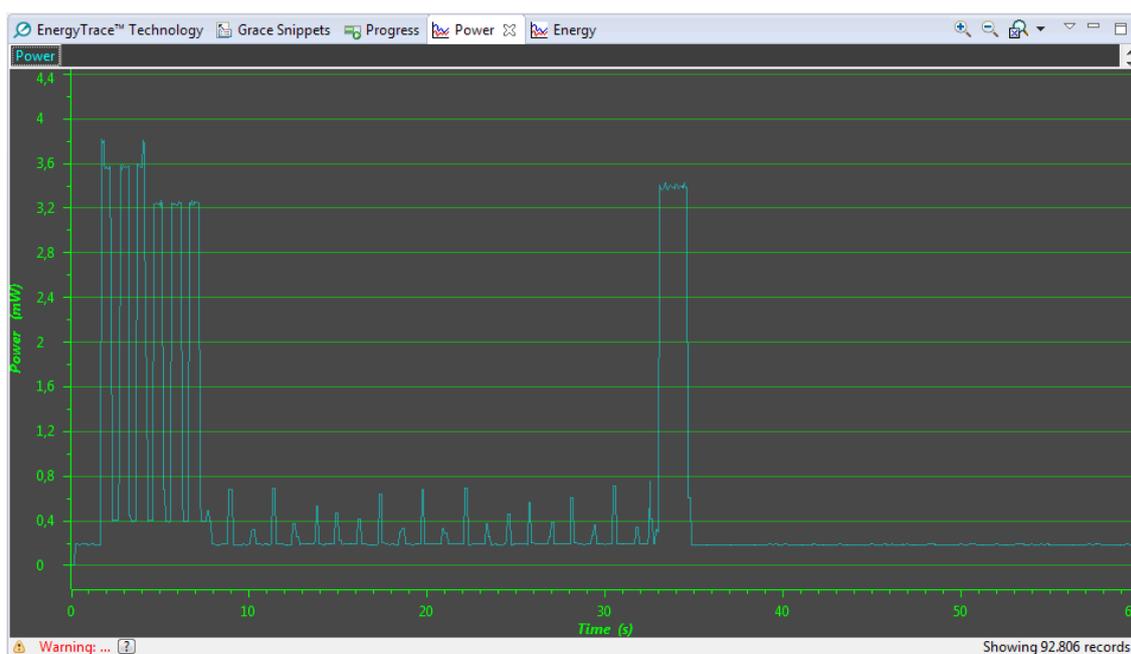
De acordo com o *EnergyTracer*, a BAP *tag* tipo 3 simulada foi alimentada com 3V e possui um perfil de consumo apresentado na Figura 30 e resumido na Tabela 11. De acordo com o gráfico, dois grandes picos de consumo, em torno de 3,1 mW, referentes ao acionamento dos LEDs durante as trocas do modo *Sleep* para o modo Ativo. Durante o modo *Sleep* a *tag* consome um pouco menos que 0,3 mW e no modo Ativo consome em torno de 0,3mW até 0,5mW. A Tabela 11 resume o perfil de consumo estimado pelo *plug-in* e mostra o equivalente em corrente.

Tabela 11. Estimativa de consumo de acordo com *EnergyTracer*

Modo	Potência	Corrente Média
<i>Sleep</i>	< 0,3mW	< 0,1mA
LED Piscando	3,2mW	~ 1mA
Ativo	0,3-0,6mW	~0,094mA

Fonte: O autor (2015).

Figura 30. Estimativa de consumo pelo EnergyTracer do CCS



Fonte: O Autor (2015).

4.4. Modelo das Formas de Gravação

Um modelo em *matlab* foi desenvolvido, implementando quatro configurações possíveis, de forma a realizar diversos tipos de testes e verificar a robustez dos algoritmos. O modelo dividiu o sistema com o código da *tag* que escreve na memória, código da leitora que reconstrói as temperaturas lidas da *tag*, ambiente de simulação que fornece os vetores de temperatura e plota os resultados, verificando se os valores reconstruídos pela leitora estão de acordo com os dados medidos pela *tag*. O modelo considera a memória do EM4325, com 192 palavras de 16 bits cada.

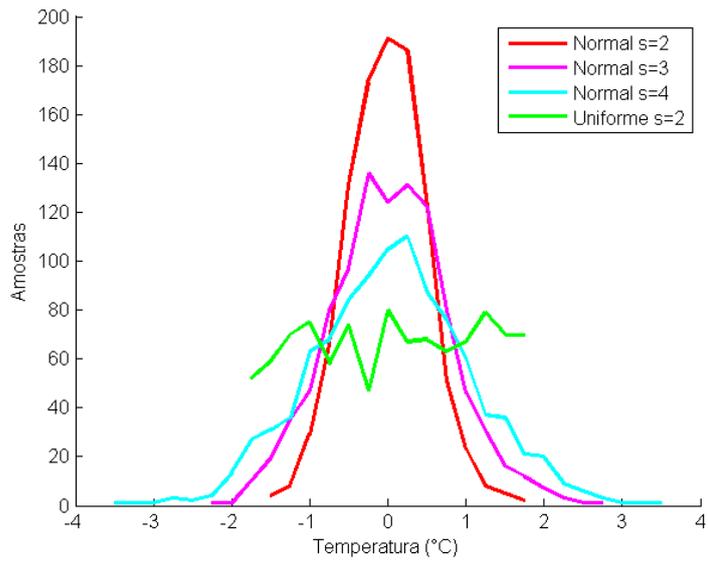
A Figura 31 apresenta as distribuições de temperatura utilizadas para os testes com o modelo da *tag*. Foram utilizadas três distribuições normais com diferentes desvios padrão variando entre dois e quatro, e também uma distribuição uniforme variando entre +/- 1,5°C.

A Figura 32 mostra o comparativo entre os diferentes modos de gravação para cada uma das distribuições analisadas. A distribuição normal com temperaturas de +/- 1,5°C, ou seja, as diferenças entre uma temperatura e a próxima ficaram dentro do intervalo de representação possível do modo relativo com precisão de 0,25°C. Neste caso, é possível notar que ambos os modos relativos conseguem armazenar mais que o dobro de amostras do que o modo absoluto e três vezes mais se consideramos o sistema tradicional de gravação onde cada amostra ocuparia uma posição de memória.

A Figura 33 exemplifica a evolução da temperatura ao longo do tempo considerando uma distribuição normal com desvio padrão de dois, ou seja, com um intervalo entre as temperaturas consecutivas de +/- 1,5°C.

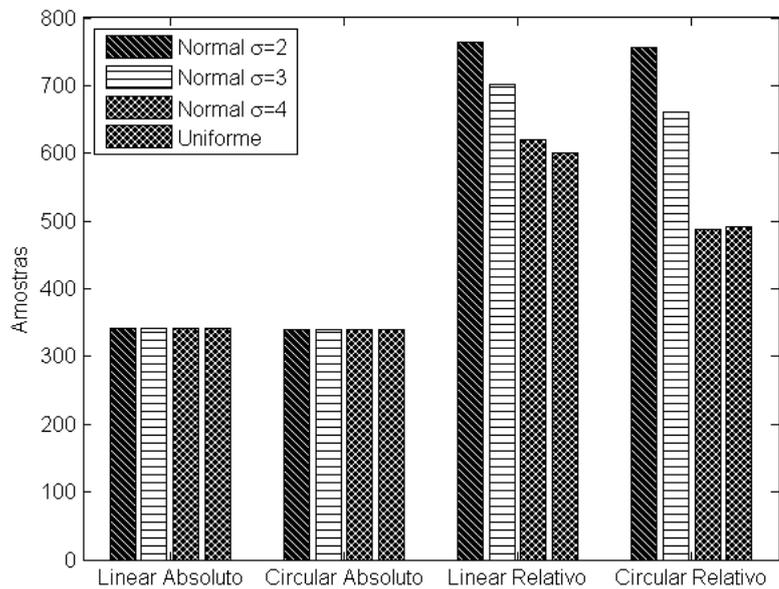
Na distribuição uniforme de temperaturas pode-se notar uma redução drástica na capacidade do modo relativo, devido ao *overhead* causado pelas amostras que ultrapassaram os limites de representação dos dados relativos, pois a probabilidade que ocorram é igual em todo intervalo de amostras.

Figura 31. Distribuições de temperatura utilizadas



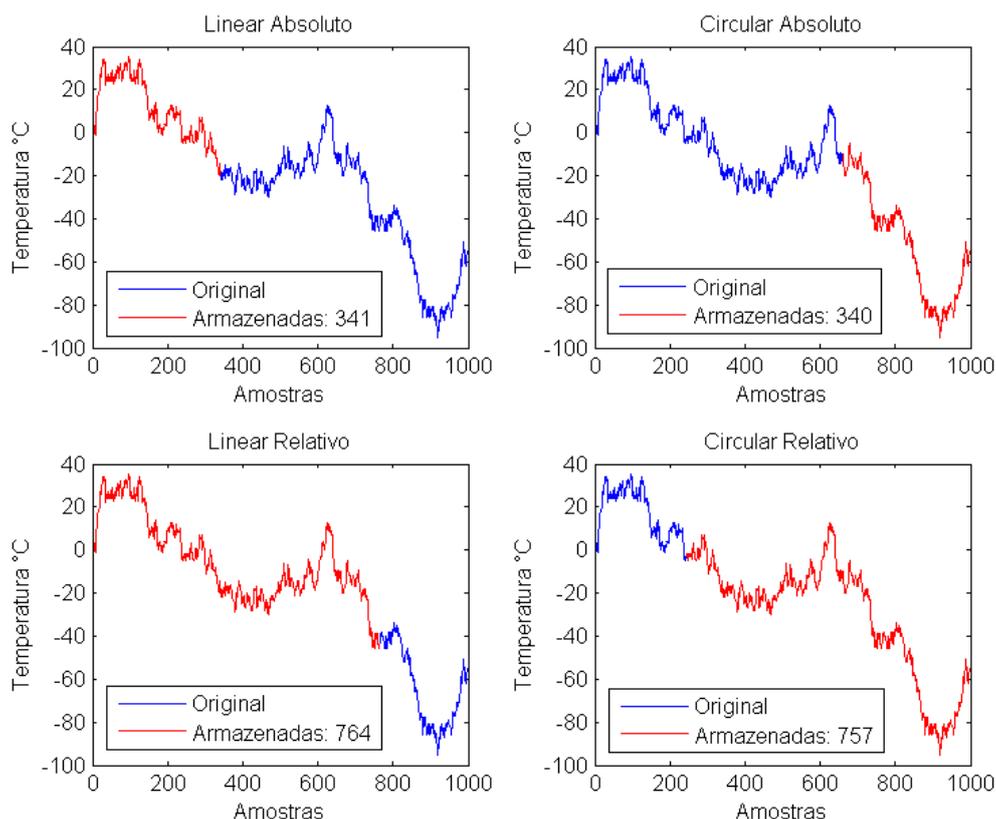
Fonte: O Autor (2015).

Figura 32. Comparação das formas de gravação em memória



Fonte: O Autor (2015)

Figura 33. Distribuição normal de temperatura para os modos de gravação: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$



Fonte: O autor (2015).

4.5. Desenvolvimento do Software da Leitora

O desenvolvimento do software da leitora é dividido em duas grandes etapas: a escolha da leitora; arquitetura do software. Ambas as etapas serão explicadas nas seções a seguir.

4.5.1. Escolha da leitora

Existem diversas leitoras de RFID no mercado, divididas em duas categorias principais: fixas e portáteis. As leitoras fixas possuem um alcance de leitura maior, maior sensibilidade e maior potência, pois estão conectadas diretamente a uma fonte de alimentação contínua. As leitoras portáteis possuem bateria e, normalmente, não possuem uma potência elevada para transmissão de dados.

Dentro destas duas categorias, existem diversas variações de produtos, incluindo opções com e sem *display*, comunicação sem fio (WiFi, Bluetooth), comunicação via rede (LAN), comunicação serial, incluindo leitoras que se comunicam com *smartphones*.

Neste trabalho foram utilizadas duas leitoras, disponibilizadas pela empresa WaveTech, para realização de testes e também desenvolvimento do *software*: a leitora MC9190-Z da Motorola (MOTOROLA SOLUTIONS, 2012) ilustrada na Figura 34; e a leitora AretePOP da Phychips (PHYCHIPS, 2015) ilustrada na Figura 35.

A MC9190-Z possui 30 dBm de potência e polarização linear, podendo alcançar o dobro da distância de leitura do que uma leitora com polarização circular, porém depende da orientação da *tag* a ser lida; diferentemente das com orientação circular, consideradas mais robustas. O custo de um leitor profissional deste tipo fica em torno de R\$ 8.000,00.

O AretePOP possui uma potência menor, de 25dBm, mas tem suporte nativo ao EM4325, incluindo a possibilidade de utilizar os comandos proprietários do chip. Ela precisa de um *smartphone* para funcionar; porém, o seu custo é bem menor se comparado com um leitor profissional, estando em torno de R\$ 1.200,00.

Figura 34. Motorola MC9190-z



Fonte: Adaptado de
(MOTOROLA SOLUTIONS, 2012)

Figura 35. AretePop



Fonte: Adaptado de
(PHYCHIPS, 2015)

4.5.2. Arquitetura dos Softwares das Leitoras

Dois *softwares* foram desenvolvidos, um para cada leitora escolhida, respeitando as peculiaridades de cada BAP, a fim de realizar os testes iniciais de acesso às *tags*. Cada *software* é capaz de mostrar para o usuário as variáveis de interesse em forma gráfica. Foram desenvolvidos utilizando o MVP *design pattern* onde foi proposta a seguinte estrutura para as classes do *software*:

- *Model*: composto pelas classes que tratam a comunicação de dados com o servidor;
- *View*: composto pelas classes específicas de interface gráfica, *activities* e *fragments* no Android e *forms* no *Windows Mobile*, e por interfaces que permitem o desacoplamento de tais classes;
- *Presenter*: composto pelas classes que serão as implementações de cada *presenter* e por interfaces que permitem o desacoplamento de tais classes.

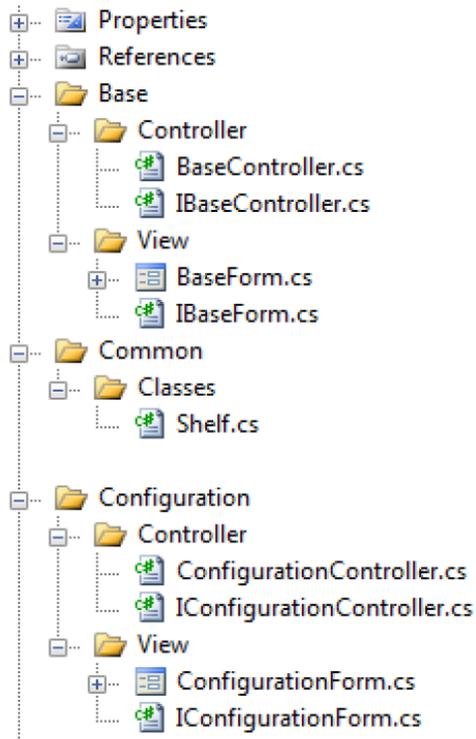
O *software* foi estruturado dividindo as funções de cada tela em uma pasta/*package* única, o qual leva o mesmo nome da tela, conforme exemplifica a Figura 36. Dentro de tal pasta/*package* existe outra pasta/*package* para as *Views* e outra pasta/*package* para os *Controllers* relacionados à tela. Nos casos onde existam mais classes relacionadas à tela, outra pasta/*package* foi criada para conter tais classes.

Existe uma pasta/*package* para o *Model*, que é independente de tela. Ela contém a classe que se comunica com o servidor (*DatabaseHandler*) e demais componentes relacionadas ao *Model*.

Outra pasta/*package*, chamada *Base* e que segue a mesma estrutura das pastas/*packages* de cada tela, armazena as classes que servem como base para as demais. Estas classes utilizam a preposição “*Base*” seguida do sufixo com o tipo da classe que possuem funcionalidades comuns a todas as classes derivadas dela. Um exemplo é a *BaseView* que implementa a funcionalidade de mostrar uma mensagem ao usuário.

Para as funcionalidades específicas de *hardware*, outra pasta/*package* foi criada para conter o código relacionado ao *hardware*. Já a pasta/*package* *Common* contém os recursos comuns a diversas áreas do *software*.

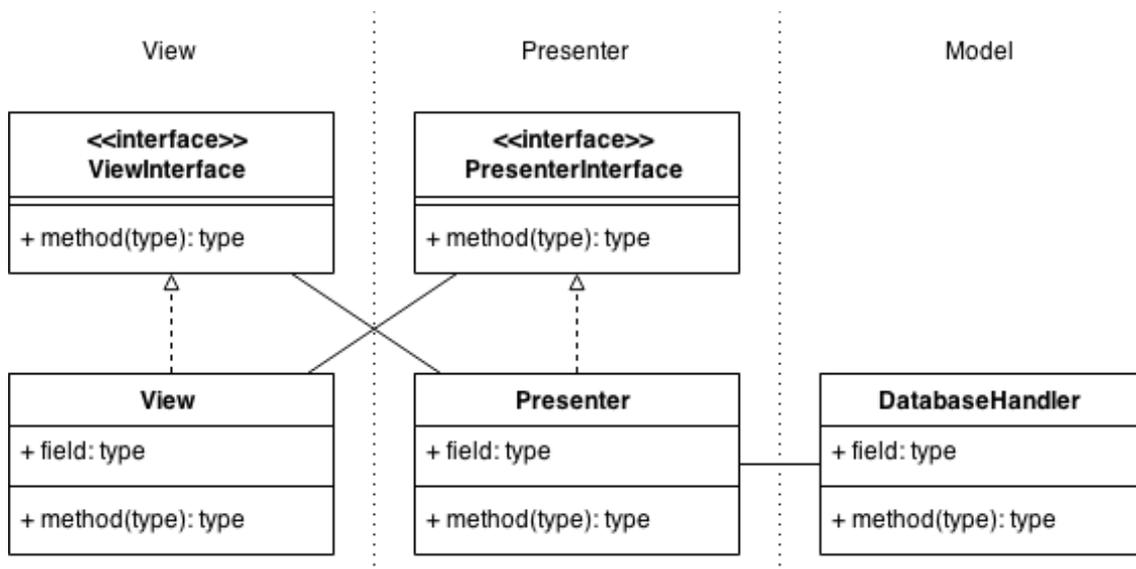
Figura 36. Estrutura de pastas do padrão MVP desenvolvido



Fonte: O Autor (2015).

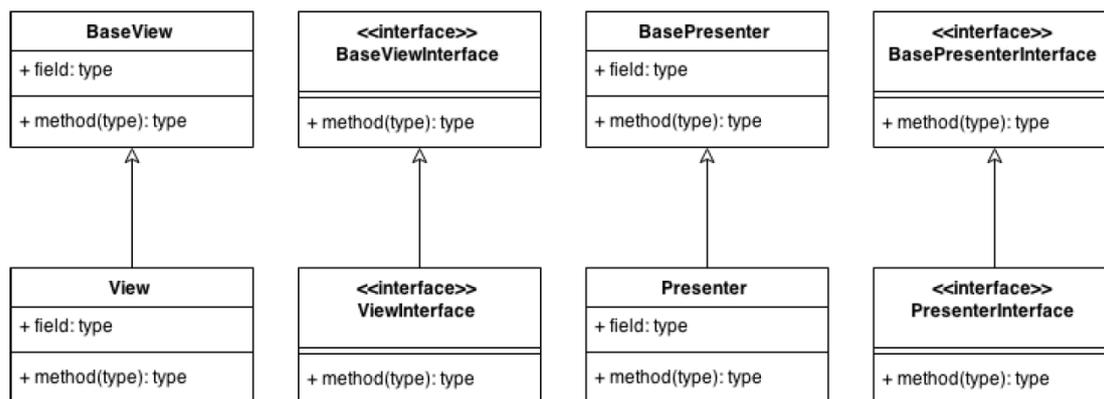
A Figura 37 ilustra a relação entre as classes das diferentes camadas do MVP enquanto a relação de herança das classes é explicada na Figura 38.

Figura 37. Estrutura das classes seguindo o MVP



Fonte: O Autor (2015).

Figura 38. Herança das classes seguindo o modelo apresentado



Fonte: O Autor (2015).

Algumas classes básicas definem o conjunto mínimo de métodos e parâmetros que devem ser implementados:

- **BaseViewInterface**: classe básica para implementação da interface da *view*.
- **BaseView**: classe básica para implementação de *Views*;
- **BasePresenterInterface**: classe básica para implementação da interface do *Presenter*;
- **BasePresenter**: classe básica para implementação de *Presenters*;
- **BaseModel**: classe básica para implementação de *Models*;
- **BaseReader**: classe básica para implementação de leitor. Define funções como ler, escrever, inventariado;
- **BaseBAP**: classe básica para implementação da BAP *loggers*;
- **DataBaseHandler**: classe que se comunica com o servidor remoto através do protocolo JSON;
- **Reader MC-9190Z**: Classe que implementa as funções básicas do **BaseReader** para a leitora Motorola MC-9190Z ou para o AretePop;
- **TagEM4325**: Classe que implementa o mapa de memória, configuração da BAP, acesso às informações dos sensores, como o de temperatura, baseada no chip EM4325;

O *software* possui três grandes módulos:

- Inventariado: identifica os medicamentos com *tags* passivas de RFID dentro de um contêiner (caixa ou armário). Visualiza as informações como número de lote, data de vencimento e data de fabricação;
- Setup: realiza a configuração da BAP para o monitoramento, definindo o limite superior, o limite inferior, o intervalo de monitoramento, calibração do sensor, entre outras funções.
- Visualizador: lê as medidas armazenadas no BAP e mostra-as em um gráfico, tornando possível que o usuário verifique se o transporte ou armazenagem do produto estava dentro das condições pré-estabelecidas.

O *software* que utiliza o AretePOP foi desenvolvido para Android e as suas telas podem ser vistas na Figura 39. O AretePOP permite a comunicação direta com o μ C da BAP desenvolvida através do comando proprietário “SendSPI” do EM4325. Este comando só é executado quando o EM4325 está como SPI Master e o μ C como *SPI Slave*, visando o acesso direto da leitora com o μ C, fazendo um *by-pass* pelo RFID. O comando SendSPI é explicado no Quadro 9, no Quadro 10 e no Quadro 11.

Quadro 9. Comando proprietário EM4325 do leitor para *tag*.

Leitor => <i>Tag</i>	Comando	SPI Packet	RN	CRC-16
# de bits	16	20-76	16	16
Descrição	0xE002		RN16	

Fonte: Adaptado de (EM MICROELECTRONIC, 2015).

Quadro 10. SPI Packet do comando SendSPI.

Tamanho Comando	Tamanho Resposta	SCLK	<i>Delay</i> Inicial	<i>Delay</i> entre bytes	Comando SPI
3	3	2	2	2	8-64
Número de bytes no comando	Número de bytes na resposta	00 – 40kHz 01 – 80kHz 10 – 160kHz 11 – 320kHz	00 – 1 SCLK 01 – 50us 10 – 500us 11 – 5ms	00 – nenhum 01 – 50us 10 – 100us 11 – 500us	Data para SPI Slave

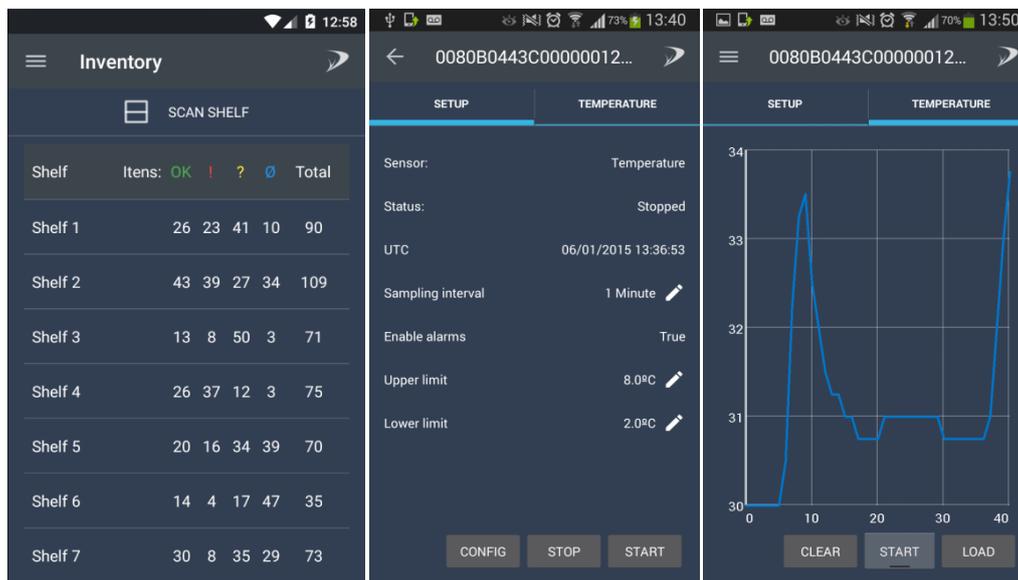
Fonte: Adaptado de (EM MICROELECTRONIC, 2015).

Quadro 11. Resposta do comando proprietário SendSPI da *Tag* para Leitor.

<i>Tag</i> => Leitor	Header	Resposta SPI	RN	CRC-16
# de bits	1	0 – 56	16	16
Descrição	0	Data do SPI Slave	RN16	CRC-16

Fonte: Adaptado de (EM MICROELECTRONIC, 2015).

Figura 39. AretePop Inventariado, Setup e Viewer



Fonte: O Autor (2015)

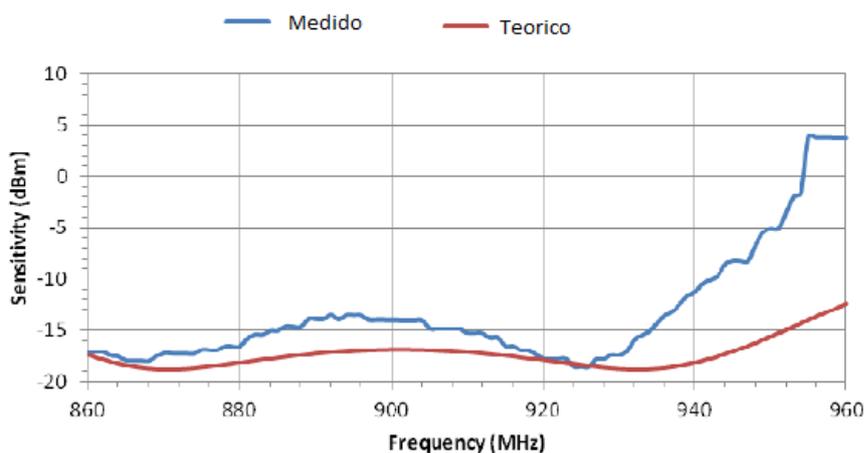
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, incluindo os testes de *software* e hardware nas BAP *tags*, os problemas encontrados e comparações deste trabalho com outros similares no mundo acadêmico.

5.1. Testes e Medidas de Sensibilidade das BAP Tags

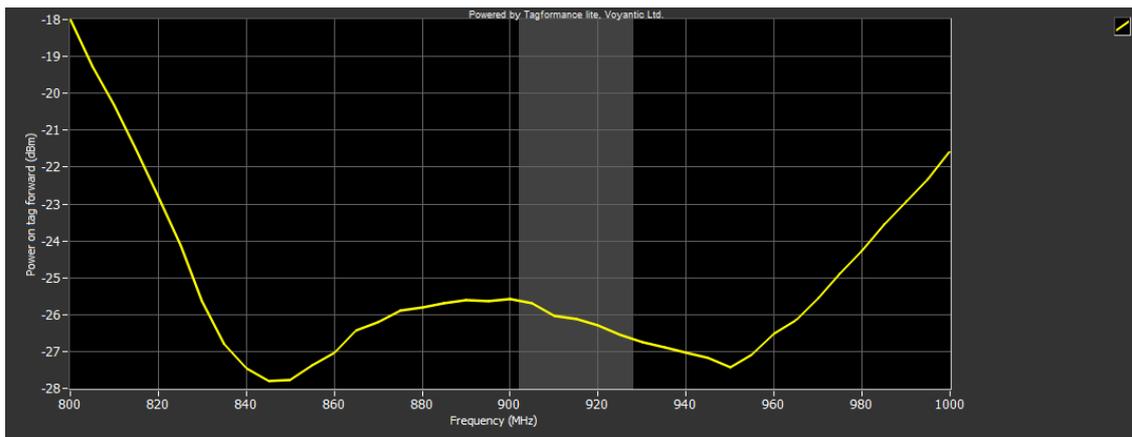
Após a fabricação das *tags* foram feitos testes de sensibilidade, confrontando os resultados obtidos com os de simulação. Os testes realizados no protótipo inicial e no segundo protótipo são apresentados na Figura 40 e na Figura 41, respectivamente. Nestes testes foi verificada a resposta das *tags* a uma requisição simples da leitora, variando as frequências da comunicação, assim como a potência emitida pela leitora até que a *tag* pare de responder dentro de uma câmara anecóica. Estas câmaras são utilizadas para isolar a interferência que pode existir no ambiente, o que pode alterar os resultados de sensibilidade esperados. O equipamento utilizado nos testes da câmara anecóica foi uma leitora RFID Voyantic com antena linear, iniciando com 30dBm de potência.

Figura 40. Sensitividade do protótipo inicial



Fonte: Adaptado de (WEAKLEY, 2014).

Figura 41. Sensibilidade do segundo protótipo



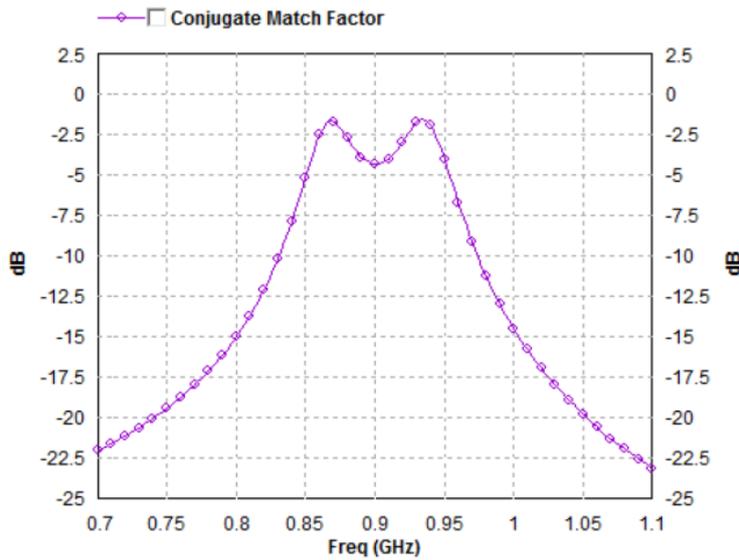
Fonte: O autor (2015).

Um teste detalhado foi realizado no protótipo inicial para verificar as perdas existentes na fabricação da *tag* e está disponível na Tabela 12. Como pode ser observado, existe uma perda de *mismatch* entre o casamento de impedância da antena e do chip, apresentado na Figura 42, perda na eficiência de transmissão da energia recebida da leitora pela *tag*, e ganho associado à diretividade da antena. O resultado final é a sensibilidade da *tag*, em torno de -18 dBm.

Tabela 12. Sensibilidade teórica protótipo inicial

Parâmetros	Frequência (MHz)	
	867	915
Sensibilidade Chip (dBm)	-28	-28
Perda <i>Mismatch</i> (dB)	1.75	3.5
Eficiência Radiação (%)	11.4	13.7
Perda de eficiência de radiação (dB)	9.4	8.6
Diretividade da Antena (dBi)	1.7	1.8
Sensibilidade da <i>Tag</i> (dBm)	-18.55	-17.7
Leitura Estimada (m)	7.4	8.9

Fonte: Adaptado de (WEAKLEY, 2014).

Figura 42. Perda *mismatch* entre EM4325 e antena no protótipo inicial

Fonte: Adaptado de (WEAKLEY, 2014).

De acordo com as equações abaixo, pode ser calculada a distância teórica (r_{tag}) que as *tags* alcançariam. As equações consideram a sensibilidade da *tag* (P_{tag}), o comprimento de onda utilizado (λ) e a potência isotrópica irradiada pela leitora (EIRP) (LUH e LIU, 2013).

$$P_{tag} = EIRP \left(\frac{\lambda}{4\pi * r_{tag}} \right)^2 \quad (5.1.1)$$

$$r_{tag} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \sqrt{\frac{EIRP}{P_{tag}}}, \text{ sendo que } \lambda = \frac{c}{f} \quad (5.1.2)$$

$$P_{loss} = 20 * \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad (5.1.3)$$

As equações de distâncias são simplificações em dB e para convertê-las em distância em metros deve-se usar a Equação (5.1.4).

$$r_{tag} = 10^{\left(\frac{EIRP - P_{tag} - P_{loss}}{20} \right)} \quad (5.1.4)$$

Para o cálculo da distância teórica, foi considerado o EIRP de 30 dBm (com base no *datasheet* da leitora MC9190z), um comprimento de onda de 915MHz, e a sensibilidade das *tags*, medida anteriormente. A Tabela 13 faz a comparação entre o

primeiro e o segundo protótipo. A discrepância entre a distância teórica e a distância medida está relacionada às perdas e interferências nos testes em campo, que não são consideradas nos testes com câmaras anecóicas. Além destas perdas, deve-se ter ciência que leitores portáteis possuem usualmente uma sensibilidade de leitura menor que leitores fixos, pois possuem antenas menores e estão suscetíveis a movimentos do operador por serem utilizados manualmente ao invés de um suporte fixo.

Tabela 13. Comparação entre as BAP *tags* desenvolvidas

Descrição	Sensibilidade (dBm)	Distâncias Medidas ¹⁷	Distâncias Teóricas
Protótipo Inicial	-17.7	5 m	8,9 m
Segundo Protótipo	~ -27.5	9 m	~40 m

Fonte: O autor (2015).

¹⁷ Considerando a leitora MC9190-z, cuja leitora máxima teórica é de 9m

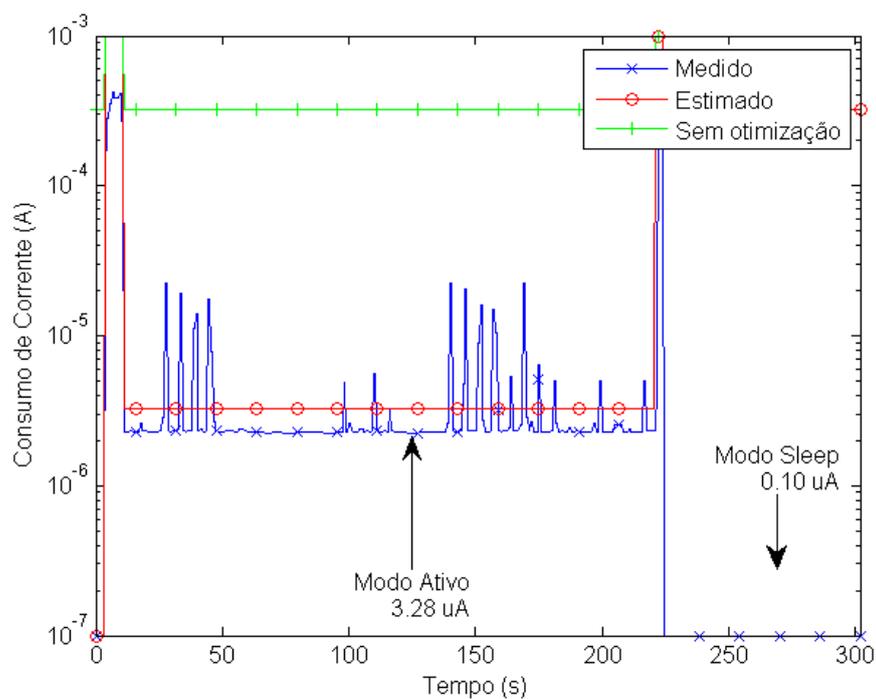
5.1.1. Testes do Perfil de Consumo - BAP Tipo 3

A Figura 43 mostra o perfil de consumo da BAP Tipo 3 durante o modo *Sleep* e também durante o modo Ativo para um monitoramento com intervalo de amostragem de 5 segundos. A BAP foi configurada para operar como uma BAP Tipo 2, ou seja, sem desligar a energia do RFID durante o modo Ativo, mas ela desliga a energia do RFID durante o modo *Sleep*. As medidas foram obtidas utilizando o multímetro de mesa da Minipa MDM-8156B. Infelizmente este equipamento possui uma frequência de amostragem de 2 Hz, prejudicando a análise do consumo, pois dificulta a análise dos picos e também dos tempos reais de cada valor.

O gráfico mostra que no código sem otimizações, a *tag* consome em torno de $400\mu\text{A}$ com 3V de alimentação, quando nenhum LED está em uso. Utilizando as técnicas de otimização, o μC encontra-se em LPM4 e, portanto, consome $0,1\mu\text{A}$, porém este valor não pode ser medido utilizando o multímetro de mesa e foi adaptado para o gráfico. O consumo médio no modo ativo alcança o consumo de $3,28\mu\text{A}$ contra $3,27\mu\text{A}$ estimados, com curtos picos de $22\mu\text{A}$ quando a *tag* realiza uma medida de temperatura. Considerando uma pilha CR2032 de 220 mAh, a duração da bateria durante o monitoramento seria de 7,65 anos.

Pode-se notar um pico de consumo em torno de 1mA em dois momentos do gráfico. Isto ocorre devido ao acionamento de LEDs para notificar ao usuário da transição entre os modos de operação *Sleep* e Ativo.

Figura 43. Medida de consumo de energia da BAP Tipo 3



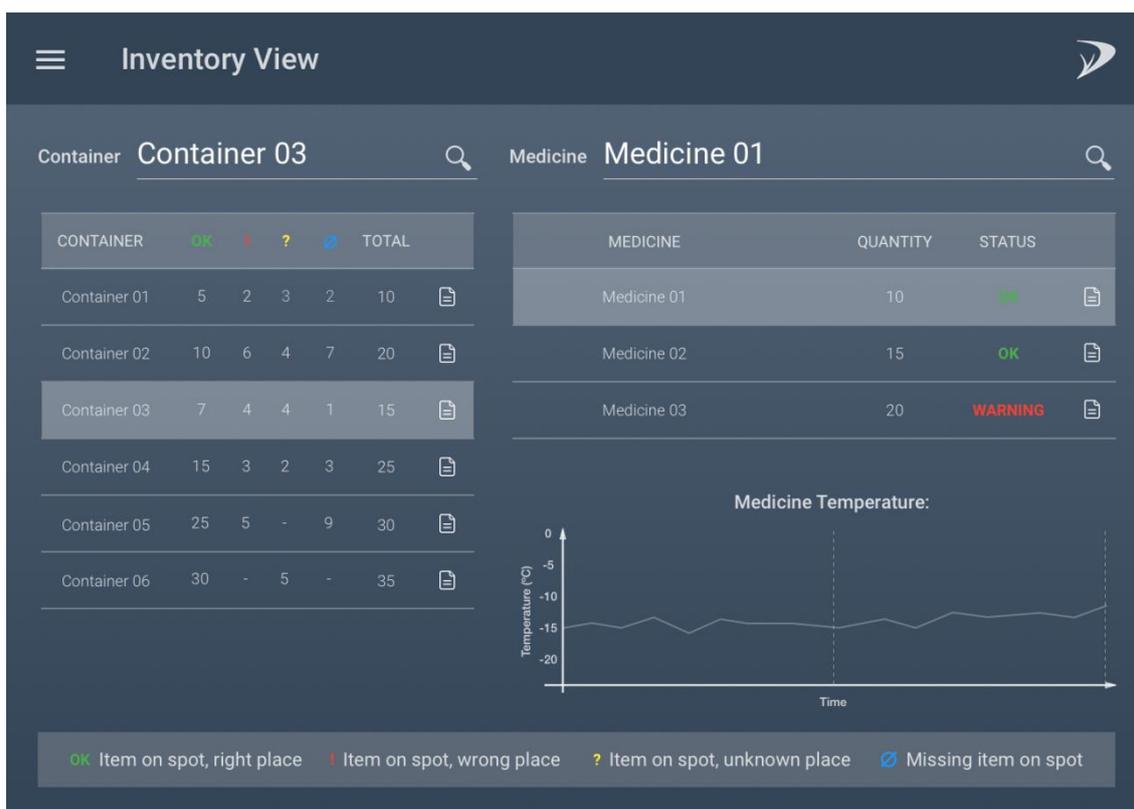
Fonte: O autor (2015)

5.1.2. Testes do Software da Leitora

Ambas as leitoras foram testadas utilizando diversos tipos de *tags* passivas e também com as BAP *tags* desenvolvidas. Os testes com as BAPs foram realizados de forma iterativa, resolvendo os problemas referentes ao tratamento e manipulação dos dados e configuração das BAPs.

Os testes também envolveram o envio dos dados para um servidor remoto. Foi utilizado um *website* simples para visualização dos dados salvos no banco de dados, conforme mostra a Figura 44, onde é possível verificar o estoque em diversos containers, seus respectivos medicamentos e o histórico de temperatura a que um medicamento foi submetido ao longo da cadeia.

Figura 44. Tela do site para visualização dos dados do sistema.



Fonte: O Autor (2015).

5.2. Problemas Comunicação entre BAP *Tag* e Leitora

Nesta seção serão abordados os problemas encontrados durante o desenvolvimento deste trabalho em relação à comunicação das leitoras escolhidas com a BAP *tag* desenvolvida. Estes problemas tiveram que ser contornados ao longo do trabalho para que fosse possível acessar todas as funcionalidades propostas da *tag*.

5.2.1. Problemas com a Leitora MC9190-Z

A leitora MC9190-z foi escolhida dentre diversas opções no mercado pela empresa WaveTech, que apoiou este trabalho, visando o melhor custo-benefício para uma leitora profissional de longo alcance. A princípio, como a leitora é compatível com o protocolo EPC Gen2, ela funcionaria adequadamente com o chip RFID escolhido. Entretanto, nem todas as leitoras de RFID são compatíveis com o chip EM4325, pois ele utiliza um protocolo estendido do EPC Gen2 chamado de XPC, necessário para acessar a *tag* para leituras e escritas. Este fato só foi de conhecimento do autor após a compra da leitora da Motorola e, até receber as amostras do EM4325 e montar o protótipo inicial, acreditava-se que a *tag* funcionaria sem problemas, o que não ocorreu.

Em função dos problemas encontrados no acesso à *tag*, um trabalho conjunto com a equipe de suporte da Motorola foi desenvolvido desde novembro de 2014. O problema só foi resolvido quando a empresa EM Microelectronics, fabricante do RFID, passou a intermediar a comunicação com a Motorola, solucionando paliativamente o problema, em janeiro 2015.

A solução encontrada foi utilizar filtros de pesquisa para os comandos de leitura e escrita de memória no RFID. Este filtro seleciona um grupo de *tags* com base no ID (EPC CODE), aplicando um mascaramento, onde apenas as *tags* que possuam os IDs que sejam semelhantes ao filtro irão responder às requisições. No caso da MC9190-z, o filtro enviado possui exatamente o código EPC inteiro da *tag* de interesse, fazendo com que apenas ela responda dentro do campo enquanto as outras permanecem inertes.

5.2.2. Problemas com o SendSPI da Leitora AretePop

Existem alguns comandos proprietários necessários para acessar diretamente algumas funcionalidades do chip como, por exemplo, o comando de “GetSensorData” e o “SendSPI”, os quais nem todas leitoras implementam. Das leitoras utilizadas, apenas a AretePop dá suporte a comandos proprietários. Através dela foi possível criar o

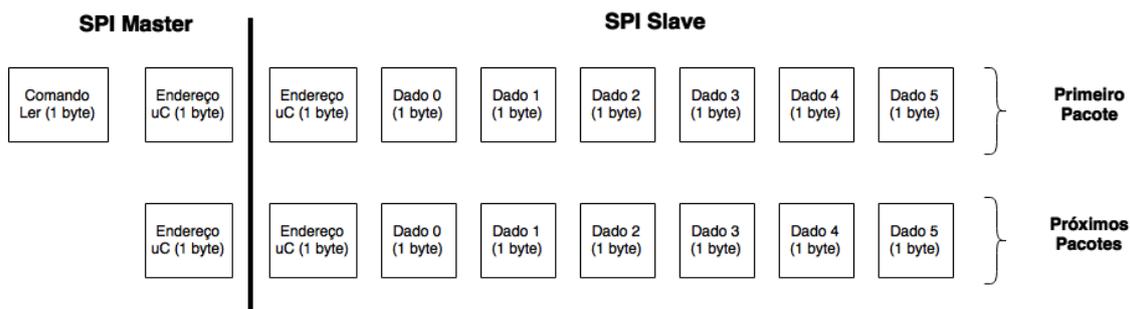
comando proprietário “SendSPI” através do SDK de desenvolvimento da leitora, utilizando uma função genérica chamada “genericTransport”.

Uma das possibilidades das arquiteturas das BAPs era utilizar o RFID como *SPI Master* e o μ C como *SPI Slave*, acessando os dados gravados dentro do μ C através do comando de “SendSPI”. De acordo com o *datasheet* do EM4325, é possível ler no máximo 7 bytes do μ C por comando com uma velocidade de 320kHz utilizando uma comunicação *half-duplex*. A memória do μ C possuiu 16 kBytes de Flash, transmitindo 7 bytes por vez, precisando de 2341 comandos “SendSPI” para fazer o *download* completo da memória.

Teoricamente, não haveria a necessidade de se aguardar um tempo entre os bytes enviados/recebidos entre o *Master* e o *Slave* mas, na prática, isso não se verificou, sendo necessário adicionar um atraso entre os bytes de 50 μ s. De acordo com as medidas realizadas no osciloscópio, a comunicação SPI entre o RFID e o μ C, devido a uma requisição do comando de SendSPI, leva em torno de 180 μ s, compondo o tempo de transmissão de 1 byte do Master, 50 μ s entre os bytes de recepção e o tempo de 2 bytes de recepção.

Sabendo que a frequência de transmissão é de 320 kHz pode-se definir que o tempo mínimo para se transmitir ou receber um byte é de 25 μ s, e que o tempo entre os bytes é de 50 μ s, podendo-se calcular que a transmissão SPI levaria na média 550 μ s(7*50 μ s+ 8*25 μ s). A Figura 45 apresenta uma proposta de protocolo entre a leitora e o BAP *tag*, enviando primeiro o comando de leitura e após enviando apenas endereços de leitura, enquanto o μ C apenas retorna o endereço que ele está respondendo, e os valores. Esta abordagem limita em 6 bytes de dados para serem transmitidos, aumentando a quantidade de comandos RF necessários para ler a memória inteira de 2341 comandos para 2731 (16*1024 / 6).

Grosseiramente, se cada comando leva em torno de 550 μ s, a leitura completa dos 16kbytes da memória levaria 1,5 segundos, um valor totalmente factível para uma aplicação deste nível.

Figura 45. Exemplo de pacotes SPI entre μ C e RFID

Fonte: O Autor (2015)

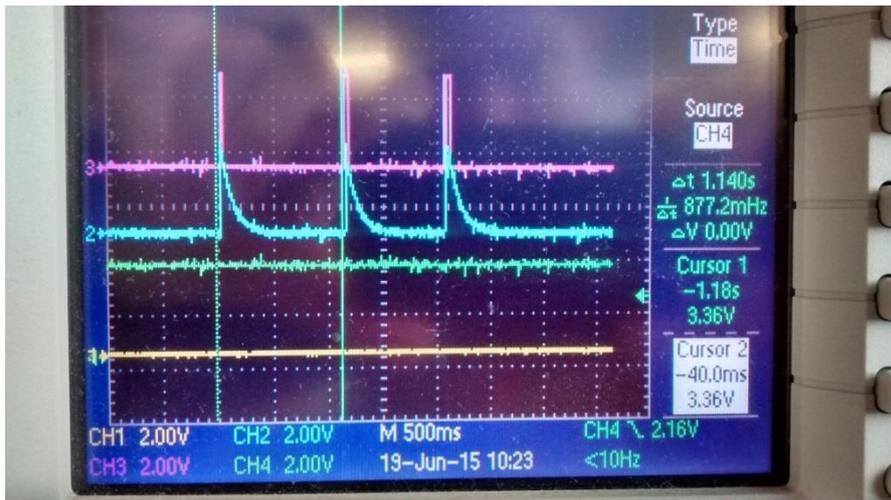
Figura 46. Medidas do tempo de transmissão e recepção da comunicação SPI



Fonte: O Autor (2015).

No entanto, este valor estimado não é real, devido à limitação da leitora AretePop de enviar comandos "SendSPI" consecutivos rapidamente. Através de um teste com osciloscópio, e observando o comportamento do pino Aux do RFID, conforme a Figura 47, o tempo entre dois comandos RF é de aproximadamente 1,1 segundo. Como são necessários 2731 comandos "SendSPI" para fazer o *download* completo dos dados, levaria em torno de 45 minutos, um tempo totalmente impraticável.

Figura 47. Intervalo de requisições do AretePop



Fonte: O Autor (2015).

5.3. Problemas e Observações Relacionados à BAP tag

Nesta seção serão abordados alguns problemas e observações a respeito apenas na BAP tag desenvolvida. Alguns problemas possuem fácil solução, outros exigem um esforço um pouco maior para serem resolvidos.

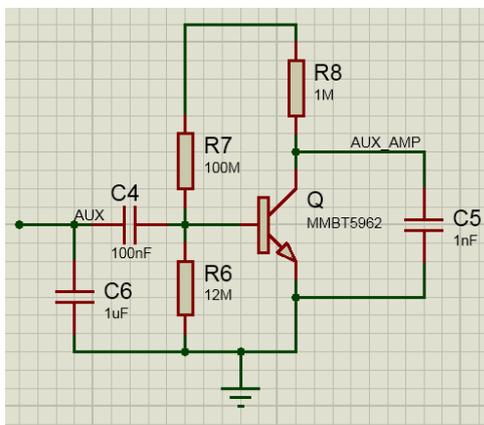
5.3.1. A flag Aux do RFID para o Microcontrolador

Nos protótipos desenvolvidos, o pino de Aux do EM4325 era sempre conectado diretamente a um pino de entrada do μC . Nos primeiros protótipos e testes não foram encontrados problemas nessa conexão, pois tanto o μC quanto o RFID estavam sempre conectados à bateria.

Entretanto, com a construção da BAP Tipo 3, onde o μC age como *SPI Master* e o RFID como *SPI Slave*, notou-se que o RFID não tinha energia suficiente para que o pino de Aux acordasse o μC do seu modo de operação LPM4 no estado de “Idle”. Neste estado, o RFID está desconectado da bateria, funcionando de forma passiva. O nível de tensão do pino Aux ficava normalmente em torno de 200mV, sendo insuficiente para disparar a interrupção de GPIO do μC . Eventualmente, dependendo da potência do leitor, era possível obter um nível de tensão mais elevado que acabava acordando o μC .

Como solução para a próxima versão, bastaria adicionar um circuito simples de amplificação do sinal de saída do pino Aux para a entrada do μC utilizando, por exemplo, utilizando um amplificador operacional ou então uma associação componentes discretos (resistores e capacitores) em conjunto com transistor conforme a Figura 48.

Figura 48. Circuito de amplificação para o sinal Aux



Fonte: O Autor (2015).

5.3.2. Desenvolvimento da BAP Tipo 4

O desenvolvimento da BAP Tipo 4 está previsto para continuidade deste trabalho. Por adequação ao cronograma de desenvolvimento da dissertação, não foi viável construir e validar a arquitetura da BAP Tipo 4, que utilizará o EM4325 no modo de *energy harvesting* para alimentar o microcontrolador durante a armazenagem *in-shelf*. De acordo com os modelos de consumo, esta arquitetura deverá ser a que possuirá a melhor economia de energia da bateria *in-shelf*, porém o seu consumo de energia durante o monitoramento deverá ser semelhante ao consumo da BAP tipo 3.

5.3.3. Problema do ano 2038

A utilização do UTC de 32 bits nos computadores e sistemas embarcados atuais possui uma falha conhecida como bug Y2K38, onde diversos programas poderão apresentar erros no ano de 2038. Isso se deve ao fato de a maioria dos sistemas existentes de 32 bits terem sido desenvolvidos na linguagem de programação C, utilizando a referência de tempo UTC como um inteiro com sinal de 32 bits, limitando a representação de datas até 01/01/2038, às 03:14:07 horas. Após esta data, o valor de UTC sofrerá um *overflow*, resultando em uma data em torno de 1970 ou 1901, dependendo da implementação.

Até lá se espera que os componentes eletrônicos que utilizam este tipo de notação sejam gradativamente substituídos por outros de maior precisão.

5.4. *Data logger* Desenvolvido vs Data Loggers existentes

O Quadro 12 compara diferentes *smart tags* encontradas em publicações qualificadas da área com a BAP Tipo 3 desenvolvida neste trabalho. Como pode ser visto, a BAP desenvolvida apresenta o menor consumo de energia durante o monitoramento de temperatura com um intervalo de amostragem de 1 segundo, o que reflete diretamente no aumento de vida útil da bateria. Para uma comparação justa de consumo de energia entre os trabalhos foi necessário recalcular os valores baseados nas informações fornecidas pelos outros autores.

O estudo realizado por (YU, FENG e WU, 2015) apenas informa os valores medidos de temperatura através do código EPC da *tag*, não registrando localmente os dados. O estudo realizado por (DONNO, CATARINUCCI e TARRICONE, 2014a) embora possua outros sensores, consegue armazenar apenas 30 amostras de temperatura na memória do RFID Monza X 2k da Impinj. Outro desenvolvimento (DONNO, CATARINUCCI e TARRICONE, 2014b), realizado pelos mesmos autores, armazena e transmite apenas uma informação de temperatura através da manipulação do código EPC para uma leitora que realiza um monitoramento contínuo da *tag*.

Diferentemente dos outros trabalhos, o uso inteligente de memória através de diversas formas de gravação da *tag* desenvolvida proposto neste trabalho permite a gravação de até 32,7k amostras. Neste ponto ela também pode ser comparada com outras soluções de *dataloggers* comerciais como as apresentadas no Quadro 12, conseguindo armazenar até quatro vezes mais medidas do que a Track-It e com a vantagem de poder ser lida a longas distâncias.

A BAP desenvolvida possuiu um intervalo de temperatura menor em comparação com os outros trabalhos, apresentando -40°C até 60°C contra os -50°C até 150°C das outras *tags*. Entretanto, altas temperaturas não são aplicáveis nos produtos da cadeia fria e, portanto, não teriam grande importância. É importante salientar que outros sensores podem ser aplicados na BAP no barramento I²C disponível no μ C como, por exemplo, sensores de luz e umidade, aumentando sua capacidade de sensoriamento.

Embora a vida útil da bateria dos *data loggers* comerciais seja apresentada, é difícil compará-las com a deste protótipo, pois as outras soluções não informam o intervalo de amostragem no qual o *data logger* foi submetido, dado crucial para este tipo de análise, conforme demonstrou a Figura 28.

Quadro 12. Comparação de outras Smart Tags com este trabalho

Estudos	(DONNO, CATARINUC CI e TARRICONE, 2014a)	(DONNO, CATARINUC CI e TARRICONE, 2014b)	(YU, FENG e WU, 2015)	Este trabalho
Tipo <i>Tag</i>	Semi	Passiva e Semi	Passiva e Semi	Semi
Sensitividade	-24 dBm	-17 a -24 dBm	On-Chip: -15/-11 Off-chip: -4.2dBm	-27.5 dBm
Distância de Leitura	22 m	22 m	On-Chip: 9,5 / 6 m Off-Chip: 2,7 m	~40m
Tamanho <i>Tag</i>	8 x 6 cm ²	8 x 8 cm ²	8 x 5 cm ²	8 x 5 cm ²
Intervalo Sensores de Temperatura	-50 a 150 °C	-50 a 150 °C	On-chip: -20 a50°C Off-chip: -40/125°C	-40 a 60 °C
Precisão Sensores de Temperatura	±2,7°C	±2,7°C	On-chip: -1/0,8°C Off-chip: ±1,6°C	±1,0°C
Interface Comunicação	I ² C	I ² C	I ² C	SPI
Consumo médio para 1 seg. (µA@V)	68µA@3V	230@1,8V	20,5µA@1,8V	7,8µA@3V
<i>Clock</i> (MHz)	1	1	2	1
Amostras Temperatura	30	1	--	32.7k
Tipo de Memória	16kb MTP	2k EEPROM	192bit MTP	128kbits

Fonte: Adaptado de (YU, FENG e WU, 2015).

5.5. Sistema Desenvolvido VS Sistemas existentes

Um trabalho extenso identificou e comparou as diferentes formas de monitoramento da temperatura na cadeia fria de carnes (RAAB, PETERSEN e KREYENSCHMIDT, 2011), demonstrando que ainda são utilizadas soluções antigas, como o controle por uso de termômetros e planilhas, conforme relatado por (ALVES, MORIM, *et al.*, 2014).

Amaral (2013) realizou uma vasta avaliação da literatura e da legislação que trata da cadeia de frio farmacêutica. O estudo descreve um sistema da empresa MedLog com a utilização de RFID *logger* comercial na etapa de transporte, porém sem entrar em detalhes da implementação e sem considerar os problemas de falsificação e gestão do estoque.

O estudo de Zhang (2010), fez uma breve avaliação dos sistemas de monitoramento que são utilizados pelas empresas de transporte na China, porém sem especificar diretamente a área farmacêutica. Ele apenas indica que há divergências entre as soluções utilizadas e demonstra as vantagens de utilização de um sistema de rastreabilidade inteligente integrado baseado em RFID.

O trabalho de (YAN e LEE, 2009) explica o desenvolvimento de um sistema semelhante ao deste estudo com a utilização de RFID no controle de temperaturas da cadeia fria, separando-o em diversas etapas e associando o uso do RFID com outras tecnologias como o WSN e GPS, porém de uma forma mais genérica, sem entrar nos problemas específicos encontrados na cadeia farmacêutica como, por exemplo, a falsificação de medicamentos.

Nenhum dos trabalhos encontrados na literatura apresenta um sistema inteligente voltado a resolver os problemas de gestão de estoque, rastreabilidade, falsificação e monitoramento das condições ambientes dos medicamentos ao mesmo tempo, conforme apresentado nesta dissertação. Entretanto, vários estudos comprovam que a utilização do RFID é uma tendência mundial, oferece diversas vantagens, mas também apontam que muitos problemas relacionados ao uso do RFID ainda estão por ser resolvidos.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um novo sistema de monitoramento de medicamentos da cadeia fria farmacêutica. O sistema propõe a utilização da tecnologia de RFID em toda a cadeia como solução para a gestão e controle inteligente e integrado do estoque de medicamentos. Juntamente com o uso de técnicas contra falsificações, como o *e-pedigree*, e associando a informação das condições do ambiente durante o armazenamento e transporte, de forma a garantir a qualidade dos medicamentos utilizados.

Em conjunto com o sistema produzido, foi apresentado um novo *datalogger* baseado em RFID de ultrabaixo consumo e com uma gestão de memória que permite a gravação de até 32,7 k amostras de temperatura, alta sensibilidade e uma autonomia de bateria maior que 7 anos para um intervalo de 5 segundos de monitoramento. Vale ressaltar que o teste de autonomia da bateria foi realizado em condições ideais em um equipamento de medição durante um curto intervalo de tempo e, portanto, deve ser reavaliado em testes de campo reais. Mesmo assim, os resultados alcançados se demonstram promissores.

As duas tags de RFID semi-passivas foram desenvolvidas de forma a apresentar um sistema esquemático adequado às necessidades propostas, layout, prototipação, testes e validação. O protótipo final alcançou sensibilidade de -27,5 dBm, permitindo leituras a uma distância de até 40 metros, viabilizando que múltiplos *dataloggers* estejam distantes da leitora e possam ser lidos simultaneamente. Além dessa vantagem, a grande sensibilidade permite que o *datalogger* esteja dentro de uma caixa e, mesmo assim, consiga responder as requisições da leitora.

Foi possível registrar uma grande quantidade de amostras de temperatura na memória *flash*, realizar toda a máquina de estados planejada e funcionalidades esperadas. Estas formas de gravação permitem que o *datalogger* seja utilizado em transportes de medicamentos de longa duração, registrando até 113 dias com um intervalo de amostragem de 5 minutos. No entanto, devido à adequação do cronograma da dissertação, nem todas as formas de gravação de dados propostas foram desenvolvidas e testadas no microcontrolador.

Através de modelos matemáticos, testes em simulador, verificação em amperímetros e um circuito dedicado com resistor *shunt*, foi possível avaliar o consumo de energia da BAP *tag* desenvolvida, melhorando a expectativa de vida da bateria tanto

durante o monitoramento quanto *in-shelf*. A grande autonomia de bateria é de extrema importância para que o *datalogger* seja capaz de registrar a temperatura durante todo o transporte e armazenagem, evitando uma substituição no meio do processo e possível perda de dados.

Por fim, foram desenvolvidos dois *softwares* em duas plataformas diferentes, *WindowsForm* e *Android*, para testar e validar as *BAP tags* construídas, viabilizando o sistema proposto. Com estes *softwares* foi possível verificar as distâncias de leitura das *tags* assim como visualizar os valores de temperatura salvos. O desenvolvimento em cima das leitoras permitiu a validação do conceito do sistema, configurar as *BAP tags*, verificar as medidas realizadas e enviá-las a um servidor remoto.

Embora ainda existam problemas a serem resolvidos, o presente trabalho apresentou um sistema de monitoramento que permite solucionar, ao mesmo tempo, diversos problemas comuns à cadeia fria de distribuição farmacêutica, de forma a atender às necessidades do mercado farmacêutico, mas nada impede que uma estrutura semelhante seja utilizada para outros insumos da saúde da cadeia fria como, por exemplo, órgãos, hemoderivados e materiais biológicos.

6.1. Trabalhos Futuros

O sistema desenvolvido, objeto desta dissertação de mestrado deverá ser validado em campo, com testes de robustez e de desempenho. Conforme encontrado na literatura, os dados gerados por sistemas com *RFID* devem ser tratados com cuidado, pois podem crescer exponencialmente criando problemas de acesso e lentidão ao banco de dados.

Uma perspectiva interessante para o presente trabalho seria a integração do sistema desenvolvido ao sistema nacional de controle de medicamentos criado pelo governo brasileiro, aumentando a confiabilidade e a qualidade daquele sistema.

Deverá ser desenvolvido um invólucro para a *BAP tag*, visando proteger os circuitos integrados da unidade direta, provavelmente utilizando uma resina como cobertura com um nível de proteção *IP67*. Após esta cobertura, a antena provavelmente precisará ser reajustada para garantir o funcionamento em longas distâncias.

Novos sensores poderão ser acoplados à *tag* desenvolvida como, por exemplo, sensores de umidade e vibração, oferecendo novos dados sobre o monitoramento do ambiente aos quais os medicamentos estão submetidos.

As implementações dos modos de gravação circular e do modo relativo estão em desenvolvimento com previsão de término até Agosto de 2015.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. T. A. et al. Estudo de Caso: Sistema para Monitoramento de Temperatura e Umidade em Farmácias e Almojarifados. **Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica**, p. 1208-1211, 2014. Disponível em: <http://www.canal6.com.br/cbeb/2014/artigos/cbeb2014_submission_359.pdf>. Acesso em: 29 Março 2015.

AMARAL, C. G. F. **Cadeia de Frio na Distribuição Farmacêutica**. Universidade Fernando Pessoa. Porto. 2013.

AMES, H. Authentication From a Cold Chain Perspective. **Pharmaceutical Commerce**, p. 4, Julho 2006.

BARRETT, S. F.; PACK, D. J. **Microcontrollers Fundamentals for Engineers and Scientists**. [S.l.]: Morgan & Claypool, 2006.

CONGRESSO NACIONAL BRASILEIRO. Sistema Nacional de Controle de Medicamentos. **SNCM**, 2002. Disponível em: <<http://www.sncm.com.br>>. Acesso em: 1 Janeiro 2015.

DIÁRIO DO NORDESTE. Pirataria de Remédios. **Diário do Nordeste**, 2015. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/opiniaopirataria-de-remedios-1.1204639>>. Acesso em: 15 Março 2015.

DONNO, D. D.; CATARINUCCI, L.; TARRICONE, L. A battery-assisted sensor-enhanced RFID tag enabling heterogeneous wireless sensor networks. **IEEE Sensors Journal**, Abril 2014a. 1048-1055.

DONNO, D. D.; CATARINUCCI, L.; TARRICONE, L. RAMSES: RFID augmented module for smart environmental sensing. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, Julho 2014b. 1701-1708.

EEMBC. ULPBench Scores. **Industry-Standard Benchmarks for Embedded Systems**, 2015. Disponível em: <<http://www.eembc.org/ulpbench>>. Acesso em: 01 Março 2015.

EM MICROELECTRONIC. EM4325. **EPC and UHF ICs**, 2015. Disponível em: <<http://www.emmicroelectronic.com/products/rf-identification-security/epc-and-uhf-ics/em4325>>. Acesso em: 1 Dezembro 2014.

FAUDZI, N. M. et al. UHF-RFID Tag Antenna with Miniaturization Techniques. **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology**, p. 1-5, Maio 2013. ISSN 978-1-4799-0546-1.

FINKENZELLER, K. **RFID Handbook**. 3^a. ed. Munich: Wiley, 2010.

FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. **Prescription Drug Marketing Act (PDMA) Requirements**. FDA. EUA, p. 18. 2006.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONIZATION. **Stability testing of new drug substances and products - Q1A (R2)**. ICH. [S.l.]. 1994.

LAW, M. K.; BERMAK, A.; LUONG, H. C. A sub- μ W embedded CMOS temperature sensor for RFID food monitoring application. **IEEE J. Solid-State Circuits**, Junho 2010. 1246-1255.

LIRA, A. B. Gestão de estoque: proposta para uma farmácia diferenciada. **O Mundo da Saúde**, 14 Fevereiro 2013. Disponível em: <http://www.saocamilo-sp.br/pdf/mundo_saude/101/10.pdf>. Acesso em: 05 Março 2015.

LUH, Y.-P.; LIU, Y.-C. Measurement of Effective Reading Distance of UHF RFID Passive Tags. **Modern Mechanical Engineering**, Taipei, 28 Junho 2013. 115-120.

MADGETECH. Cold Chain Data Loggers. **MadgeTech**, 05 Março 2015. Disponível em: <<http://www.madgetech.com/data-loggers/applications/cold-chain-data-loggers.html>>. Acesso em: 05 Março 2015.

MOTOROLA SOLUTIONS. MC9190-Z RFID Reader. **Motorola RFID Readers**, 2012. Disponível em: <<http://www.motorolasolutions.com/US-EN/Business+Product+and+Services/Mobile+Computers/Handheld+Computers/MC9190-Z+RFID>>. Acesso em: 1 Novembro 2014.

OLHARJURÍDICO. TCU manda ministério da saúde apurar perdas de medicamentos e responsabilidades. **Olhardireto.com, Revista Digital**, 4 Novembro 2013. Disponível em: <http://www.olhardireto.com.br/juridico/noticias/exibir.asp?noticia=TCU_manda_Ministerio_da_Saude_apurar_perdas_de_medicamentos_e_responsabilidades&id=14269>. Acesso em: 01 Fevereiro 2015.

PHARMACEUTICAL COMMERCE. Biopharma Cold Chain Sourcebook 2014. **Pharmaceutical Commerce**, 2014. Disponível em: <http://pharmaceuticalcommerce.com/sourcebook_intro>. Acesso em: 05 Janeiro 2015.

PHYCHIPS. AretePop. **Site da Phychips**, 2015. Disponível em: <<http://www.arete-mobile.com/>>. Acesso em: 1 Janeiro 2015.

QIAN, J. **A passive UHF tag for RFID-based train axle temperature measurement system**. Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1-4.

RAAB, V.; PETERSEN, B.; KREYENSCHMIDT, J. Temperature monitoring in meat supply chains. **British Food Journal**, v. 113, p. 1267-1289, 2011. ISSN 0007-070X.

RABELO, E. M.; FERREIRA, L. L. S. Perdas e desvios de medicamentos: impacto financeiro econômico em um hospital público. **EFDeportes**, Dezembro 2013. Disponível em: <<http://www.efdeportes.com/efd187/perdas-e-desvios-de-medicamentos.htm>>. Acesso em: 01 Janeiro 2015.

RAPKIEWICZ, J. C.; GROBE, R. **Cuidados no Armazenamento de Medicamentos Sob Refrigeração**. 2. ed. Curitiba: Centro de Informação sobre Medicamentos, 2014.

SAMPLE, A. P. et al. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform. **Instrumentation and Measurement - IEEE Transactions**, p. 2608-2615, 2008.

SILVA, K. V. S. D. **A Ameaça dos Medicamentos Falsificados**. Centro Universitario Estadual da Zona Oeste. Rio de Janeiro, p. 46. 2012.

SILVERMAN, K. **Temperature Mapping Study of United States Distribution Systems**. Rochester Institute of Technology. Rochester, p. 70. 2012.

SINCLAIR, I. **Sensors and Transducers**. 3ª. ed. Oxford: Newnes, 2001.

SMITH, J. R. et al. ID Modulation: Embedding Sensor Data in an RFID Timeseries. **Proceedings of Information Hiding, LNCS 3727**, 2005. 234-246.

TEIXEIRA, P. B. **Diagnóstico das Condições de Armazenamento de Medicamentos em um Almoarifado Municipal**. UNESC. Florianópolis. 2010.

TEXAS INSTRUMENTS. MSP430 Family User Guide. **Texas Instruments**, 2015a. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau144j/slau144j.pdf>>. Acesso em: 21 Abril 2015.

TEXAS INSTRUMENTS. MSP430G2553. **Texas Instruments**, 2015b. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/msp430g2553>>. Acesso em: 01 Janeiro 2015.

WEAKLEY, C. **EM4325 Reference Tag Design Documentation**. RF Design Studios LLC. Simpsonville, SC, EUA, p. 10. 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The Blood Cold Chain: guide to the selection and procurement of equipment and accessories**. Geneva: WHO, 2002.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Stability testing of active pharmaceutical ingredients and finished pharmaceutical products**. WHO. [S.l.], p. 130. 2009. (Technical Report Series, No. 953).

YAN, B.; LEE, D. Application of RFID in Cold Chain Temperature Monitoring System. **ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control and Management**, Guangzhou, p. 258-261, 2009. ISSN 978-1-4244-4246-1/09.

YIN, J. A system-on-chip EPC Gen-2 passive UHF RFID tag with embedded temperature sensor. **IEEE J. Solid-State Circuits**, Novembro 2010. 2404-2420.

YU, S.-M.; FENG, P.; WU, N.-J. Passive and Semi-Passive Wireless Temperature and Humidity Sensors Based on EPC Generation-2 UHF Protocol. **IEEE SENSORS JOURNAL**, Abril 2015. 2403-2411.

ZAINO, J. RFID Takes a Back Seat When It Comes to Electronic Pedigrees. **RFID Journal**, 2014. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/purchase-access?type=Article&id=11332&r=%2Farticles%2Fview%3F11332>>. Acesso em: 30 Maio 2015.

ZHANG, W. **Market Research for RFID Real-time Cold-chain Monitoring System**. Royal Institute of Technology. Stockholm, p. 60. 2010.