



Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
<http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/>



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

SISTEMA DE TELEMETRIA POR RFID ATIVO

Rafael Bidese^{1*}, Romano Weirich², Samir Bonho¹

Resumo: Esse artigo aborda o desenvolvimento de um sistema de telemetria utilizando tecnologia de RFID ativo para transmissão de dados entre nós sensores e um agregador de dados utilizando como método de desenvolvimento as etapas do modelo PRODIP. Apresenta-se as características principais das aplicações de monitoramento que se deseja atender, identificando os requisitos funcionais e não funcionais do sistema. Uma breve revisão dos dispositivos comerciais na área de Florianópolis é feita, identificando que é possível inovar no mercado local trazendo uma inovação do mercado estrangeiro. A arquitetura a nível de sistema e subsistema do nó sensor e do agregador de dados são elaborados e justificados, bem como a posterior definição dos componentes que constituirão cada módulo. É feita uma estimativa de custos de cada parte do sistema e avalia-se um caso prático para implementação do sistema em uma drogaria. Finalmente, uma prova de conceito é elaborada e executada para avaliar a arquitetura proposta e detectar os principais pontos onde o sistema pode ser melhorado. Assim, demonstra-se que o sistema proposto é capaz de atender os requisitos do projeto e, ainda, define-se pontos onde o projeto pode ser melhorado.

Palavras-chave: Internet das coisas. Sistemas Embarcados. Telemetria. RFID Ativo.

Abstract: *This article addresses the development of a telemetry system that uses active RFID to transfer data from sensor nodes to data aggregators by using the development model based on the PRODIP model. The main characteristics of monitoring applications of interest are presented, both the functional and non-functional requisites of the system are identified. A brief review of commercially available devices in the Florianopolis area is realized, identifying that it is possible to bring innovation to the local market by bringing innovations from the foreign market. The system and subsystem level architectures for the sensor node and data aggregator are developed and justified, as well as the definition for each component in the modules are done later. The estimated cost is then calculated for the sensor node and gateway, and a practical case for a drugstore monitoring is evaluated. Finally, a proof of concept is developed and implemented to evaluate the proposed architecture and to detect the main points where the system can be improved. Thus, the article demonstrates that the proposed system is capable of meeting the project requisites and, also, defines where there is room for improvement within the project.*

Keywords: *Internet of Things. Embedded Systems. Telemetry. Active RFID.*

* Autor para contato <rafael.b01@ifsc.edu.br>

¹ Depto de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina

² Dynamox Soluções Criativas

1. Introdução

A revolução da indústria 4.0 por meio do processo de digitalização das operações industriais já é realidade fora do Brasil desde 2011. Ela teve

início na Alemanha e se expandiu rapidamente para o restante da Europa e para os Estados Unidos. Atualmente, no Brasil, poucas empresas conseguiram aderir aos processos de automatização

e manufatura digital mais avançados (EXAME, 2017). Um dos principais fatores para essa revolução estar atrasada no Brasil é identificada, principalmente, pela falta de informação das empresas. Dados da Confederação Nacional das Indústrias mostram que pelo menos 57% das pequenas e 32% das grandes empresas nem mesmo reconhecem quais tecnologias poderiam ser úteis para alavancar a competitividade do setor industrial (PEQUENAS EMPRESAS & GRANDES NEGÓCIOS, 2016).

A fim de contribuir com a melhora desse cenário, o governo brasileiro tem apoiado as iniciativas de desenvolvimento por meio de programas de incentivo como o Programa Indústria 4.0 e regulamentação de alguns setores (BRASIL, 2017). Para alguns estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, a regulamentação vigente exige que sejam monitorados parâmetros como temperatura e umidade do local/produtos ao longo do tempo para garantir a segurança do consumidor. Alguns exemplos são as farmácias de manipulação, de acordo com a RDC Nº 44 de 17 de agosto de 2009 da expedido pela ANVISA (BRASIL, 2009), centros de distribuição de drogas, conforme o Inciso X, alíneas a e b da RDC Nº 55 de 16 de dezembro de 2010 expedido pela ANVISA (BRASIL, 2010) e demais estabelecimentos da área da saúde. Nessas aplicações, é necessário manter um histórico de dados para comprovar que os limites exigidos não foram extrapolados.

Além disso, alguns serviços utilizam de telemetria em cadeia de produção e distribuição para agregar valor aos seus produtos, ainda que não exista regulamentação que exija este tipo de controle de histórico. Por exemplo, o monitoramento remoto de produtos durante o transporte. Nesse caso, além de fazer o monitoramento das faixas de interesse para as variáveis de controle, é possível avaliar o serviço das diversas empresas que manuseiam o produto desde a produção até a distribuição para os clientes finais como já abordado por diversos trabalhos (ABAD *et al*, 2009), (CARULLO *et al*, 2009), (LORITE *et al*, 2017) e (MERCIER *et al*, 2017).

Nos segmentos de monitoramento de ambientes e cargas, os principais componentes de um sistema de telemetria são os sensores e os dados propriamente ditos. Dependendo da aplicação, diversos arranjos podem ser utilizados - desde o armazenamento dos dados no próprio sensor até a transmissão instantânea de dados para um servidor remoto. Essas diferentes arquiteturas trazem

consigo prós e contras que devem ser avaliados através dos requisitos da aplicação específica para que a opção mais adequada seja escolhida.

Os sistemas disponíveis comercialmente apresentam-se principalmente em duas categorias: sistemas de *datalogging* e nós sensores com agregadores de dados. Sistemas de *datalogging* precisam armazenar em cada um dos sensores os dados coletados, o que geralmente faz com que o custo unitário seja elevado e uma interface para posterior transferência dos dados seja necessariamente disponibilizada. No outro caso, os nós sensores adquirem os dados e transmitem diretamente para o agregador. Ele é quem lida com um volume maior de dados. Em sistemas deste tipo, o agregador tem um custo elevado, entretanto, o custo unitário dos sensores é muito mais baixo.

Dados deste setor no mercado nacional são difíceis de serem avaliados, porém com o acesso e divulgação internacional dos produtos desenvolvidos no Brasil, o mercado global torna-se acessível e atraente. O mercado global para sistemas rastreamento e monitoramento para transporte e armazenamento de itens da cadeia fria (alimentação e medicamentos) é esperado alcançar o valor de 426 bilhões de dólares em 2022, a partir de um valor de 148 bilhões em 2015. Ou seja, imprimindo uma taxa de crescimento anual composto (CAGR) de cerca de 16% entre 2016 e 2022 (BAJPAI;SHARMA, 2014). Além disso, visando o mercado específico de *hardware*, espera-se um mercado global avaliado em 6 bilhões de dólares até 2022, partindo de um mercado de 3 bilhões em 2016. Ou seja, um CAGR de 10%, sendo esse crescimento favorecido pelo ambiente estritamente regulado na indústria farmacêutica (MARKETSANDMARKETS, 2016).

As demais seções deste trabalho estão divididas seguindo o modelo PRODIP das etapas de projeção do produto (BACK *et al*, 2008). Iniciando pelo Projeto Informacional, a contextualização do projeto, seus requisitos e especificações são apresentados. Posteriormente, no Projeto Conceitual, avaliam-se as opções disponíveis no mercado e propõe-se uma arquitetura para o sistema. Em seguida, no Projeto Preliminar, são determinados os componentes específicos do produto. Na Seção 5, foge-se marginalmente do modelo PRODIP para apresentar a prova de conceito realizada. Finalmente, apresenta-se as conclusões do trabalho e os devidos agradecimentos são feitos.

2. Projeto Informacional

Essa seção apresenta uma introdução ao projeto, definindo o problema por meio do levantamento de informações a respeito de sistemas típicos de telemetria e características típicas dos ambientes onde esses sistemas são necessários. Com isso, viabiliza-se a definição dos requisitos e, posteriormente, a realização da especificação técnica do produto.

2.1. Cenários de aplicação do produto

Em todas situações abordadas, é importante que o sistema de sensoriamento não utilize conexões cabeadas, principalmente nos casos em que é feito o monitoramento de objetos móveis. A necessidade dos sensores se moverem já seria motivo suficiente para sugerir a utilização de uma tecnologia sem fio para transmissão de dados, e esse torna-se um argumento ainda mais forte quando se leva em conta o alto custo associado à instalação de um sistema cabeado (material, tempo e mão-de-obra).

Os ambientes que devem ser monitorados por lei são tipicamente farmácias de manipulação e centros de distribuição de remédios. Isso faz com que os ambientes da aplicação sejam locais fechados com um tamanho médio entre 50 e 120 m² PEQUENAS EMPRESAS & GRANDES NEGÓCIOS, 2002). Supondo uma frente de loja padrão de 10 metros de fachada, é necessário um enlace de comunicação que suporte transmissão em até 13 metros em um ambiente fechado.

Nos casos de centros de distribuição é necessária a capacidade de transmitir distâncias mais longas, porém, nesses casos, os ambientes podem ser considerados como abertos e, muitas vezes, a transmissão é feita em linha de visada. Estima-se, que um alcance de 50 metros seja capaz de suprir as aplicações com esse cenário, ainda que seja necessário instalar mais de um ponto de comunicação.

Com relação à mobilidade do sistema, é necessário que os sensores sejam completamente autônomos, para isso, eles devem ser alimentados por uma bateria primária. Nesse contexto, tem-se explicitamente um compromisso que envolve a autonomia do sistema, o volume de dados transmitidos e o período de espera entre uma medição e a outra.

Identificou-se, portanto, que uma composição de módulos, como os descritos na Figura 1, seria capaz de atender as necessidades de ambas situações. O **Nó Sensor** contém os sensores necessários e um

módulo de transmissão de dados; e o **Agregador de dados**, realiza comunicação com os sensores e com o **AP**, que dá acesso a internet. Também é representado na Figura 1 a existência de um cliente para acesso aos dados.



Figura 1 – Ilustração esquemática de um dos cenários de aplicação do sistema: monitoramento de uma drogaria. Imagem do autor.

2.2. Identificação e Análise de Requisitos

Com base na proposta de sistema mencionada anteriormente, e nos cenários de aplicação do produto, os requisitos funcionais e não-funcionais do sistema foram identificados. Os requisitos funcionais (RF) são apresentados a seguir juntamente com seus respectivos requisitos não-funcionais.

Em relação ao nó sensor, os requisitos são:

- **RF1:** Realizar transmissões apenas para agregadores deste mesmo sistema
 - O sistema deve utilizar uma codificação adequada na comunicação sem fio
- **RF2:** Ser capaz de capturar dados de temperatura e umidade de ambientes farmacêuticos e de armazéns
 - O sensor de temperatura deve medir de -30 a 100 °C com resolução de 0,1 °C
 - A medição de umidade deve ser relativa e com resolução de 1%
- **RF3:** Ser capaz de funcionar remotamente por longos períodos
 - A autonomia de cada nó sensor deve ser de pelo menos 2 anos
 - Deve ser utilizada uma bateria com perfil baixo que seja compatível com os limites de funcionamento do sensor
- **RF4:** Permitir ao usuário alterar o ID dos nós sensores
 - A configuração não pode acontecer utilizando o sistema de RFID ativo

- O ID dos nós sensores não pode ser maior que 32 bits
- **RF5:** Informar quando um nó sensor estiver com bateria fraca
 - O nó sensor deve ser capaz de ler a tensão da bateria
- **RF6:** Operar com protocolo de comunicação sem fio compatível com o agregador
 - O alcance mínimo em linha de visada deve ser 50 metros
 - O alcance mínimo em ambientes confinados deve ser 13 metros
- **RF7:** Ser resistente a ambientes hostis
 - O nó deve atender a norma IP68

E os requisitos referentes ao agregador de dados são:

- **RF1:** Ser capaz de enviar os dados recebidos dos sensores para um servidor na internet
 - O agregador deve se conectar a um ponto de acesso disponibilizado pela infraestrutura do local via WiFi
- **RF2:** Ser capaz de armazenar os dados quando não houver conexão com a internet
 - O agregador deve armazenar 2MB de dados por pelo menos 24h
 - O agregador deve implementar um *buffer* circular para manter as amostras mais recentes
 - O sistema deve enviar as mensagens armazenadas quando recuperar a conexão com a internet
- **RF3:** Ser resistente a ambientes hostis
 - O agregador deve atender a norma para IP65

Finalmente, apresenta-se os requisitos referentes ao sistema:

- **RF1:** Ser capaz de receber e persistir os dados em um banco
- **RF2:** Ser capaz de receber dados de diversas estações de monitoramento simultaneamente
- **RF3:** Ser capaz de monitorar o banco de dados para gerar alarmes via e-mail, SMS, WhatsApp
- **RF4:** Ser capaz de exibir o histórico e alarmes na interface com usuário
- **RF5:** A interface de cliente deve ser acessível por meio de diversas plataformas (Android, iOS e Web)

- **RF6:** A interface deve utilizar as convenções e normas de usabilidade de software
- **RF7:** A interface deve utilizar a terminologia voltada para gestores

3. Projeto Conceitual

Essa seção apresenta uma revisão de produtos disponíveis no mercado nacional e internacional, bem como patentes relacionadas a estes sistemas. A partir dessa revisão, juntamente com a revisão da literatura específica, propõe-se uma arquitetura de desenvolvimento para o sistema, onde cada subsistema é especificado. Finalmente, uma avaliação da arquitetura é proposta, por meio de uma prova de conceito (solução técnica).

3.1. Benchmarking

Comercialmente estão disponíveis inúmeras soluções completas para telemetria de dados de diversas naturezas. Focando na competição do mercado local, visando o estado de Santa Catarina e, principalmente, a cidade de Florianópolis especificamente já é possível encontrar empresas que oferecem soluções desse tipo.



Figura 2 –Sistema de telemetria da empresa Sensorweb. Adaptado de sensorweb.com.br.

A Sensorweb, oferece um sistema de telemetria com *hardware* e *software* proprietário como pode ser visto na Figura 2. Esse sistema utiliza nós sensores com um agregador para fazer a conectividade com a plataforma de *software* para visualização dos dados. A documentação da empresa não apresenta maiores detalhes sobre as tecnologias específicas utilizadas em cada um dos módulos.

A Dynamox, oferece um sistema diferente, baseado na arquitetura de *dataloggers* que pode ser visto na Figura 3. O DYNALOGISTICS pode armazenar até 20 mil leituras de temperatura, também existe uma versão com sensor de umidade relativa. Para acessar esses dados utiliza-se um aplicativo de celular que se comunica por meio de uma interface *Bluetooth* e depois sincroniza os

dados com a plataforma de telemetria de cada cliente.

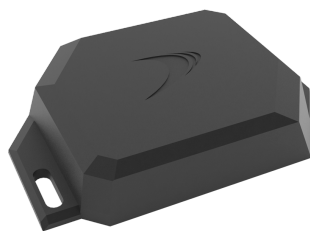


Figura 3 – DYNALOGISTICS, o datalogger para telemetria da Dynamox.. Adaptado de dynamox.net.

Buscando trazer inovação busca-se trazer ideias do mercado internacional para implementar localmente. Assim, foi encontrado na empresa Ela Innovation, baseada em Montpellier na França o sistema de telemetria apresentado na Figura 4. Esse sistema utiliza nós sensores com conectividade sem fio e que por meio de um agregador de dados também transfere os dados para a plataforma de *software* para gestão.



Figura 4 – Sistema de telemetria baseado em RFID ativo da ELA Innovation, nós sensores à cima e agregador abaixo. Adaptado de elainnovation.com.

As características mais relevantes o sistema da Ela Innovation é o alcance de até 80 metros em linha de visada, autonomia de até 10 anos dependendo das configurações, IP68 e dimensões extremamente compactas (diâmetro de 36 mm, altura de 10 mm e peso aproximado de 11 g). Isso faz com que o custo por unidade do sensor seja drasticamente reduzido, permitindo que sistemas com muito baixo custo sejam instalados. Assim, mercados que antes viam esse tipo de instalação como desejável, porém de alto custo, possam ver nessa plataforma uma possibilidade de agregar valor aos seus produtos.

Uma busca por patentes conflitantes com o projeto foi realizada em diversas fontes nacionais e internacionais e nenhum impedimento para o desenvolvimento e comercialização desse produto foi encontrado.

3.2. Arquitetura do Sistema

O sistema completo de telemetria proposto, visando atender aos requisitos anteriormente previstos, pode ser dividido em quatro subsistemas principais, conforme indicado na Figura 5. Eles são o nó sensor, o *gateway*, os serviços e o cliente.

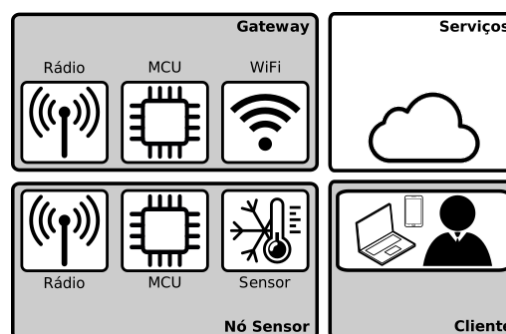


Figura 5 – Descrição em alto nível do sistema. Imagem do autor.

O nó sensor faz as medições periódicas e envia dados para o acumulador de dados por meio de comunicação sem fio. O acumulador está conectado a um ponto de acesso local, e ao receber a informação do nó sensor e envia para o subsistema de serviços. Ou seja, nesse arranjo o acumulador tem a função de um *gateway*. O subsistema de serviços recebe informação do *gateway*, os armazena e os disponibiliza para o cliente. O cliente, por sua vez, possibilita a realização de consultas, a avaliação o histórico dos dados, e a geração e monitoramento dos alarmes ativos

3.2.1. Casos de uso do sistema

A Figura 6 apresenta as maneiras como o usuário pode interagir diretamente com o sistema.

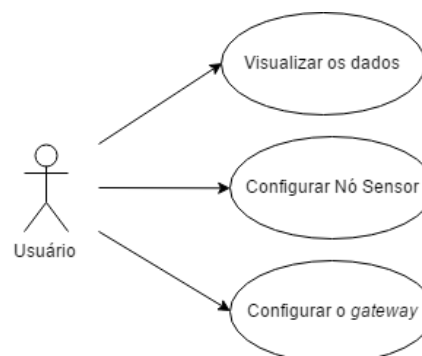


Figura 6 – Diagrama de caso de uso do sistema proposto. Imagem do autor.

- O usuário **configura o nó sensor**, por meio de uma interface apropriada

- O usuário **configura o gateway** por meio de uma interface web
- O usuário **visualiza os dados** coletados pelos sensores

3.3. Decomposição em módulos

Os subsistemas apresentados anteriormente foram divididos em módulos funcionais conforme apresentado de forma simplificada na Figura 5. Essa subseção, descreve o funcionamento detalhado e os módulos de cada subsistema.

3.3.1. Nó Sensor

De maneira geral, o microcontrolador do nó sensor deve permanecer em um estado de hibernação e acordar a cada período pré selecionado. Ao acordar, ele deve realizar a leitura do sensor e enviar o dado coletado juntamente com seu número de identificação por meio da interface de comunicação sem-fio (rádio). Essa interface envia os dados utilizando um protocolo proprietário pré-definido. Ao fim dessa operação, o microcontrolador volta a hibernar. Ainda que não explicitado na Figura 5, nó deve ser alimentado por uma bateria primária.

O comportamento do *firmware* do nó sensor foi modelado pela máquina de estados apresentada na Figura 7 e complementado pela lista de eventos descritos na Tabela 1.

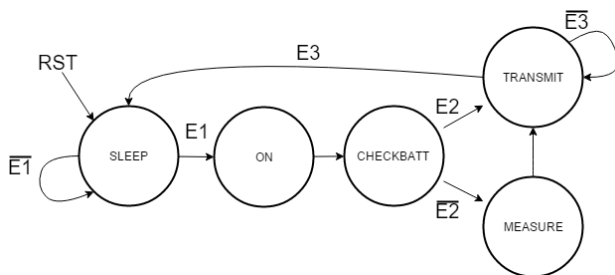


Figura 7 – Máquina de estados do nó. Imagem do autor.

Tabela 1 – Eventos do MCU do Nó sensor

Evento	Descrição
E1	Sinaliza o estouro da contagem do período de leitura do nó
E2	Sinaliza que o sistema detectou que o nível da bateria está baixo
E3	Sinaliza que a transmissão de dados foi finalizada

Assim sendo, o microcontrolador permanecerá a maior parte do tempo em modo de hibernação no estado **SLEEP**. Ele acordará eventualmente por meio do evento **E1**, que transicionará o sistema

diretamente para estado **ON**. Nesse estado, o sistema é acionado, e posteriormente faz-se a checagem do nível da bateria no estado **CHECKBATT**. Neste momento, caso a bateria esteja com carga suficiente opera operação normal, o evento **E2** não ocorre e o sistema transiciona para o estado **MEASURE**. No estado **MEASURE**, a leitura do sensor é realizada, e o sistema entra automaticamente no estado **TRANSMIT**, que inicializa a transmissão de dados. O sistema permanece nesse estado enquanto o evento **E3** não ocorrer. Quando o evento ocorre, o sistema volta ao estado **SLEEP** e espera novamente pelo evento **E1**.

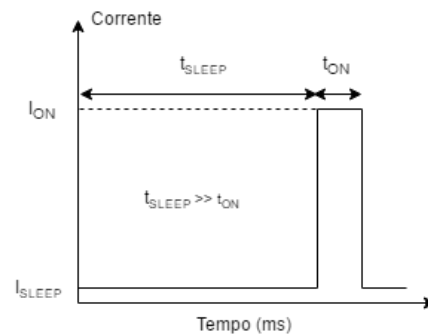


Figura 8 – Perfil de consumo de corrente no nó. Imagem do autor.

O perfil de consumo de corrente da bateria pode ser modelado em primeira ordem pelo gráfico apresentado na Figura 8. Nele, a corrente I_{SLEEP} representa o consumo em modo de hibernação do sistema completo, em que a maior parcela é atribuída ao microcontrolador. A corrente I_{ON} representa a consumida do sistema durante a realização de medida e transmissão de dados. As formas mais conveniente para se reduzir o consumo do sistema, seriam minimizar, principalmente, a corrente I_{SLEEP} e o tempo t_{ON} . A corrente I_{SLEEP} pode ser minimizada utilizando um microcontrolador de baixo consumo e fazendo uso extensivo dos modos de hibernação. O tempo t_{ON} é fortemente dependente do tempo necessário para transmitir a mensagem da leitura, visto que a velocidade de transmissão do RFID ativo não particularmente elevada. Portanto, é essencial manter a mensagem o mais curto o possível.

3.3.2. Gateway

O microcontrolador do *gateway* deve esperar pela chegada das mensagens de diferentes nós através do seu módulo rádio de comunicação, acumular as mensagens em memória local, criar um pacote compatível com o protocolo de comunicação servidor e enviá-lo por meio da conexão WiFi,

havendo disponibilidade de rede. Caso contrário, ele deve acumular os dados para que sejam transmitidos quando houver conexão. Esse módulo pode ser alimentado por uma fonte externa, já que ele não precisa ser móvel, como os nós sensores.

3.3.3. Serviços e Cliente

O subsistema de serviços deve esperar pela chegada de dados no servidor, ler as mensagens e armazená-las em um banco de dados. O sistema deve monitorar os dados de acordo com limites pré-estabelecidos e disparar alarmes para os responsáveis caso algum deles seja ultrapassado. Assim, os dados do sistema devem estar disponíveis para acesso através do subsistema de cliente por meio de uma página *web*, com interface amigável, intuitiva e customizável.

3.4. Delimitação do projeto

Como a proposta deste projeto como um todo é altamente multidisciplinar, não seria possível compreender uma análise de todo o projeto, inclusive pela falta de domínio técnico suficientemente em relação a todos os temas. Por isso, as seguintes seções dão maior ênfase nos subsistemas do projeto que mais têm relação com desenvolvimento de produtos eletrônicos, ou seja, os subsistemas do nó sensor e do *gateway*. Com atenção especial ao nó sensor, que é o subsistema mais crítico nesse projeto específico.

4. Projeto Preliminar

Essa seção apresenta o desenvolvimento da solução conceitual proposta anteriormente. A seguir, os materiais necessários são dimensionados, justificados e devidamente apresentados. Posteriormente, um estudo de caso de uma instalação típica é apresentada, a fim de avaliar a viabilidade e atratividade econômica do sistema. Finalmente, a proposta final de produto almejado é apresentado juntamente com algumas etapas necessárias para alcançar esse objetivo.

4.1. Nó Sensor

Um desenho preliminar do nó sensor idealizado pode ser visto na Figura 9. As dimensões máximas do projeto são 30 mm de diâmetro e 10 mm de espessura. Visando a praticidade de uso, optou-se por utilizar-se um perfil baixo. A fim de viabilizá-lo, é importante a utilização de baterias com perfil baixo. Além disso, componentes eletrônicos com empacotamentos que facilitem a miniaturização do projeto também são desejáveis.

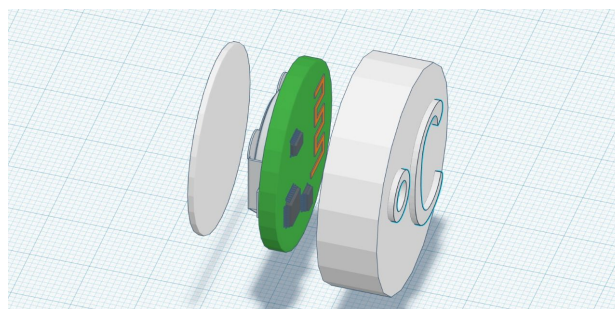


Figura 9 – Proposta de protótipo final do nó sensor. Imagem do autor.

4.1.1. Bateria

Para manter a diversidade de fornecedores de baterias, juntamente com um alta densidade de carga aliada ao fator de forma adequado para a aplicação, foi escolhido utilizar uma bateria de Lítio de 3 V e 215 mAh (CR2032). Caso a carga da bateria não seja suficiente para a autonomia do sistema, esse componente deve ser revisto. É importante manter perfil do produto baixo, portanto, outra bateria com forma de moeda seria o mais adequado.

4.1.2. Sensor

Como sensor de temperatura, optou-se pelo sensor Si7050 da Silicon Labs. Ele utiliza interface I2C, é de baixo consumo, não tem preço elevado e utiliza um encapsulamento de 3x3 mm. A existência de bibliotecas que suportam o interfaceamento com esse sensor fazem com que seja definido este sensor para a aplicação.

Algumas características relevantes deste sensor são os 14 bits de resolução, garantindo um erro na leitura de no máximo ± 1 grau. O sensor ainda pode operar de -40 a $+125$ graus celsius com alimentação de 1,9 a 3,6 V, oferecendo assim grande margem para a bateria.

4.1.3. Módulo de Comunicação Sem-Fio

A Tabela 2 apresenta uma revisão das tecnologias de transmissão sem fio presentes na literatura e disponíveis comercialmente. É importante notar que as tecnologias consagradas de WiFi, Bluetooth e ZigBee apresentam consumos de corrente incompatíveis com a autonomia desejada para pequenos volumes de bateria. Além disso, apresentam custo bastante elevado. Nesse ponto, a tecnologia de RFID ativo é superior, ao troco de uma taxa de transmissão mais baixa.

Tabela 2 – Comparação de Tecnologias Sem-Fio

	WiFi CC3000	BLE CC2540	RFID 433MHz
Taxa de Transmissão (kbps)	11000	723	9600
Distância Máxima (m)	300	100	100-150
Corrente RX (mA)	92	15,8	6
Corrente TX (mA)	190	18,6	9
Custo US\$	49,50	2,30	0,75 (RX e TX)
Área de PCI (mm ²)	640	400	400

A frequência de RFID ativo permite a implementação de antenas impressas na PCI, o que reduz bastante o custo. As antenas de 1/20 de comprimento de onda, também conhecidas como antenas de *loop* magnético pequeno e tem sido utilizadas em dispositivos móveis. É importante lembrar que essa topologia de antena não é direcional e não oferece alto ganho, portanto, o receptor deve ter sensibilidade suficiente para captar o sinal de forma correta.

4.1.4. Microcontrolador de Ultra-baixo Consumo

Para fazer o controle do nó é necessário um microcontrolador que opere em ultra-baixo consumo para garantir que o sistema atenda aos requisitos de autonomia. Além disso, para comandar todas as funções do nó sensor, o microcontrolador precisa oferecer os periféricos apresentados na Tabela 3. Propõe-se uma interface I2C para comandar o sensor de temperatura e uma UART para comandar o RFID ativo e a interface de configuração.

Tabela 3 – Periféricos necessários para o microcontrolador (Nó Sensor)

Periférico	Pino	Função
I2C	SDA	Sensor de Temperatura
	SCL	
UART	TX	RFID Ativo
	RX	Configuração

É importante ainda que o microcontrolador seja compatível com a tensão da bateria utilizada e que permaneça em funcionamento normal caso a tensão da bateria caia ao longo do tempo. Outra consideração relevante é o tamanho do

empacotamento a ser utilizado, para garantir a miniaturização do circuito como um todo.

Os microcontroladores da linha MSP430 da Texas Instruments (TI) são conhecidos pelas suas características de extremo baixo consumo de energia, mesmo quando comparadas com outras famílias de microprocessadores de ultra-baixo consumo. Apesar da discussão sobre qual seria o MCU com o menor consumo disponível no mercado ainda persistir, a família MSP430 tem se destacado frente os concorrentes, principalmente quando comparado aos microcontroladores da família PIC XLP da Microchip (ALBUS; VALENZUELA; BUCCIN, 2009), (TOLLEFSON, 2014). Além de figurar entre os líderes de baixo consumo em todos os estudos, a TI oferece vantagens importantes sobre outras companhias no contexto de redução do período de desenvolvimento. Por exemplo, um extenso catálogo de produtos abrangendo módulos de diversas funcionalidades compatíveis entre si, excelente documentação e existência de uma ampla comunidade ativa.

A Texas Instruments comercializa kits de desenvolvimento com microcontroladores de suas famílias mais importantes, o que acelera as etapas iniciais de desenvolvimento de hardware, firmware, e facilita os primeiros testes modulares. Adicionalmente, a TI disponibiliza uma ferramenta gráfica de geração automática de código (GRACE) para configuração dos periféricos de seus microcontroladores da família MSP430. Com ela, é possível acelerar ainda mais a construção das rotinas de controle.

A TI oferece diversos microcontroladores com diferentes preços e capacidades de processamento. A família MSP430G2 se destaca por ser a de mais baixo custo e de menor consumo. Ela é composta por microcontroladores sem aceleração em hardware para operações aritméticas, com poucos periféricos, e apenas algumas poucas portas de entrada e saída de propósito geral (GPIO). O microcontrolador de modelo MSP430G2553, membro da família MSP430G2, atende a todos os requisitos e oferece todas as facilidades citadas anteriormente.

4.2. Gateway

Um modelo para o *gateway* idealizado pode ser visto na Figura 10. As dimensões máximas desse projeto são 90 mm de lado e 30 mm de espessura, utilizando parafusos para fixação da tampa e também rasgos para fixar o equipamento na parede.

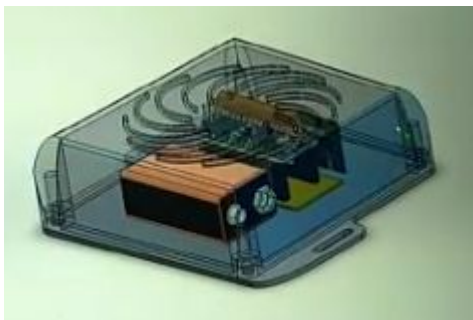


Figura 10 – Proposta de protótipo final do gateway. Imagem do autor.

4.2.1. Módulo de Comunicação sem-fio

O módulo de comunicação sem-fio foi definido de forma a manter compatibilidade com a transmissão feita pelo nó sensor. Utiliza-se então, um projeto discreto para receptores de rádio frequência em modulação ASK. Este circuito, utiliza componentes passivos, transistores de propósito geral e amplificadores operacionais (LM358 da TI). No módulo de recepção, uma antena externa omnidirecional foi utilizada para garantir a boa recepção de nós sensores espalhados no ambiente.

4.2.2. Módulo de Controle e WiFi

O módulo ESP32 da Espressif possui um microcontrolador capaz de realizar 600 DMIPS, disponibiliza 16MB de Flash e 520 KB de SRAM com um processador dual core de 240 MHz. Ponderações sobre o consumo são pouco relevantes já que o módulo é alimentado por um adaptador de parede, mas é importante notar que a corrente de pico para transmissão é na faixa de 90 mA e a fonte deve ser capaz de suprir essa corrente.

4.3. Estimativas de Custos

Os custos dos componentes foram cotados segundo o catálogo da DigiKey, com o valor referente a compra de 1000 unidades de cada um dos componentes. Além dos componentes citados na Tabela 4, são necessários componentes passivos como capacitores para filtro de linha e desacoplamento, porém seus valores não foram considerados aqui por não serem relevantes em relação ao custo total do projeto. Sendo assim, o valor total para um nó sensor com componentes importados diretamente da DigiKey custa R\$26,53.

A Tabela 5 apresenta a lista de componentes mais relevantes para a determinação do preço total de um gateway. O valor total para componentes importados diretamente da DigiKey é de R\$119,21.

Tabela 4 – Custo estimado de um Nó Sensor

Componente	Custo (US\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$+Taxas)
Bateria (CR2032)	0,49	0,68	0,98
Conector (CR2032)	0,38	1,21	2,42
Sensor de Temperatura (Si7050)	0,94	2,90	5,81
Transistor TX (2SC332)	0,50	1,55	3,09
Cristal TX (SAW 433MHZ)	0,61	1,88	3,77
MSP430G2553	1,07	3,31	6,61
PCI	0,30	0,93	1,85
Case	0,32	1	2
TOTAL	4,62	13,45	26,53

Tabela 5 – Custo estimado de um gateway

Componente	Custo (US\$)	Custo (R\$)	Custo (R\$+Taxas)
Adaptador AC	2,47	7,5	15
Conector USB	0,37	1,14	2,29
Ampops	0,08	0,25	0,49
Passivos	1,20	3,71	7,42
Antena	2,54	7,58	15,70
ESP32	8,95	27,66	55,31
PCI	1,29	4	8
Case	2,47	7,5	15
TOTAL	19,37	59,60	119,21

4.4. Estimativas de Autonomia

Diversas considerações no projeto foram feitas para garantir o menor consumo o possível. A Tabela 6 apresenta uma lista dos consumos de corrente pelos módulos do nó sensor, considerando os dois modos de operação do nó: quando ele está medindo e transmitindo e quando ele está hibernando.

Para a bateria considerada nesse projeto (215 mAh), a Tabela 7 apresenta estimativas de autonomia do sistema para diferentes intervalos de aquisição e transmissão de dados. Fica claro que, a partir de um minuto de intervalo, não existe ganho efetivo em autonomia. Isso se deve ao fato que a parcela dominante no consumo do módulo é dada pelo consumo em modo **SLEEP**. Sendo assim, medindo a cada um minuto a autonomia do sistema deve superar 3,5 anos.

Tabela 6 – Estimativa de consumo do nó sensor

Componente	I_{SLEEP} (uA)	I_{ON} (uA)
MSP430G2553	0,5	10
RFID Ativo	0,1	3000
Si7050	0,06	3,8
TOTAL	0,66	3013,8

Tabela 7 – Estimativa de autonomia para intervalos de amostragem

Intervalo de Amostragem (s)	Autonomia (dias)
1	308
60	1284
300	1342
3000	1355

4.5. Exemplo de estudo de caso: drogaria

Para uma implementação de um sistema que precise de pelo menos 5 nós sensores e um *gateway* o custo de componentes aproximado pode ser visto na Tabela 8. Lembrando que esse valor conta apenas com os componentes, sem considerar custos de produção, logística, abatimento de investimento, custos com manutenção e etc.

Tabela 8 – Custo estimado de um sistema de telemetria

Item	Unidades	Preço (R\$)
Nó Sensor	5	132,65
Gateway	1	119,21
TOTAL	6	251,86

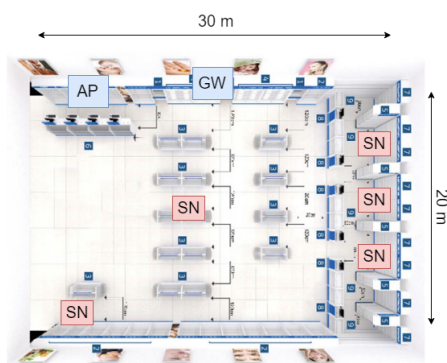


Figura 11 – Exemplo de uma possível aplicação de monitoramento de uma drogaria. Imagem do autor.

Para fazer a cobertura de uma drogaria com dimensões típicas, por exemplo, utilizando um sistema com os componentes definidos na Tabela 8 é possível realizar uma cobertura como a observada

na Figura 11. Nesse caso, uma drogaria de 600 m² pode ser monitorada com 5 pontos por R\$251,86; ou seja, um custo de R\$0,42/m².

5. Prova de Conceito

Com o intuito de avaliar a arquitetura proposta, utilizou-se módulos de desenvolvimento e técnicas de prototipagem rápida para criar protótipos dos subsistemas alvo desse trabalho: o nó sensor e o *gateway*. Quanto aos subsistemas de serviços e cliente, utilizou-se ferramentas bem conhecidas no mercado, e tecnologias já amplamente dominadas, e difundidas com amplo material de apoio desenvolvido pela comunidade.

5.1. Nó Sensor

Por simplicidade, no protótipo do nó sensor, utilizou-se apenas um sensor. Optou-se por utilizar o sensor de temperatura LM35C da National Semiconductors. Para comandar o nó, foi utilizado um Arduino Nano, que contém um ATmega328P da Atmel como microcontrolador. Ele pode ser programado facilmente utilizando as ferramentas da Atmel e do Arduino. Para comunicação sem fio, utilizou-se o FS1000A, um transmissor de rádio em 433 MHz com modulação ASK. Para alimentação do circuito, uma bateria de 9V foi utilizada. Ela está claramente superdimensionada, porém facilita testes de longa duração por possuir uma carga elevada. Para realizar as conexões entre os componentes, uma placa de circuito impresso foi projetada e fabricada. Os protótipos dos subsistemas são apresentados na Figura 12. Além disso, um invólucro foi projetado e fabricado utilizando impressão 3D para conter todos os módulos durante os testes.

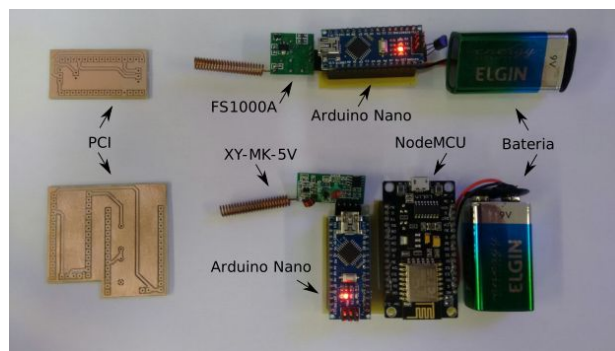


Figura 12 – Fotografia dos protótipos utilizados na prova de conceito. Imagem do autor.

O *firmware* do nó sensor segue uma rotina sub-ótima em que o nó dorme e acorda a cada tempo pré estabelecido para enviar uma mensagem.

A mensagem utilizada nos testes é composta por um caractere de cabeçalho, um byte de identificação do sensor, e o valor lido pelo conversor analógico digital. A fim de melhorar a leitura do LM35C, que é tipicamente 10,0 mV/°C, a tensão de referência do conversor analógico digital foi alterada para 1,1 V. O acionamento do FS1000A foi realizado com o auxílio da biblioteca RadioHead, que é uma biblioteca de código aberto utilizada em diversos rádios comercialmente disponíveis.

5.2. Gateway

Para comandar o protótipo do *gateway* era necessário utilizar um módulo que pudesse fazer todas as funções previstas e que também fosse facilmente programável. Nesse contexto, optou-se pelo NodeMCU para comandar o *gateway*. Ele utiliza o ESP8266 da Espressif Technologies como microcontrolador e, além de possuir o rádio para comunicação WiFi com o ponto de acesso, é compatível com a plataforma de desenvolvimento Arduino. O rádio utilizado para comunicação com os nós sensores foi definido pela compatibilidade com o módulo FS1000A. Desta forma, utilizou-se o XY-MK-5V. A alimentação do circuito foi prevista para ser realizada através de uma fonte externa, entretanto, uma bateria de 9V também foi utilizada, pelo mesmo motivo de facilitar os testes. A conexão entre os componentes foi realizada por uma placa de circuito impressa que foi projetada e desenvolvida durante o andamento deste trabalho. Além disso, por facilidade, o mesmo invólucro projetado e fabricado para o nó sensor foi utilizado para o *gateway*.

Pela compatibilidade com o nó sensor, que utiliza a biblioteca RadioHead para transmitir os dados, o *gateway* precisaria dessa mesma biblioteca para receber os dados. Contudo, não existe suporte dessa biblioteca para o microcontrolador presente na NodeMCU. Com isso, foi necessário utilizar um Arduino Nano para receber os dados do rádio e enviá-los diretamente para o NodeMCU, através de uma comunicação serial.

O NodeMCU deve se conectar a uma rede local utilizando a autenticação necessária para aquele ponto de acesso, e assim que está conectado, ele se conecta também ao servidor de mensagens MQTT utilizando a biblioteca ClientPubSub, utilizando a mesma autenticação configurada previamente. A partir desse momento, o sistema recebe e decodifica as mensagens, e o cliente MQTT publica os dados no tópico específico do próprio sensor e do cliente dono daquele sensor.

5.3. Serviços e Cliente

Para permitir a coleta remota dos dados produzidos pelo *hardware*, utilizou-se um eco-sistema comercial de serviços em nuvem chamado *Heroku*. Nele, um servidor MQTT que pode ser acessado de qualquer local, desde que o cliente esteja conectado à internet, foi configurado. Isso se demonstrou extremamente conveniente, pois quem envia mensagens para o servidor não precisa estar no mesmo local físico que quem deseja recebê-las.

Para receber os dados que são roteados pelo servidor MQTT, utilizou-se uma máquina física que se inscreve para receber os dados do servidor, os armazena e disponibiliza para visualização. A máquina física, executa um sistema operacional Ubuntu, e utiliza a ferramenta *Docker Compose* para instanciar múltiplos containers *Docker*. Os containers utilizados são do tipo *Telegraf*, que se conecta ao servidor MQTT como um cliente que se inscreve para receber as mensagens, as gerencia e envia para o próximo contêiner no *pipeline*, o *InfluxDB*. Ele é um banco de dados específico para armazenamento de séries temporais, e é ideal para aplicações de telemetria. Finalmente, um terceiro contêiner, *Grafana*, disponibiliza por meio de uma autenticação de usuário a configuração de acesso aos dados persistidos no *InfluxDB*, a customização de um painel para visualização dos dados e a criação de outros usuários com acesso aos dados, porém com diferentes permissões.

5.4. Testes Funcionais

Primeiramente, o alcance do par de rádios FS1000A e XY-MK-5V foi avaliado. Porém, apenas a 3 m em linha de visada já ocorriam transmissões com perda de dados, o que se demonstrou indesejado até mesmo para uma prova de conceito. Como alternativa, antenas helicoidais comerciais foram utilizadas. Com isso, o alcance em linha de visada ultrapassou 15 m.

Num primeiro momento, durante o teste de operação, que simula uma situação real, cada um dos subsistemas foi testado isoladamente, para garantir seu funcionamento. Uma vez que os subsistemas operaram de forma apropriada, a integração dos subsistemas foi feita gradualmente, garantindo que não haviam problemas de compatibilidade entre eles.

O cenário de testes final foi então montado em um laboratório de pesquisa e ensino da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), onde o nó sensor foi posicionado próximo ao centro

da sala e o *gateway* em um de seus cantos. Em outra extremidade, um computador foi utilizado para gerar um ponto de acesso permitindo ao *gateway* se conectar à internet. E o servidor MQTT foi configurado na plataforma *Heroku*. Em outro ponto de acesso, fora da UFSC, um *laptop* executando os contêineres de serviços foi preparado e configurado para receber os dados.

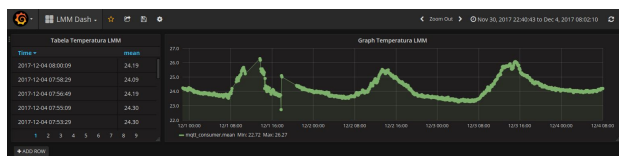


Figura 13 – Dashboard mostrando os dados coletados durante os testes de operação. Imagem do autor.

Os dados coletados entre os dias 1 até 4 de dezembro de 2017 estão disponíveis na Figura 13, que apresenta um recorte do *dashboard* da ferramenta de visualização. Os trechos do gráfico que não apresentam os pontos referentes a temperatura estão dessa forma por uma queda da conexão com a internet ocorrida nas instalações do local monitorado. O gráfico não mostra todas as amostras coletadas pelo sistema, mas uma média ponderada dentro dos pontos recebidos em de cada intervalo de 5 segundos.

5.5. Avaliação da Prova de Conceito

Durante os testes, ficou claro que a proposta de arquitetura para o sistema opera de maneira satisfatória. Entretanto, algumas considerações importantes devem ser feitas e levadas em conta no projeto final do produto.

A principal dificuldade encontrada foi a incompatibilidade da biblioteca de comunicação de rádio RadioHead com o microcontrolador da plataforma NodeMCU. Assim, é importante estar atento a compatibilidade multiplataforma dos códigos utilizados na versão final. Ainda sobre o rádio, a necessidade de utilizar-se uma antena helicoidal, que não era planejada, demonstra a necessidade da devida atenção em relação ao enlace de comunicação para que esse requisito do projeto possa ser atendido. Possíveis soluções são: a melhoraria da sensibilidade do receptor, a utilização de uma antena de maior ganho, e garantir a equalização entre as antenas do transmissor e receptor. Além de todas essas opções, seria ainda possível aumentar a potência do transmissor, ao custo de reduzir a autonomia do nó sensor.

Além disso, e não menos importante, identificou-se que para a configuração a configuração de múltiplos nós deve ser operar mais eficientemente, pois carregar as configurações dos nós, um por um, via interface cabeada se demonstrou comercialmente inviável. Uma possível alternativa seria utilizar-se um componente óptico (e.g. fototransistor e fotodiodo) para receber informações pela interface de recepção serial de dados (pino de rx) da mesma interface utilizada para enviar dados para o rádio.

6. Conclusões

O processo de desenvolvimento de produto apresentado nesse artigo visa sintetizar o fluxo de desenvolvimento completo, apresentando o caso específico de um sistema de telemetria e enfatizando a visão de sistema embarcado do produto. Certamente, muitas outras atividades não apresentadas são necessárias até o desenvolvimento de um produto mínimo viável, porém estas foram deixadas fora do escopo deste documento por não se tratar do foco deste trabalho.

Foram apresentados aqui as principais etapas necessárias à etapa de projeção do produto, definindo da arquitetura do sistema, dos subsistemas e dos módulos que compõem cada um deles, sempre que possível, justificando as decisões de projeto com base nos conhecimentos da literatura específica e das disponibilidades comerciais.

Levando em conta a complexidade do desenvolvimento de um produto a nível de sistema, acredita-se que este trabalho foi capaz de tratar de forma técnica, direta e sucinta cada uma das etapas de projeto. Deste modo, acredita-se que este artigo sirva como um exemplo de ponto de partida para desenvolvimento de produtos de sistemas telemetria com grande ênfase em sistemas embarcados.

REFERÊNCIAS

ABAD, E; PALACIO, F; NUIN, M; GONZALES, A; JUARROS, A; GOMEZ, J; MARCO, S. **RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: Demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain**, Journal of Food Engineering, Volume 93, Issue 4, 2009, Pages 394-399.

ALBUS, Z; VALENZUELA, A; BUCCIN M. **Ultra-Low Power Comparison: MSP430 vs. Microchip XLP Tech Brief**, Tech. Rep., 2009.

BACK, N; OGLIARI, A; DIAS, A; SILVA, J. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. São Paulo: Manole, 2008.

BAJPAI, A; SHARMA, K. **Cold Chain Tracking and Monitoring Market by System (Hardware and Software), by Solution (Storage and Transportation), and End User (Healthcare, Food & Beverage, Chemical, and Others) - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2014-2022**. Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/cold-chain-tracking-and-monitoring-market>. Acessado em 6 de fevereiro de 2018.

BRASIL. **Programa Indústria 4.0 receberá mais incentivos no Brasil**. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/09/programa-industria-4-0-recebera-mais-incentivos-no-brasil>. Acessado em 6 de fevereiro de 2018.

BRASIL. RDC Nº 44, de 17 de agosto de 2009. **Boas Práticas Farmacêuticas para o controle sanitário do funcionamento, da dispensação e da comercialização de produtos e da prestação de serviços farmacêuticos em farmácias e drogarias**. Órgão emissor: ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

BRASIL. RDC Nº 55, de 16 de dezembro de 2010. **Registro de produtos biológicos novos e produtos biológicos e dá outras providências**. Órgão emissor: ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

CARULLO, A; CORBELLINI, S; PARVIS, M; VALLAN, A. (2009). **A Wireless Sensor Network for Cold-Chain Monitoring**. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, vol. 58 n.5, pp. 1405-1411.

EXAME. **O Brasil está pronto para a indústria 4.0?**. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/tecnologia/o-brasil-esta-pronto-para-a-industria-4-0/>. Acessado em 6 de fevereiro de 2018.

LORITE, G; SELKALA, T; SIPOLA, T; PALENZUELA, J; JUBETE, E; VINUALES, A; CABANERO, G; GRANDE, H; TUOMINEN, J; UUSITALO, J; HAKALAHTI, L; KORDAS, K; TOTH, G. **Novel, smart and RFID assisted critical temperature indicator for supply chain monitoring**, Journal of Food Engineering, Volume 193, 2017, Pages 20-28.

MARKETSANDMARKETS. **Cold Chain Monitoring Market by Component (Hardware: Data Loggers & Sensors, RFID Devices, Telemetry & Telematics, Networking Devices, and Software), Logistics (Storage, and Transportation), Application, and Geography - Global Forecast to 2022**. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/cold-chain-monitoring-market-161738480.html>. Acessado em 6 de fevereiro de 2018.

MERCIER, S; VILLENEUVE, S; MONDOR, M; UYSAL, I. (2017), **Time-Temperature Management Along the Food Cold Chain: A Review of Recent Developments**. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 16: 647-667. doi:10.1111/1541-4337.12269

PEQUENAS EMPRESAS & GRANDES NEGÓCIOS. **SÓ 48% DAS INDÚSTRIAS BRASILEIRAS SÃO '4.0'**, DIZ CNI. Disponível em: <http://revistapegn.globo.com/Empreendedorismo/noticia/2016/05/so-48-das-industrias-brasileiras-sao-40-diz-cni.html>. Acessado em 6 de fevereiro de 2018.

PEQUENAS EMPRESAS & GRANDES NEGÓCIOS. **Fórmula para ter sucesso**. Disponível em: http://revistapegn.globo.com/EditoraGlobo/componentes/article/edg_article_print/0,3916,451610-2497-3,00.html. Acessado em 6 de fevereiro de 2018.

TOLLEFSON, J. **POWER CONSUMPTION IN PIC MCUS WITH XLP TECHNOLOGY VS. TI'S MSP430**, Tech. Rep., 2014.