

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica

Emmanuel Leite de Medeiros

**Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição
de Dados em Rede Híbrida de Comunicação de
uma Planta Hidráulica focado em LoRa**

João Pessoa

2018

Emmanuel Leite de Medeiros

**Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados
em Rede Híbrida de Comunicação de uma Planta
Hidráulica focado em LoRa**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Engenharia Elétrica da Uni-
versidade Federal da Paraíba (UFPB) como
parte dos requisitos necessários a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Eletrônica

Orientador:

Professor Dr. Carlos Alberto de Souza Filho

João Pessoa

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M488d Medeiros, Emmanuel Leite de.

Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados em Rede Híbrida de Comunicação de uma Planta Hidráulica focado em LoRa / Emmanuel Leite de Medeiros. - João Pessoa, 2018.

86 f.

Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Rede Híbrida. 2. LoRa. 3. Instrumentação. I. Título

UFPB/BC

Emmanuel Leite de Medeiros

Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados em Rede Híbrida de Comunicação de uma Planta Hidráulica focado em LoRa

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Eletrônica

Trabalho aprovado:

Professor Dr. Carlos Alberto de Souza Filho
Orientador

Professor Dr. Cleonilson Protásio de Souza
Avaliador

Professor Dr. Fabrício Braga Soares de Carvalho
Avaliador

Professor Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva
Avaliador

João Pessoa

2018

*Dedico aos professores e técnicos
do Departamento de Engenharia Elétrica
que ajudaram direta ou indiretamente
na construção deste trabalho.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelas graças, ajudas e oportunidades concedidas de fazer este trabalho e pela oportunidade de estar próximo do fim do curso. Em segundo a Nossa Senhora que nunca deixou de interceder por mim durante este projeto.

Agradeço a família, a minha namorada Alana e aos amigos por todo apoio e carinho que ajudaram de alguma maneira a aliviar o meu fardo do trabalho e superar dificuldades.

Agradeço também, em especial, ao orientador Carlos Alberto por toda ajuda, disponibilidade, orientação, ensino e paciência em lidar com os problemas e as atividades propostas e vividas no trabalho.

Agradeço ao técnico do laboratório do LAC Pedro, por dar apoio na implementação física do sistema desenvolvido, ao professor Juan por disponibilizar equipamentos de extrema importância para a análise de resultados e ao professor Ronildo e ao técnico Edilson do LENHS pela ajuda nos experimentos ocorridos no próprio LENHS.

Agradeço aos professores e colegas que forneceram literaturas que auxiliaram no entendimento e na base de estudos do projeto e a todos os professores que fizeram parte da minha graduação de forma direta ou indireta e que ajudaram a chegar na reta final do curso.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*
(Martin Luther King)

Resumo

Os sistemas de distribuição de água visam ideias de otimização e eficiência a fim de promover uma melhoria de sua infraestrutura que pode acontecer por meio do uso de gerenciamento inteligente e remoto de sensores de vazão ou pressão do sistema hidráulico. Uma gestão de maneira eficiente e inteligente que proporciona melhoria de infraestrutura é buscada por cidades inteligentes, que utilizam essa melhoria para fornecer qualidade de vida à população. Para o gerenciamento remoto pode ser usado módulos de comunicação que embarcam a tecnologia LoRa, pois esta proporciona uma ampla cobertura de comunicação entre os módulos, além de prezarem pelo baixo consumo de energia. Sendo assim, este trabalho uniu as ideias de otimização e eficiência buscadas por cidades inteligentes com gerenciamento remoto e inteligente através de módulos LoRa, ideias estas que foram aplicadas a uma planta hidráulica que simula um caso real de uma rede de distribuição de água, presente em um laboratório da Universidade Federal da Paraíba. Este trabalho abordou temáticas das áreas de comunicação e instrumentação que promoveram o desenvolvimento de um sistema capaz de adquirir dados de um sensor de vazão por pressão diferencial dentro do laboratório e transmiti-los por diferentes módulos de comunicação cabeados ou sem fio, tendo como principal comunicação um módulo LoRa com o intuito de enviar dados a longas distâncias, e assim, instrumentalizar a planta hidráulica e gerenciá-la remotamente. Além da instrumentalização, este trabalho apresenta estudos do comportamento de transmissão do módulo LoRa presente no sistema desenvolvido.

Palavras-chave: Instrumentação, LoRa, Cidades Inteligentes, Rede Híbrida de comunicações.

Abstract

The water distribution systems aims ideas of optimization and efficiency to promote an improvement of its system and that it would come by a smart management of flow and pressure sensors in the hydraulic system. A smart and efficient management that provides an improvement of infrastructure is looked for smart cities, that uses this improvement to provide a life's quality to population. For the remote management can be used communication modules with LoRa technology because it provides a wide area of communication between modules, in addition to appreciate low energy consume. So, this paper connected the efficiency and optimization ideas looked in smart cities with remote and smart management through LoRa and applied them in a hydraulic system, that simulates a real system of water distribution, in a lab of University Federal of Paraíba. This paper approached communication and instrumentation themes that provided a development of a system that acquires datas of a flow sensor by differential pressure inside of the lab and send it through many communication modules cabled or wireless, where the main module is LoRa, and so, instrumentalizate the system and transmit datas remotely. Besides, this paper shows a study about the transmission behavior of LoRa used to the system developed.

Keyword: Instrumentalization. LoRa. Smart cities. Hybrid communications network

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tubo de Venturi.	18
Figura 2 – Placa de Orifício.	18
Figura 3 – Comportamento da queda de pressão - Placa de Orifício.	19
Figura 4 – Camadas do LoRa.	22
Figura 5 – Aplicação do <i>Spread Spectrum</i> a um sinal.	23
Figura 6 – Formato da mensagem física.	24
Figura 7 – Arquitetura da rede LoRaWAN.	25
Figura 8 – Mensagem MAC.	27
Figura 9 – Janela de recepção.	27
Figura 10 – Janela de recepção - classe C.	29
Figura 11 – Módulo E32-TTL-100.	29
Figura 12 – Conexão do módulo E32-TTL-100 com um MCU.	31
Figura 13 – Modelo plano-terra	34
Figura 14 – Sensor MPX5010	36
Figura 15 – Rede LENHS - LAC.	37
Figura 16 – LaunchPad Tiva TM4C1294.	38
Figura 17 – Diagrama de Blocos do Hardware.	39
Figura 18 – Esquemático RS232.	40
Figura 19 – Esquemático RS485.	40
Figura 20 – Esquemático CAN.	41
Figura 21 – Esquemático de pinos - LoRa.	42
Figura 22 – Esquemático de pinos - Bluetooth.	42
Figura 23 – Circuito de condicionamento - Amplificador de Instrumentação.	43
Figura 24 – Circuito de condicionamento - Filtro.	43
Figura 25 – Circuito de condicionamento - conectores.	44
Figura 26 – Hardware secundário - esquemático	44
Figura 27 – Pinagem do SADIR	45
Figura 28 – Parte adicional do sistema - SADIR	45
Figura 29 – Sistema de Aquisição e Interface de Rede - SADIR.	46
Figura 30 – Transceptor RS485-LoRa - TR485LoRa.	46
Figura 31 – Topologia do hardware.	47
Figura 32 – Fluxograma LENHS.	48
Figura 33 – Fluxograma LAC	49
Figura 34 – Interface do bluetooth	50
Figura 35 – Interface do LabView	50
Figura 36 – Fluxograma do teste 1 - Transmissor	52
Figura 37 – Fluxograma do teste 1 - Receptor	53
Figura 38 – Fluxograma do teste 2 - Receptor	54

Figura 39 – Fluxograma do teste 2 - Transmissor	55
Figura 40 – Analisador de Espectro N9340B	56
Figura 41 – GPS Etrex 10	57
Figura 42 – Interface do bluetooth para o cenário 2	58
Figura 43 – Ponto X - teste 1, cenário 3	59
Figura 44 – Pontos Y e Z - teste 2, cenário 3	60
Figura 45 – Latitude e Longitude LAC, LENHS e PET	61
Figura 46 – Cenário 2	62
Figura 47 – Zoom - Linha de transmissão.	62
Figura 48 – Zoom - Trecho com desvio.	63
Figura 49 – Zoom - Trecho entre 900 a 1116 metros.	63
Figura 50 – Trajeto Aeroclube da Paraíba - teste 1 e 3.	64
Figura 51 – Recapitulando o Ponto X - teste 1, cenário 3.	65
Figura 52 – Trecho entre Ponto X e Fim da pista.	65
Figura 53 – Trecho do teste com o analisador	66
Figura 54 – Potência em função da distância	66
Figura 55 – Erro percentual entre curva experimental e teórico em função da distância 67	67
Figura 56 – Trajeto Aeroclube da Paraíba - Teste 2	67
Figura 57 – Trecho de 900 metros.	69
Figura 58 – Fotografia do medidor de pressão mecânico do tipo tubo em U do LENHS. 70	70
Figura 59 – Fotografia da placa de Orifício do LENHS	70
Figura 60 – Adaptador	71
Figura 61 – Circuito instalado.	72
Figura 62 – Gráfico com as curvas experimentais e teórica	75
Figura 63 – Gráfico Vazão em função da coluna de mercúrio	75
Figura 64 – Gráfico Pressão em função da coluna de mercúrio	76

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre Sigfox, LoRa e Ingenu.	32
Tabela 2 – Exemplo de expoentes e seus meios.	35
Tabela 3 – Comandos associados as comunicações.	49
Tabela 4 – Parâmetros do E32-TTL-100	56
Tabela 5 – Perdas em função da distância.	68
Tabela 6 – Dados para as curvas experimentais	74
Tabela 7 – Erro entre a pressão MPX e manométrica do tipo tubo em U.	77

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Escopo do trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Medidores de Fluxo	17
2.2	Cidades inteligentes e Internet das coisas	20
2.3	LoRa	21
2.3.1	Camada física	22
2.3.2	Arquitetura da rede	24
2.3.3	Protocolo LoRaWAN	26
2.3.3.1	Classe A	26
2.3.3.2	Classe B	28
2.3.3.3	Classe C	28
2.3.4	Módulos LoRa	29
2.3.5	Outras tecnologias	31
2.4	Estudo de propagação	32
2.5	Sensor MPX5010	36
3	DESCRIÇÃO DO PROJETO	37
3.1	Hardware	38
3.2	Software	48
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	52
4.1	Análise de transmissão	52
4.1.1	Metodologia	52
4.1.1.1	Teste 1 - Integridade da transmissão	52
4.1.1.2	Teste 2 - Perda de pacotes	53
4.1.1.3	Teste 3 - Potência do sinal recebido	55
4.1.1.4	Cenário 1 - LAC/LENHS	56
4.1.1.5	Cenário 2 - Rua de maior comprimento da UFPB	57
4.1.1.6	Cenário 3 - Aeroclubes	58
4.1.2	Resultados	60
4.1.2.1	Cenário 1	60
4.1.2.2	Cenário 2	61
4.1.2.3	Cenário 3	64
4.2	Medição da vazão	69
4.2.1	Plataforma de testes	69
4.2.2	Metologia	72

4.2.3	Resultados	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
	REFERÊNCIAS	85

1 Introdução

Um sistema de distribuição de água é considerado eficiente quando operado diariamente com economia de energia elétrica, baixo custo de manutenção unidos a uma distribuição, em cada nó da rede hidráulica, proporcional as demandas de consumo e com pressões desejadas, pontua Righetto (2002). Ele afirma também que um sistema de distribuição deve ser confiável ao ponto de suprir demandas em condições adversas.

Dentre as situações adversas está em fornecer água mediante perdas. A água limpa, segundo Lange *et. al.* (2008), não chega ao consumidor corretamente devido a danos nos tubos de abastecimento, havendo um desperdício. Uma possível solução, menciona Righetto (2002), está na aplicação de sistemas modernos de gerenciamento e facilidades computacionais que possam analisar pontos como pressão, vazão, entre outros buscando a minimização de perdas e o aumento da eficiência da rede de distribuição.

Diversas são as técnicas de medição de vazão, o que mostra a sua importância em processos industriais (Balbinot e Brusamarello, 2000), principalmente em redes de distribuição de água, cujo uso de técnicas de medição correta, unidos a um processamento inteligente da variáveis medidas pode fornecer otimização e eficiência da distribuição e economia de processos.

A necessidade de otimização e eficiência, estimula o desenvolvimento de projetos capazes de suprir tais necessidades, aponta Righetto (2002) e podem proporcionar um crescimento tecnológico e uma melhoria de infraestrutura tanto em ambiente industrial quanto em ambiente civil.

Um conceito apresentado por Schaffer *et. al.* que abrange as ideias de gerenciamento moderno e inteligente de sistemas que proporcionam eficiência e fomentam o crescimento da tecnologia e melhoria de infraestrutura, que conseqüentemente gera uma melhoria de vida é o conceito de cidades inteligentes.

Nas cidades inteligentes ou *smart cities* são buscados de maneira inteligente, por meios econômicos e tecnológicos suprir necessidades do dia-a-dia, seja em segurança pública ou ambiental ou em serviços em gerais como comércio ou atividades industriais, aponta Vilaca *et. al.* (2014), e visam ainda a interconectividade das soluções e dos serviços por meio de comunicações sem fio para manter consumidores informados e atualizados sobre o ambiente que os circunda.

Em cidades inteligentes, segundo Centenaro *et. al.* (2016), os dispositivos sem fio de baixo consumo de energia tem como maior obstáculo a cobertura da transmissão, principalmente em centros urbanos. Sendo assim, uma maneira de proporcionar comunicação com baixo consumo energético atrelado a amplas coberturas de transmissão pode ser através do uso de módulos LoRa.

Partindo da ideia de eficiência da rede de distribuição de água atrelada a melhoria

inteligente de infraestrutura requerida pelas *smart cities* com o uso de comunicações de baixo consumo energético e longo alcance de transmissão, um trabalho desenvolvido na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) uniu essas ideias.

Dentro da UFPB, no Centro de Tecnologia, há o Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) cujo ambiente possui um sistema real de uma planta de distribuição de água. Em determinados trechos da planta há sensores de fluxo por pressão diferencial como placa de orifício e tubo de Venturi, em que a medição de pressão nos sensores de vazão era realizada por indicadores visuais.

Com isso, foi desenvolvido um sistema capaz de adquirir dados da pressão exercida pelo sensor de vazão por pressão diferencial e então transmisti-los por diferentes módulos de comunicação, cabeados e sem fio - sendo o módulo LoRa como principal - formando uma rede híbrida de comunicação que fornece principalmente transmissão remota de dados, facilitando assim a medição da vazão e o gerenciamento da planta.

No LENHS há também diversos sensores interligados em redes cabeadas. Assim, o sistema de aquisição híbrido de comunicações desenvolvido concede a possibilidade de conecta-lo as redes já existentes no LENHS.

Logo, o projeto desenvolvido propõe uma melhoria da forma de aquisição da vazão de uma planta real, interconexão de redes existentes no LENHS ao sistema implementado e transmissão de dados remotamente a longas distâncias, ou seja, é uma proposta que está dentro dos parâmetros buscados por cidades inteligentes.

1.1 Objetivos

Mediante ao que foi exposto, o projeto tem como objetivo geral a criação de um sistema de aquisição de dados de um sensor de vazão por pressão diferencial que pudesse utilizar diferentes módulos de comunicação, cabeada ou sem fio e que o dado pudesse ser transmitido a longas distâncias. Dentro desse objetivo alguns pontos específicos foram propostos:

- Compreender e utilizar a tecnologia LoRa (*Long Range*) no desenvolvimento do sistema.
- Compreender o protocolo de comunicação de dados LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*).
- Analisar o comportamento da transmissão de dados com e sem obstáculos com LoRa.
- Instrumentalizar a medição de vazão no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento.

- Associar o sistema desenvolvido ao conceito de cidades inteligentes na medição de vazão em redes de distribuição de água.

1.2 Escopo do trabalho

No Capítulo 2 serão abordados assuntos essenciais que serviram de base para análise do comportamento de módulos com tecnologia LoRa e da planta hidráulica.

No Capítulo 3 é detalhada a solução proposta a qual inclui a estrutura física do *hardware*, como módulo de comunicação usado, topologia entre outros parâmetros, além das interfaces de *softwares* que ajudam na construção do sistema e na aquisição e controle de dados.

No Capítulo 4 contém as análises de comportamento do módulo LoRa usado, a descrição do ambiente de estudo e os resultados. Há também o procedimento da medição de vazão, como também a instalação e resultados.

Por fim no último capítulo estão as considerações finais e trabalhos futuros propostos.

2 Referencial Teórico

Neste capítulo serão abordados conceitos fundamentais que foram necessários para aplicação e entendimento do projeto. Os assuntos envolvem a área de instrumentação, um breve comentário sobre cidades inteligentes e internet das coisas, a descrição do módulo usado no trabalho, como também o sensor e conceitos básicos sobre a propagação de sinais eletromagnéticos.

2.1 Medidores de Fluxo

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2000, p. 294) fluxo pode ser entendido como “a quantidade de matéria, volume ou massa que escoar por unidade de tempo em uma dada instalação” e é uma grandeza física cujas medições são de grande importância no âmbito industrial local e global.

Há diversas aplicações, a exemplo de um estudo feito no Instituto Fraunhofer na Alemanha (LANGE, et. al., 2008) em instalações de distribuições de água, cujas frações de água pura desperdiçada devido a vazamentos nos dutos, são medidas através de sensores baseados no princípio de anemômetro a fio quente. Outra aplicação está no monitoramento do meio ambiente onde é possível analisar que nas áreas urbanas o fluxo de ar afeta a qualidade de vida de pedestres, do ar, entre outros fatores (JING *et. al.*, 2011).

Para medição de fluxo é levado em consideração os métodos ou dispositivos utilizados como também a característica do fluido e conceitos relacionados a este como viscosidade, densidade, massa específica, condutividade e compressibilidade.

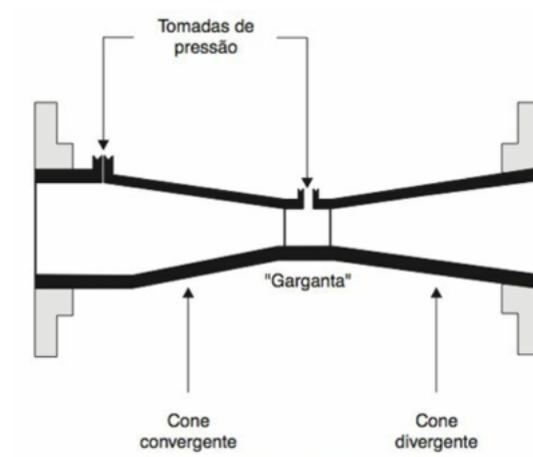
Dentre os métodos e dispositivos de medição estão placa de orifício, bocal, tubo de Pitot, tubo de Venturi, área variável, deslocamento positivo, efeito Coriolis, efeito eletromagnético, ultrassônico, turbina, vórtice e transporte térmico, sendo que cada um analisa o fluxo do fluido através de respostas específicas como temperatura, tensão, pressão, dentre outras.

Para cada um deles, há também seu respectivo fluido característico para melhor medição, sendo para alguns medidores, recomendam-se o uso de fluidos limpos, outros sujos, condutivos ou viscosos.

Dando destaque aos medidores por diferença de pressão, nas Figuras 1 e 2 se encontram dois dos principais exemplos de medidores diferenciais de pressão. A funcionalidade deles, segundo Balbinot e Brusamarello (2000, p. 296) é baseado na obstrução de um fluido e esta obstrução causa uma queda de pressão, a qual é usada no cálculo da vazão.

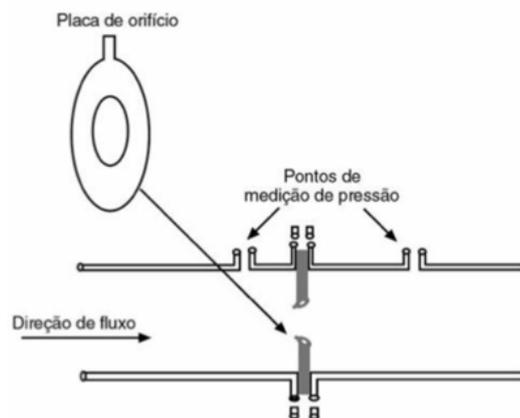
No LENHS existem dois tipos de sensores de fluxo por diferença de pressão: tubo de Venturi (Figura 1) e placa de orifício (Figura 59), sendo esta a escolhida pois fornece

Figura 1 – Tubo de Venturi.



Fonte: BALBINOT; BRUSAMARELLO (2000).

Figura 2 – Placa de Orifício.



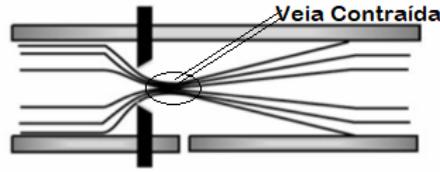
Fonte: BALBINOT; BRUSAMARELLO (2000).

uma maior queda de pressão em comparação ao tubo de Venturi.

A placa de orifício é um obstáculo inserido na tubulação que tem uma pequena abertura em comparação ao diâmetro da tubulação. Em comparação com outros medidores de fluxo por pressão diferencial, a placa de orifício, de acordo com Balbinot e Brusamarello (2000, p.298), é considerada a mais simples de medir o fluxo porém apresenta turbulências no orifício e assim impõe um comportamento na queda de pressão vista na Figura 3.

A medição da pressão exercida na tubulação pode ser analisada nos pontos de medições, um antes e outro depois da queda, como vistos na Figura 2. A equação que rege o funcionamento dessa medição é a equação de Bernoulli, encontrada na equação 2.1.

Figura 3 – Comportamento da queda de pressão - Placa de Orifício.



Fonte: Adaptado de BALBINOT; BRUSAMARELLO (2000).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (2.1)$$

em que v , P e ρ são respectivamente velocidade, pressão e massa específica do fluido, g é a gravidade e h é a altura do ponto de pressão analisado. As incógnitas de índice 1 se referem antes da queda e o índice 2 a depois da queda. Se h_1 for aproximadamente igual a h_2 , então será obtido:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.2)$$

$$\frac{P_1}{\rho} - \frac{P_2}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \quad (2.3)$$

$$P_1 - P_2 = \rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (2.4)$$

Usando e rearranjando a equação do princípio de conservação de massa (eq. 2.5), obteve-se a Equação 2.6:

$$v_1 A_1 \rho = v_2 A_2 \rho \quad (2.5)$$

$$v_1 = \frac{v_2 A_2}{A_1} \quad (2.6)$$

em que A_1 é a área da tubulação e A_2 a área da placa de orifício. Aplicando a Equação 2.6 em (2.4):

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho}} \quad (2.7)$$

Por fim, aplicando (2.7) em (2.5), obtém-se:

$$Q = v_1 A_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho}} \quad (2.8)$$

em que Q é o fluxo volumétrico determinado pela diferença de pressão entre P_1 e P_2 . A pressão pode ser escrita como na Equação 2.9. Aplicando-a na Equação 2.8 obtém-se o resultado na Equação 2.10.

$$P = \rho g H \quad (2.9)$$

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2gH_d} \quad (2.10)$$

em que H_d é a diferença de altura causada pela diferença de pressão. As Equações 2.8 e 2.10 são para condições ideais. Porém, Balbinot e Brusamarello (2000, p. 298) afirmam que em casos reais essas equações ocasionam erros pois o fator A_2 presente nelas está associado a veia contraída (Figura 3), cujo valor é desconhecido. Além disso a turbulência nessa região da veia produz perdas de energia, fator ausente nas equações.

Um maneira de ser corrigidas, de acordo com Balbinot e Brusamarello (2000, p. 299), é a adição de dois fatores teóricos nas equações. Na Equação 2.11 está o novo arranjo para casos reais.

$$Q = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho}} \quad (2.11)$$

sendo d o diâmetro da placa de orifício, β igual a d/D , a relação entre os diâmetros da placa e o diâmetro da tubulação interna (D), C_d o coeficiente de descarga que tem relação com o β e o coeficiente de Reynolds, sendo este dependente do tipo de material e ϵ é o fator de expansibilidade relacionado a compressibilidade do fluido.

2.2 Cidades inteligentes e Internet das coisas

Segundo Schaffers *et. al.* (2011), o conceito de *smart cities*, ou cidades inteligentes é datado da década de 90, focado em ideias de globalização e inovação tecnológica, em que inteligente está associado a investimentos, com participação governamental, em aspectos sociais, humanos, em infraestrutura de comunicação e transporte além do gerenciamento inteligente de recursos naturais que provocam um crescimento econômico e sustentável, como também na qualidade de vida.

Entretanto, a questão da sustentabilidade foi agregada ao conceito, buscando usufruir da tecnologia atual, como de *smart phones* ou internet das coisas, focado principalmente nos centros urbanos.

Além do caráter socioeconômico, há também a perspectiva tecnológica que tem o foco em usar recursos do cotidiano das pessoas, a exemplo de alarmes de incêndio, rastreador de animais ou objetos, dentre outros e interliga-los de tal forma que possibilite

uma troca de informações visando o bem-estar da população, afirma Schaffers *et. al.* (2011).

Em resumo, a proposta de *smart cities* é fornecer e gerenciar, de forma inteligente, recursos econômicos e tecnológicos que trazem um crescimento social e de infraestrutura de cidades que conseqüentemente melhoram a qualidade de vida de uma população.

Por sua vez, a internet das coisas, ou *Internet of Things* (IoT), é um conceito que entra em conformidade com as cidades inteligentes, onde as "coisas", de acordo com Centenaro *et. al.* (2016), é a integração de dispositivos a internet, permitindo a interação entre pessoas e "coisas".

Segundo Augustin *et. al.* (2016), um requisito das IoT é o uso de redes *Low-Power Wide Area Network* (LPWAN), redes que proporcionam uma ampla cobertura de comunicação sem fio com o uso de baixa consumo energético.

A proposta de baixo consumo energético e ampla área de cobertura está atrelada à inovação tecnológica, como também as ideias de sustentabilidade energética e melhoria qualidade de vida, pontos importantes focados pelas cidades inteligentes.

Dentro das tecnologias desenvolvidas para redes LPWAN se encontra o LoRa que traz a ideia de um dispositivo que oferece consumo de pouca energia e ao mesmo tempo se comunica a distâncias quilométricas, o que faz dele um recurso interessante em aplicações de sensores inteligentes em infraestrutura civil, como monitoramento do ambiente ou saúde, além aplicações industriais, pontua Augustin *et. al.* (2016).

Sendo assim, neste trabalho desenvolvido visou o uso do LoRa - que é uma tecnologia voltada para cidades inteligentes e IoT - devido a capacidade de longo alcance de cobertura de comunicação para uma aplicação, em pequena escala, em um ambiente industrial.

2.3 LoRa

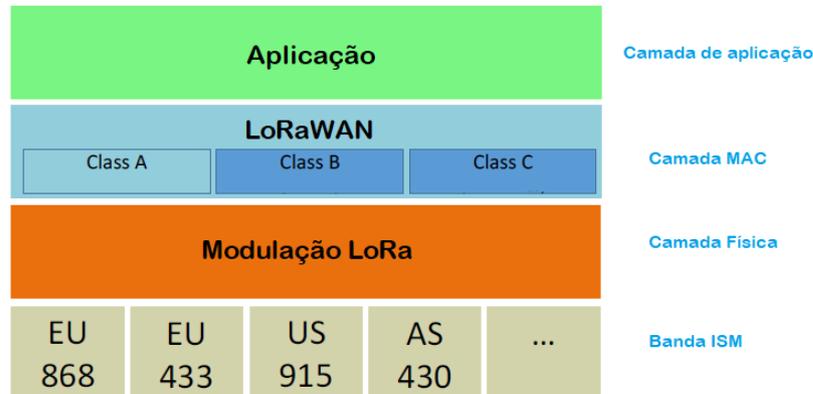
O LoRa ou *Long Range*, conforme Augustin *et. al.* (2016), veio como solução para redes LPWAN tendo como parâmetros importantes o consumo energético e longas distâncias, e se encontra em duas camadas de aplicação: camada física e camada MAC¹, como ilustrado na Figura 4.

De acordo ainda com Augustin *et. al.* (2016), a camada física é empregada a dispositivos que possuem limite energético e que não há necessidade de envio massivo de informações por meio de uma comunicação sem fio que proporciona grandes distâncias, se comparado a *bluetooth* ou Wi-fi. Na camada MAC se encontram especificações do controle de dados referente ao protocolo LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), e

¹ Medium Access Control.

também informações sobre a arquitetura da rede, presente na Figura 7, sendo focado em redes LPWAN.

Figura 4 – Camadas do LoRa.



Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2015).

2.3.1 Camada física

Segundo a Semtech (2016), a camada física do LoRa determina as técnicas de modulação, como também parametros para customização das mesmas, o formato da mensagem, as versões de hardware existentes e também suas características elétricas.

Dentre suas especificações vale destacar a sua modulação: a *Chirp Spread Spectrum* (CSS) que permite um maior alcance - derivando o nome *Long Range*, e codifica o sinal de tal maneira que o torna mais robusto e resistente a interferências e interceptações e que de acordo pela própria Semtech (2016), sua demodulação é mais fácil em comparação a modulações FSK - *Frequency Shift Keying*.

Chirp Spread Spectrum

Conforme Mann e Haykin (1991) *chirp* é um sinal cuja característica é variar sua frequência ao longo do tempo. Para Semtech (2016) este sinal é utilizado para modular o sinal a ser transmitido.

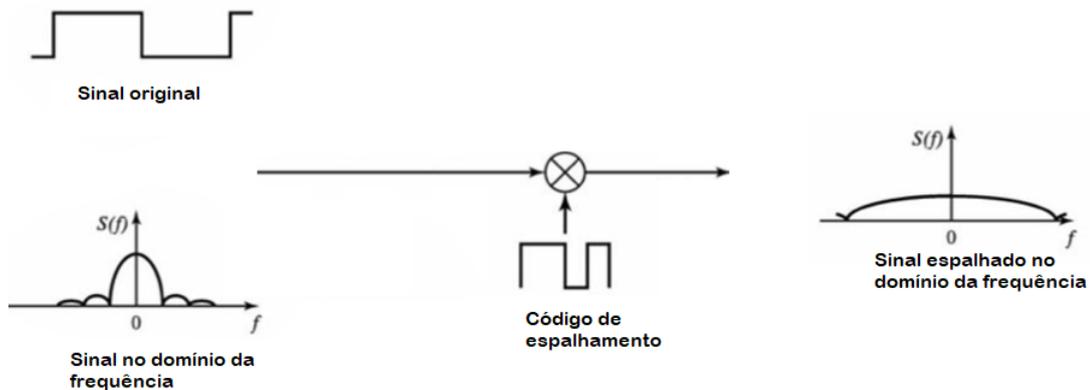
De acordo com Haykin e Moher (2008), o *Spread Spectrum* é uma técnica de modulação em que um sinal com determinada largura de banda R_b é espalhado a uma largura de banda R_c muito maior que a original (R_b).

Ainda segundo Haykin e Moher (2008), aplicando-se um sinal chamado de código de espalhamento² ao dado a ser transmitido, este será espalhado por todo espectro, como

² Vem do inglês *spreading code*.

pode ser visto na Figura 5, ficando abaixo do nível do piso do ruído, tornando-o difícil de ser interceptado aos receptores que não conhecem a estrutura do sinal modulado.

Figura 5 – Aplicação do *Spread Spectrum* a um sinal.



Fonte: Adaptado de Haykin; Moher (2008).

O código de espalhamento também é usado no receptor e serve para a reconstrução do original, o que torna essa técnica vantajosa, pois conforme Haykin e Moher (2008), caso o sinal transmitido sofra interferência de ruídos, no receptor haverá o desespalhamento do sinal transmitido enquanto o ruído será espalhado, podendo ser eliminado por um filtro, tornando o receptor mais imune a ruídos.

Outro benefício da técnica *spread spectrum*, apontado pela Semtech (2015), é permitir que sinais com diferentes *spreading codes* estejam em um mesmo canal. Para demodular um sinal corretamente, o código de espalhamento que foi aplicado no transmissor deve ser usado no receptor, isto é, um sinal com código de espalhamento diferente será considerado pelo receptor como ruído.

Segundo a Semtech (2015), a modulação do LoRa utiliza parâmetros como *spreading factor* (**SF**), que determina o comprimento do *spreading code* e *coding rate* (**CR**) que auxilia na identificação e correção de erros da mensagem durante uma transmissão. Esses parâmetros, combinados com a largura de banda do sinal e a potência de transmissão, determinam o alcance da cobertura da comunicação.

De acordo com a LoRa Alliance (2015), o LoRa usa as bandas de frequência não licenciadas ISM (*Industry, Scientific, Medical*), cuja utilização se dá pela indústria, aplicações científicas ou médicas, em que são regulamentadas questões como potência de transmissão, largura de banda e faixa de operação, que variam de acordo com a região de aplicação (Europa, América, entre outras).

Estrutura física da mensagem

A Semtech (2016) afirma que as mensagens de dispositivos LoRa estão de acordo com a estrutura da Figura 6 e seu tamanho é determinado pelos parâmetros SF e CR.

Figura 6 – Formato da mensagem física.



Fonte: Adaptado de Semtech (2016).

A mensagem começa pelo preâmbulo, que serve para sincronização do receptor durante a chegada de dados. Em seguida, o cabeçalho, que dependerá do modo (explícito ou implícito) escolhido:

- a) Explícito: É o modo padrão de operação do cabeçalho e fornece informações sobre o tamanho da palavra de dados, o (CR) e CRC³ do *payload*, além possuir próprio para descobrir cabeçalhos falhos;
- b) Implícito: Neste modo o cabeçalho fica ausente para reduzir o tempo de transmissão quando os dados, a taxa de codificação e CRC são conhecidos e fixos;

Por fim, o *Payload* é o campo de dados codificado, sendo uma palavra de tamanho variável de 2 a 255 bytes. O CRC do *payload* é usado em mensagens de *uplink*⁴, ausente nas de *downlink*⁵.

2.3.2 Arquitetura da rede

A arquitetura da rede apresentada pela LoRa Alliance (2015) é ilustrada na Figura 7. Sua topologia é do tipo estrela, cuja característica é possuir vários dispositivos conectados a um gateway. Dentro desses elementos, quatro se destacam, segundo a LoRa Alliance:

Dispositivos Finais

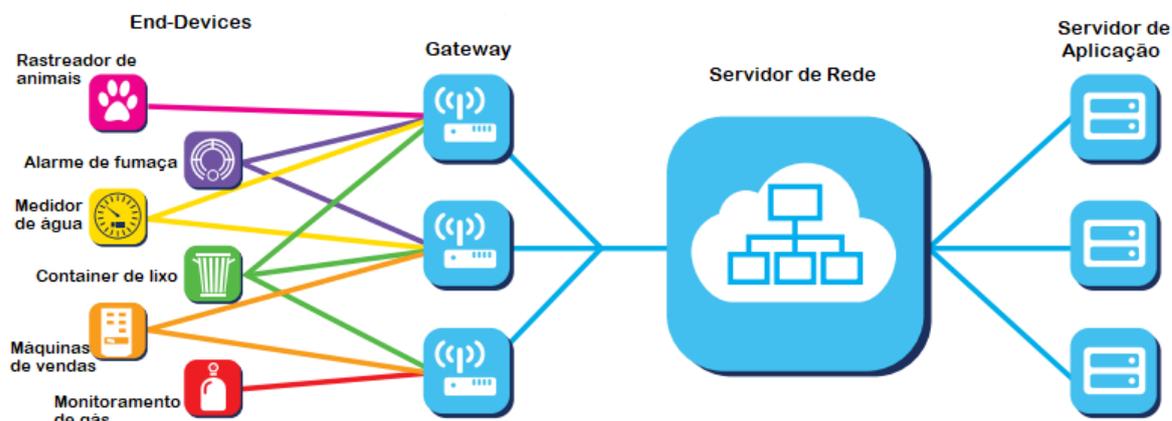
Os dispositivos (módulos) finais, conhecidos também por *end-devices* ou *end-points* ou *end-nodes*, de acordo com a LoRa Alliance (2015), são sensores ou atuadores que utilizam a modulação LoRa para se conectarem aos servidores de rede por meio de *gateways*, tem comunicação bi-direcional (transmite e recebe dados), possuem diversas aplicações e requisitos, sendo configurados de três maneiras, afirma a LoRa Alliance:

³ *Cyclic Redundancy Check* - Verificação cíclica de redundância.

⁴ Envio de dados de *end-devices* aos servidores de rede através de *gateways*.

⁵ Recebimento de dados de servidores de rede pelos *end-devices* através de *gateways*.

Figura 7 – Arquitetura da rede LoRaWAN.



Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2015).

Dispositivos de classe A

Na classe A ocorre agendamentos de mensagens de *uplinks* que vem seguidas de duas janelas de tempo de *downlinks*, ou seja, *downlinks* só acontecem caso um *uplink* aconteça previamente, fornecendo ao módulo a possibilidade de ser econômico ao custo do tempo de recepção.

Dispositivos de classe B

A classe B utiliza do mesmo princípio da classe A - *uplink* seguidos de dois *downlinks* - todavia concede ao módulo a chance de acontecer *downlinks* em tempos anteriormente agendados, ou seja, fornece um momento adicional para receber mensagens. Isso diminui a latência da informação, contudo aumenta o gasto energético.

Dispositivos de classe C

A classe C é de maior consumo e menor latência devido ao fato do recebimento de dados ser contínuo, sendo interrompido apenas durante as transmissões. Deste modo, pode ser empregado em dispositivos com maior disponibilidade de energia.

Gateways

O *gateway* é a ponte que interconecta os *end-nodes* aos servidores de rede. Um *gateway* recebe informações de vários dispositivos como também diversos *gateways* podem receber informações de apenas um módulo.

Servidores de rede

Os servidores de rede são responsáveis por gerenciar, filtrar pacotes de informações redundantes, checar a segurança dos dados vindas do *gateway*, dentre outras funcionalidades.

Servidores de aplicação

Os pacotes de dados gerenciados pelos servidores de rede podem ter uma destinação específica: servidores de aplicações - ligado ao serviço utilizado pelo usuário final e lidam com a camada de aplicação dos módulos.

2.3.3 Protocolo LoRaWAN

O LoRaWAN é um padrão aberto desenvolvido pela LoRa Alliance™ que se encontra na camada MAC e controla o fluxo de dados contido na mensagem física da Figura 6.

2.3.3.1 Classe A

Estrutura MAC da mensagem

Um resumo de toda estrutura da mensagem MAC pode ser vista na Figura 8 e servirá para o detalhamento desta estrutura.

Do *payload* da camada física (**PHYPayload**), é possível destrinchá-lo em cabeçalho MAC (**MHDR**), MAC *payload* (**MACpayload**) e na mensagem de código de integridade (**MIC**), conforme o manual de especificação do protocolo da LoRa Alliance (2017).

A LoRa Alliance (2017) afirma que o Cabeçalho MAC possui comprimento de 8 bits, e contém um campo (**MType**) que especifica o tipo de mensagem (*uplink* ou *dowlink*) e um campo (*Major*) que determina versão do LoRaWAN foi codificada.

Ainda a respeito do manual, dentro do MAC *payload* estão o *Frame Header* (**FHDR**), *Port Field* (**FPort**) que determina se a mensagem contém apenas comandos MAC ou comandos específicos e por fim *Frame Payload Encryption* (**FRMPayload**) cuja responsabilidade é determinar qual encriptação a ser usada na mensagem.

O campo *Frame Header* pode ser ainda dividido em **DevAddr** que contém o endereço do dispositivo final, **FCtrl** usado para controle de dados, **FCnt** para contagem de *uplinks* ou *downlinks* enviados e **FOpts** que transporta comandos MAC.

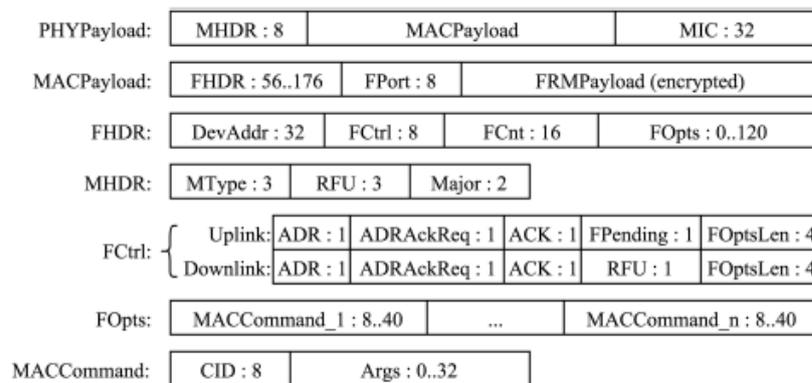
Segundo Augustin *et. al.*, o campo **FCtrl** ainda se divide em **ADR**, **ADRACKReq**, ambos responsáveis pelo controle adaptativo da taxa de dados, cuja função é otimizar a rede para melhor taxa de dados, **ACK** que confirma se houve recebimento da mensagem, **FPending**, disponível apenas em *uplinks*, indica se há informação adicional a

ser enviada do servidor de rede e se o dispositivo final deve abrir uma janela de recepção e no fim o campo **FOptsLen** determina o comprimento do campo **FOpts**.

Ele ainda afirma que o **FOpts** faz *backup* dos comandos MAC e os separa em dois argumentos: **CID** que identifica o comando e **Arg** usado para comandos adicionais.

Ao final da mensagem (**MHDR** e **MACpayload**), terá um valor será calculado e conferirá a integridade da mensagem e estará no campo **MIC**. Os campos **RFU** são reservados para uso a posteriori.

Figura 8 – Mensagem MAC.

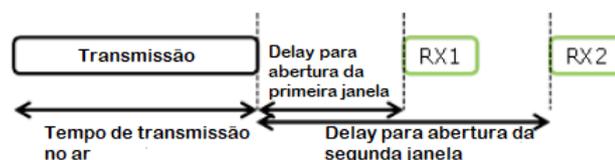


Fonte: Augustin *et. al.* (2016).

Janela de recepção

Logo após o envio de dados, explica a LoRa Alliance (2017), duas janelas (RX1 e RX2) de recepção são abertas, cujo o momento em que abrirão é baseado no fim da transmissão, como na Figura 9.

Figura 9 – Janela de recepção.



Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017).

A LoRa Alliance (2017) afirma ainda que a frequência do canal e a taxa de dados da primeira janela dependem, respectivamente, da frequência de *uplink* e da taxa de dados do mesmo. Já a segunda janela tem valores fixos, porém configuráveis, para o canal e a

taxa de dados. Os tempos de abertura das janelas devem ser grandes o suficiente para detectar o preâmbulo de *downlink*.

Além disso, a transmissão de um *downlink* deve começar no início da abertura de uma das janelas. Se o recebimento de dados acabar na primeira janela então não é necessário abrir a segunda. Vale lembrar que um novo envio de dados de um *end-module* só acontecerá após a finalização de um *downlink* por uma das janelas ou até que abertura da segunda janela expire.

Para os dispositivos façam parte da rede LoRaWAN é necessário fazer uma ativação em cada dispositivo e esta ativação se encontra no Apêndice B.

2.3.3.2 Classe B

A classe B, como discutido anteriormente, o dispositivo final recebe informações em tempos previamente determinados adicionando, assim, uma janela de recepção síncrona. A seleção dessa classe se dá através da camada de aplicação do próprio dispositivo.

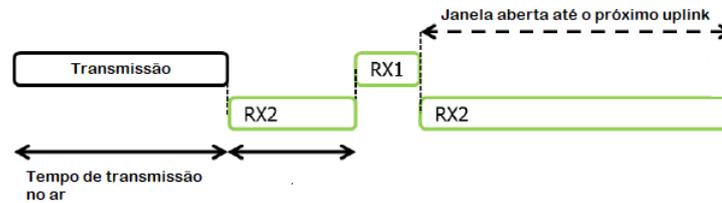
Para uma rede manter um módulo de classe B, de acordo com a LoRa Alliance (2017), é preciso que os *gateways* transmitam uma sinalização que serve para fornecer o tempo de referência para a abertura das janelas de recepção, que nesta classe, são especialmente chamadas de *ping slots*. Para que a classe B entre em operação é necessário que esteja disponível no servidor de rede a periodicidade, taxa de dados e o canal do *ping slot*.

O quadro de mensagens de *uplink* para a classe B é igual ao da classe A exceto que um bit presente no *frame header* que não era usado em A, agora é em B e indica ao servidor de rede que o dispositivo está no modo B e pronto para receber, de forma agendada, *downlinks*. O formato para *downlinks* permanece inalterado, mudando apenas a frequência do canal.

2.3.3.3 Classe C

Conforme o manual de especificações da LoRa Alliance (2017), a classe C é implementada quando há disponibilidade de energia suficiente ao dispositivo. Devido a esse fato, não ocorre a redução do tempo de recepção. Neste modo a recepção faz uso de RX1 e RX2 - mencionados na classe A, mas com comportamentos diferentes. O RX1 acontece da mesma maneira que em A mas o RX2, agora, opera quase a todo instante, exceto quando uma mensagem está sendo transmitida ou quando RX1 está aberta, como pode ser visto na Figura 10. Toda o resto da classe C é semelhante a classe A.

Figura 10 – Janela de recepção - classe C.



Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017).

2.3.4 Módulos LoRa

No mercado existem dispositivos com tecnologia LoRa que usam do chip da Semtech da série sx127X que embarcam a camada física do LoRa. Dentre os dispositivos, está o transceptor da empresa Ebyte[©], o E32-TTL-100 (Figura 11), o qual foi utilizado neste trabalho.

Figura 11 – Módulo E32-TTL-100.



Fonte: Ebyte (2018).

O dispositivo usa o módulo sx1278, opera a uma frequência entre 410 a 441 MHz com comunicação serial de TTL⁶ de 3,3 V, um consumo máximo de transmissão de 100 mW, derivando o nome do módulo, e uma memória de 512 Bytes.

O módulo da Ebyte foi usado devido sua disponibilidade na UFPB durante o desenvolvimento do projeto. Outro ponto a se destacar é que toda a informação sobre o módulo E32-TTL-100 foi retirada de seu manual de usuário (Ebyte, 2016).

Os parâmetros de configuração desse módulo são divididos em seis: *HEAD*, *ADDH*, *ADDL*, *SPED*, *CHAN* e *OPTION*. O parâmetro *HEAD* é seleciona se os parâmetros configurados serão salvos quando o módulo for desligado ou reinicializado.

⁶ Transistor-Transistor Logic

O *ADDH* e *ADDL* são referentes aos bytes mais e menos significativos do endereço do módulo, respectivamente.

O parâmetro *SPED* é responsável por selecionar a paridade da comunicação serial: *8N1*⁷, *8O1*⁸ e *8E1*⁹, selecionar a taxa da comunicação TTL, em bits por segundo e selecionar a taxa de transmissão no ar. O *CHAN* determina a frequência da comunicação.

Por fim, o *OPTION* e nele são escolhidos as opções de tipo de transmissão, se será usado resistor de *push-pull* interno para os pinos da comunicação serial, o tempo de transmissão ou monitoramento do preâmbulo e o uso do *Forward Error Correction* - fatores que serão abordados a posteriori - e seleciona a potência de transmissão do módulo.

Dos tipos de transmissão, em um deles, a transmissão do dado é direcionado apenas ao receptor que tiver os mesmos parâmetros de *ADDH*, *ADDL* e *CHAN* do transmissor. Este tipo de comunicação é selecionado com o parâmetro *OPTION* e se chama *fixed transmission*.

Há uma transmissão chamada de *broadcast transmission* e nela o dado será transmitido a todos os receptores que tenham o *CHAN* em comum com o transmissor. Para isso, é necessário escolher o tipo *transparent transmission*, no *OPTION* e usar o endereço do transmissor como 0x0000 ou 0xFFFF.

O *Forward Error Correction* (FEC) é um código de correção de erro de dados que procura recuperar e corrigir dados que sofreram algum tipo de interferência.

O E32-TTL-100 é um módulo RF que tem no total sete pinos dos quais dois são para selecionar o modo de operação do módulo, uma para alimentação, outro para o GND¹⁰, outro para *status* - serve para verificar o estado da comunicação - e por fim dois responsáveis pela comunicação serial. Para módulos desse tipo, se faz necessário conecta-lo a um microcontrolador (MCU), como na Figura 12.

Quatro são os modos de operação do E32: Modo normal, modo *Wake-up*, modo *Power-saving* e modo *sleep*. No modo normal, a UART¹¹ e a comunicação sem fio estão disponíveis. O transmissor recebe dados pela serial e forma pacotes de 58 Bytes a serem enviados enquanto o receptor espera os dados em prontidão. No modo *sleep* a UART está disponível mas a comunicação sem fio é interrompida para configuração do módulo.

O modo *wake-up* é semelhante ao normal, exceto pelo fato desse modo adicionar um preâmbulo antes do pacote de dados. O tamanho do preâmbulo depende do tempo selecionado no parâmetro *OPTION*. Esse preâmbulo serve para acordar dispositivos no modo *power-saving*.

⁷ 8 bits de dados, sem paridade e 1 bit de parada.

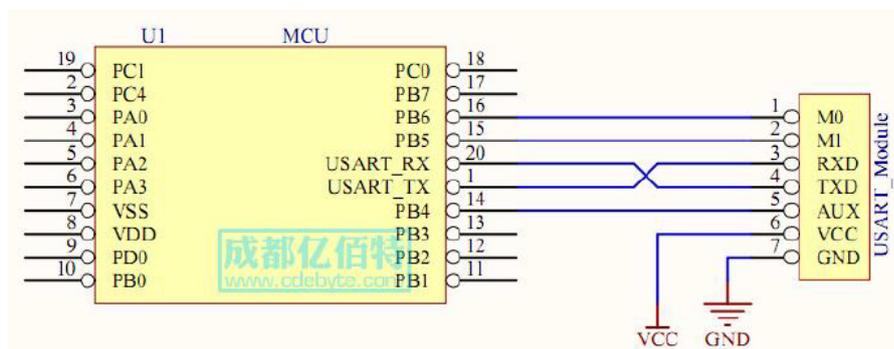
⁸ 8 bit de dados, paridade ímpar e 1 bit de parada.

⁹ 8 bits de dados, paridade par e 1 bit de parada.

¹⁰ *Ground* ou terra.

¹¹ *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*.

Figura 12 – Conexão do módulo E32-TTL-100 com um MCU.



Fonte: Ebyte (2018).

No modo *power-saving*, a UART é desabilitada, funcionando apenas a comunicação sem fio. Com isso o microcontrolador não se comunica com o módulo, servindo apenas para receptores.

A UART volta a funcionar novamente quando o receptor receber o preâmbulo enviado por um transmissor que esteja no modo *wake-up*. Esse modo é o mais econômico, pois o receptor só funciona de acordo com o tempo entre monitoramentos, selecionado no *OPTION*. Quanto maior for o tempo menor será o consumo de energia.

A comunicação do RFIC¹² sx1278 é SPI, contudo o módulo E32 adaptou essa comunicação para TTL, permitindo uma comunicação mais direta com microcontroladores. O módulo E32 consegue um alcance de aproximadamente 3 km.

Entretanto, a sua simplificação se torna uma desvantagem, pois não é possível ter acesso aos registradores do sx1278, que contém informações importantes, tal como a potência do sinal recebido.

Há também outros dispositivos que usam também chips LoRa da Semtech como o ESP32 com LoRa, da Heltec Automation ou como o RFM95, da Hoperf Eletronics - ambos mais complexos que o E32 - porém com mais liberdade no uso dos registradores do RFID da série sx127X.

2.3.5 Outras tecnologias

O LoRa, apesar de ser uma solução para redes LPWAN requeridas pelas cidades inteligentes e IoT, não é a única existente no segmento que une comunicação sem fio de longas distâncias ao baixo consumo, a exemplo da Sigfox e Ingenu que são empresas que também desenvolvem dispositivos focados nesses segmentos.

¹² Radio Frequency Integrated Circuit.

Tabela 1 – Comparação entre Sigfox, LoRa e Ingenu.

Tecnologia	Sigfox	Ingenu	LoRa
Bandas de Frequência (MHz)	868 ou 920	2400	Vários
Velocidade dos dados (bps)	100	10 - 8000	30 - 37500
Cobertura (km)	3 - 50	15	3 - 15
Payload	12 Bytes	-	2 a 255 Bytes
Limite de mensagens	140 por dia	-	Ilimitado

Fonte: Adaptado de Centenaro *et. al.* (2016).

A Sigfox, de acordo com Centenaro *et. al.*, em sua camada física, emprega modulações baseadas em *ultra narrowband*¹³ (UNB), cujas bandas são extremamente estreitas - oposto ao LoRa, que é *ultra wideband*¹⁴ (UWB).

Ainda segundo Centenaro *et. al.* (2016), a Sigfox permitia apenas comunicação unidirecional (apenas *uplinks*) mas, atualmente, os dispositivos suportam comunicações bidirecionais, sendo o forte ainda as mensagens de *uplink*.

Em um documento feito pela empresa internacional de consultoria sem fio, a *Real Wireless*, os módulos com Sigfox operam apenas em algumas faixas de frequência, além da taxa de dados ser mais baixa que o LoRa (em torno de 100 bits por segundo - bps), ter um limite de mensagens por dia e uma palavra de dados de apenas 12 bytes.

A Sigfox tem seu próprio protocolo que faz uso da rede LPWAN e opera nas bandas ISM com alcances propostos entre 50 a 100 km, porém em situações muito ideais.

Outra tecnologia presente no mercado, apontada pela *Real Wireless*, é a Ingenu da empresa *On-Ramp Wireless*. Utiliza UWB e opera especificamente em 2,4 GHz com alcances em torno de 15 km e possui sua própria modulação, chamada de *Random Phase Multiple Access* (RPMA).

Em resumo, na Tabela 1 é apresentada uma comparação das três tecnologias citadas.

2.4 Estudo de propagação

De acordo com Haaykin e Moher (2008), para entender o funcionamento do comportamento e das técnicas de comunicações sem fio é necessário um estudo da propagação do sinal que fornece uma modelagem apropriada, uma estimativa da potência requerida na transmissão e compensação de perdas durante a transmissão, a fim de obter uma comunicação mais confiável.

As abordagens para estudo dos canais de comunicação sem fio são divididos em

¹³ Ultra banda estreita.

¹⁴ Ultra banda larga.

dois grupos: Modelos determinísticos e modelos estatísticos. Os modelos determinísticos consideram o modelo físico exato do meio de propagação pois levam em consideração todos os fatores do meio, oferecendo maior exatidão em troca da alta complexidade computacional.

Já os modelos estatísticos têm caráter mais empírico, onde são levados em consideração características de diferentes meios genéricos e assim, estatisticamente, descrever certo meio de forma geral. Segundo Haykin e Moher (2008, p. 30-31) o modelo estatístico se mostra vantajoso pois é mais fácil de modelar e aplicá-lo que modelos determinísticos.

As propagações de um sinal são divididas em três tipos: *Propagação no espaço livre*, que está associado a uma propagação livre, sem obstáculos entre transmissor e receptor, *Reflexão* que se dá pelo rebatimento das ondas eletromagnéticas por objetos, como veículos ou construções e *Difração* cujas ondas contornam os objetos ou passam através de objetos com aberturas.

O sinal recebido, de modo geral, é uma combinação desses tipos de propagações, isto é, o sinal percorre vários trajetos até o receptor a ponto do sinal de cada percurso interferir em outro, seja de forma construtiva ou destrutiva. Esse fenômeno é chamado de *multi percurso* ou *multicaminho*.

Quando o transmissor ou receptor estiver em movimento, as propagações serão variáveis com o tempo, provocando o desvanecimento do sinal.

As propagações do sinal

Segundo Haykin e Moher (2008), a propagação no espaço livre é referente a modelos de sinais livre de obstáculos entre transmissor e receptor, com uma linha de visada direta, em que efeitos vindos da superfície terrestre podem ser desprezados. Esse tipo de situação acontece em comunicações de satélite. Geralmente nesse modelo de propagação a potência recebida decai com o quadrado da distância do transmissor, que pode ser visto na Equação 2.12.

$$P_R = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (2.12)$$

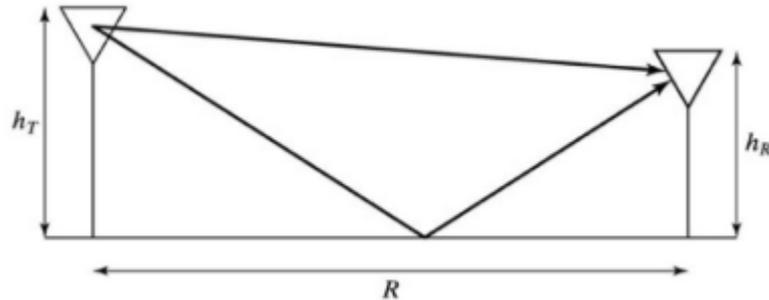
em que λ é o comprimento de onda do sinal, R é a distância entre as antenas, P_T e P_R são as potências de transmissão e recepção respectivamente.

Em um âmbito terrestre, as comunicações ocorrem entre diversos tipos de obstáculos que impedem a visada direta. Com isso, se faz uso de conceitos de refração e difração para modelar a propagação.

Dentre os modelos físicos terrestres citados por Haykin e Moher (2008), vale destacar o modelo plano-terra apresentado na Figura 13 que propõe um transmissor fixo com uma antena a uma altura ht transmitindo dados a um receptor também fixo com antena

a uma altura hr captando informação por dois percursos: um direto e outro após sofrer reflexão no solo.

Figura 13 – Modelo plano-terra



Fonte: Haykin e Moher (2008).

No modelo plano-terra, o nível de potência da antena do receptor decresce em função da quarta potência da distância do transmissor. Em outros modelos que também usufrui da reflexão é esperado um decaimento em relação da distância com leis de potências acima de dois. A Equação 2.13 é referente ao modelo plano-terra.

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{h_t h_r}{R^2} \right)^2 \quad (2.13)$$

em que G_T e G_R são os ganhos das antenas transmissora e receptora respectivamente.

Em modelos físicos, fatores como topografia do terreno, construções, curvatura da terra, entre outros são sempre levados em consideração e fazem de um modelo simples, como o plano-terra, resultarem em um estudo complexo. A medida que há mais reflexão ou difração, mais complexos são os cálculos.

Como alternativa de simplificação os modelos estatísticos fazem aproximações empíricas de análises em ambientes genéricos, como urbano, suburbano e rural. Uma dessas abordagens é: *perda de percurso médio*.

Perda de percurso médio

Na abordagem de perda de percurso médio, um sinal transmitido toma diversos percursos até chegar no receptor, afirma Haykin e Moher (2008), e o sinal recebido é a soma de todos os sinais vindos por diversos percursos captado pelo receptor.

Haykin e Moher (2008) explicam que na Equação 2.14 é determinado o campo elétrico total, em que E representa a intensidade total do campo elétrico recebido, E_d representa o campo elétrico recebido diretamente do transmissor e N a quantidade de caminhos diferentes percorrido pelo sinal entre o transmissor e receptor.

$$E = E_d \sum_{k=1}^N L_k e^{j\phi_k} \quad (2.14)$$

sendo L_k e ϕ_k referentes as perdas relativas dos vários percursos e das mudanças de fase, respectivamente.

Segundo Haykin e Moher (2008), após vários anos de estudo das medidas nos mais diversos meios do campo elétrico em função da distância entre transmissor e receptor, um modelo geral de propagação, chamado perda de percurso médio, foi criado e expresso na equação 2.15.

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{\beta}{r^n} \quad (2.15)$$

em que n é o *expoente do percurso médio* e depende do meio de propagação, cujos valores estão na Tabela 2. β representa as perdas relacionadas à frequência, altura da antena, dentre outros.

Tabela 2 – Exemplo de expoentes e seus meios.

Meio	n
Espaço livre	2
Rural (plano)	3
Rural (montanhoso)	3,5
Suburbano(plano)	4
Urbano denso	4,5

Fonte: Haykin; Moher (2008).

A Equação 2.15 em sua forma logarítmica está representada na Equação 2.16:

$$L_p = \beta_0(dB) - 10n \log_{10}\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (2.16)$$

cujo valor β_0 é a perda do percurso medida em relação a uma distância de referência, geralmente de 1 metro.

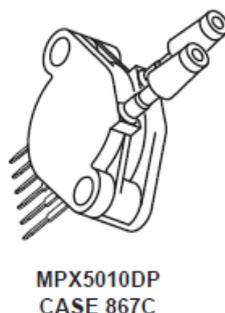
A curva característica da Equação 2.16 para os valores de n em ambientes genéricos da tabela 2 se encontra no Apêndice A.

Com a Equação 2.16 é possível ter uma estimativa do comportamento do sinal ao longo da distância sem a necessidade de especificar detalhadamente o meio a ser analisado, tornando-se útil para um dos cenários avaliados neste trabalho.

2.5 Sensor MPX5010

O sensor utilizado para o projeto é o sensor por pressão diferencial MPX5010 da *Freescale Semiconductor Inc.* Diversos são os encapsulamentos para esse sensor que são apresentados no manual do fabricante, sendo Figura 14 a representação do sensor utilizado neste trabalho.

Figura 14 – Sensor MPX5010



Fonte: *Freescale Semiconductor Inc* (2002).

A sua tensão de alimentação é de 5 volts (V), a tensão de saída varia de 0,2 a 4,7 V para uma variação de pressão entre 0 a 10 quilopascal (kPa). A pressão pode ser causada tanto por ar quanto por água.

Segundo o manual, ele possui 6 pinos dos quais apenas 3 são usados. O pino 1 possui um chanfro para identificação do pino e é a saída do sensor, o pino 2 é o terra (GND) e o 3 é a alimentação. Os outros pinos correspondem a ligações internas do dispositivo e não são usados.

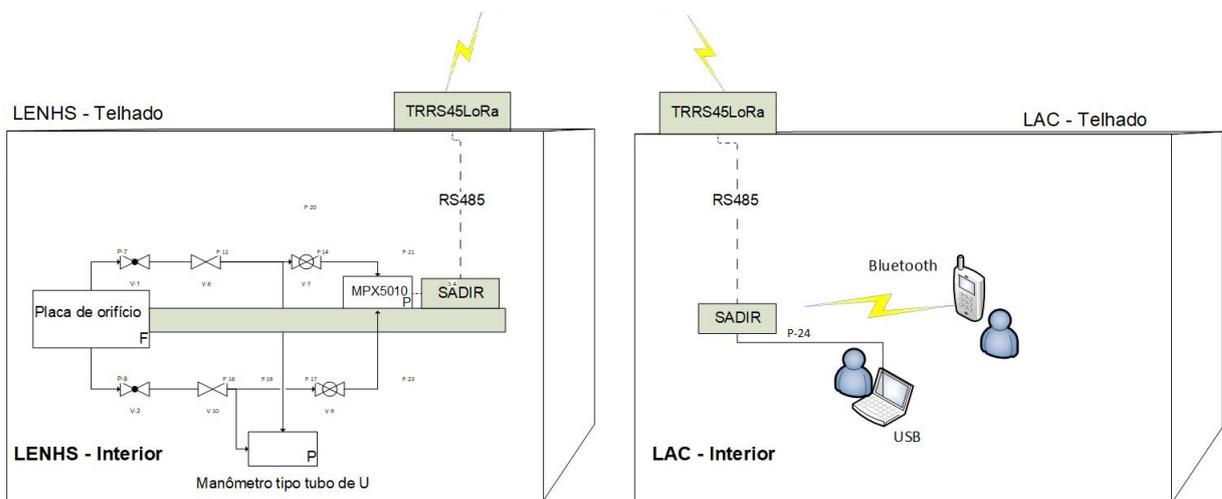
O motivo do uso deste sensor foi devido à sua disponibilidade de uso na UFPB e também pela sua faixa de operação (0 a 10 kPa), que é próxima aos valores da saída do sensor de vazão por pressão diferencial.

3 Descrição do Projeto

O projeto desenvolvido tem como objetivo a instrumentalização de um medidor de fluxo presente no LENHS. Essa instrumentalização se deu com a criação de um sistema nomeado de Sistema de Aquisição de Dados e Interface de Rede (SADIR) capaz de fazer a leitura de um sensor e transmiti-la através de estruturas cabeadas e sem fio.

O sistema proposto visa analisar o comportamento da planta hidráulica internamente ou externamente ao laboratório. Desta forma, optou-se por uma estrutura com redes híbridas ilustrada na Figura 15.

Figura 15 – Rede LENHS - LAC.



Fonte: Própria do autor (2018).

A pressão oriunda do sensor de fluxo é medida pelo sensor MPX5010 que gera um sinal que será obtido pelo sistema desenvolvido (SADIR). Para transmitir o sinal até um ponto remoto utilizou-se um dispositivo LoRa. Com objetivo de minimizar a presença de obstáculos, optou-se por colocar um ponto de transmissão no telhado do LENHS.

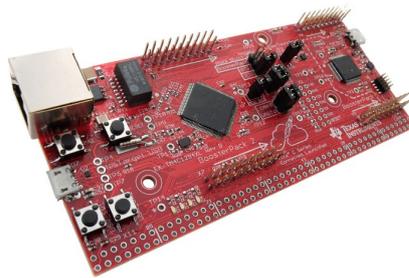
Desta forma, utilizou-se uma rede RS485 que conecta o SADIR até o transceptor RS485-LoRa presente no telhado (TRRS485LoRa) por ser a rede cabeada de maior alcance entre as redes cabeadas do projeto.

Assim, o sinal é captado no telhado do laboratório de automação e controle (LAC) através de outro módulo TRRS485LoRa. No LAC existe um outro SADIR conectado ao TRRS485 que recebe o sinal e interliga a um PC via USB ou RS232, a uma rede CAN, ou outro dispositivo com interface Bluetooth. O custo associado a essa montagem está no Apêndice C.

3.1 Hardware

Uma das propostas do SADIR, dito anteriormente, é permitir uma comunicação híbrida entre dispositivos, ou seja, comunicação tanto por cabos como sem fio. Ao todo são cinco tipos que fazem parte da estrutura: RS232, RS485 e CAN¹, como cabeadas e *Bluetooth* e LoRa, como sem fio. Esse módulo foi construído para estar acoplado ao LaunchPad Tiva TM4C1294, da Texas Instruments (Figura 16).

Figura 16 – LaunchPad Tiva TM4C1294.



Fonte: Texas Instruments (2018).

A Tiva foi usada primeiramente devido à sua disponibilidade na UFPB. Além disto, o microcontrolador TM4C1294ncpdt, presente no LaunchPad, possui várias características que o tornam atrativos para construção do sistemas proposto, dentre as quais pode-se citar: processador ARM cortex M4 de 120MHz, 2 controladores CAN embarcados, dois módulos AD (analogico-digital) com 20 canais e taxa de amostragem de até 2 MSPS, oito *Universal Asynchronous Receiver/transceiver* (UART) e placa de rede ethernet integrada.

O hardware desenvolvido neste projeto pode ser representado pelo diagrama de blocos ilustrado na Figura 17.

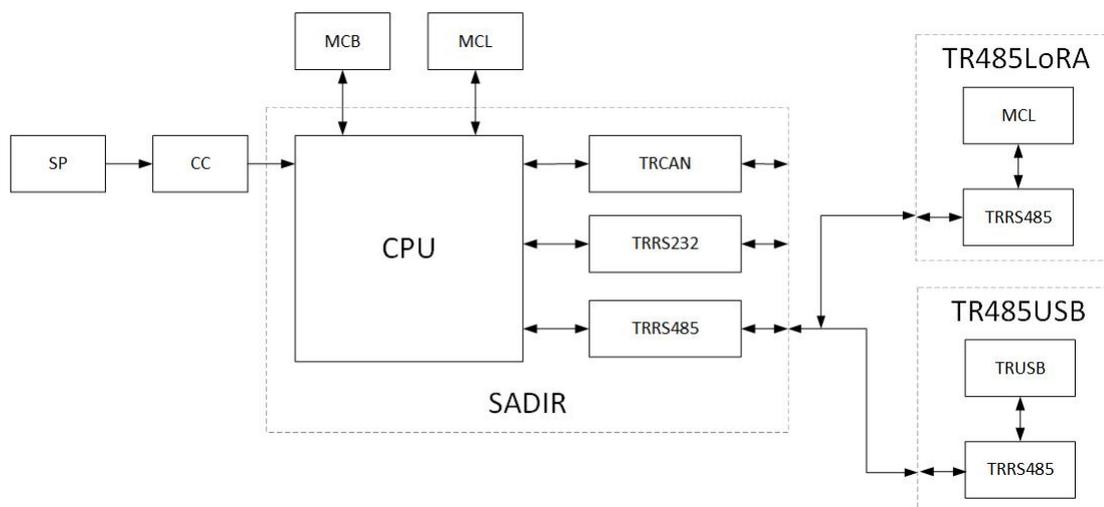
O sensor MPX5010 (bloco SP) faz a medição da pressão do sensor de fluxo por pressão diferencial. Ele está conectado ao circuito de condicionamento (bloco CC) e este se conecta ao SADIR.

No SADIR, a CPU corresponde ao LaunchPad Tiva e ele faz a aquisição do sinal do bloco CC. Além disso, a CPU é responsável por direcionar a informação aos módulos de comunicação fixos no SADIR. São eles: o transceptor CAN (TRCAN), ao transceptor RS232 (TRRS232) ou pelo transceptor da comunicação RS485 (TRRS485).

O TRRS485 pode ainda se conectar ao transceptor RS485-LoRa (TR485LoRa) ou a um computador por meio de um transceptor com conectividade USB (TR485USB).

¹ *Controller Area Network.*

Figura 17 – Diagrama de Blocos do Hardware.



Fonte: Própria do autor (2018).

O SADIR ainda pode enviar a aquisição do sensor aos módulos que não são fixados na placa: O módulo de comunicação *bluetooth* (MCB) e o módulo de comunicação LoRa (MCL).

Módulos cabeados

Para o transceptor RS232 (TRRS232) usado foi o driver Max232 com encapsulamento do tipo DIP, de 16 pinos, alimentação de 5 V e *full-duplex*², responsável por adequar os níveis de tensão entre a comunicação TTL³ da Tiva (0 a 3,3 V) e RS232 (-30 a +30 V).

A comunicação TTL do transceptor (pinos 11 e 12 da Figura 18) funcionam com 5 V, logo se faz necessário um divisor resistivo na saída (pino 12) para uma das entradas da Tiva. Na Figura 18 há capacitores em alguns pinos, sendo os valores e conexões fornecidas no manual do módulo.

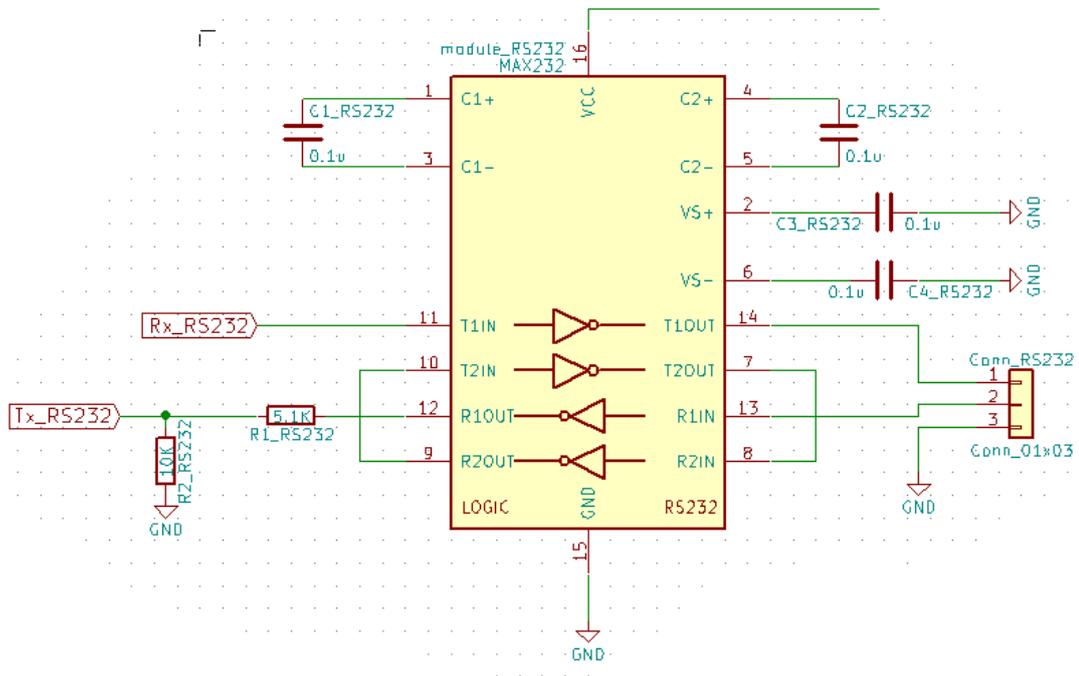
Há também um conector (Conn_RS232) ligado aos pinos 13 e 14 - responsáveis pela comunicação RS232. Como os pinos 7 e 8, 9 e 10 não foram usados, eles foram curto-circuitados conforme a indicação do manual do fabricante. O pino 16 é para a alimentação de 5 V.

O transceptor TRRS232 concede ao SADIR a possibilidade de conectá-lo a um dispositivo que possua conector RS232, como por exemplo um computador, e com isso monitorar a vazão do sensor de fluxo dentro do LENHS.

² Envia e recebe informação simultaneamente

³ Transistor-Transistor Logic

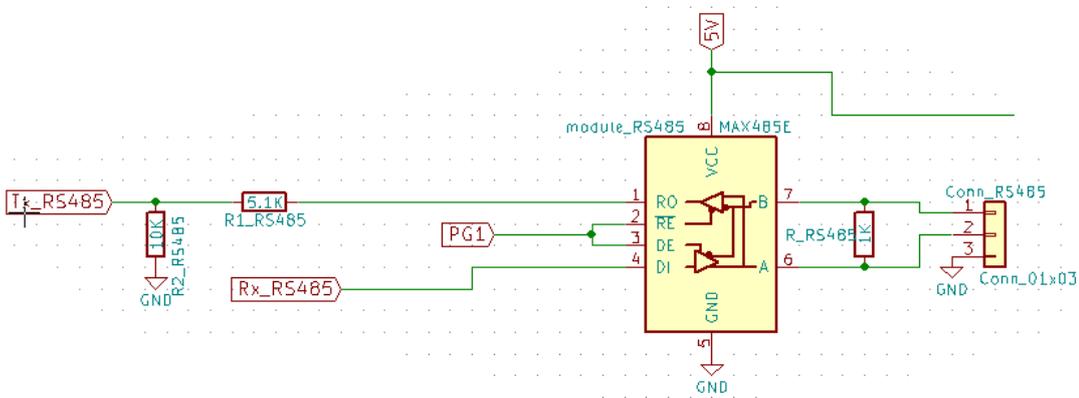
Figura 18 – Esquemático RS232.



Fonte: Própria do autor (2018).

O Max485 é um driver responsável por regular os níveis de tensão da Tiva para RS485. De acordo com o manual do fabricante, o driver é alimentado com 5 V, tem 8 pinos, encapsulamento do tipo DIP e comunicação *half-duplex*⁴. O esquemático do RS485 está na Figura 19.

Figura 19 – Esquemático RS485.



Fonte: Própria do autor (2018).

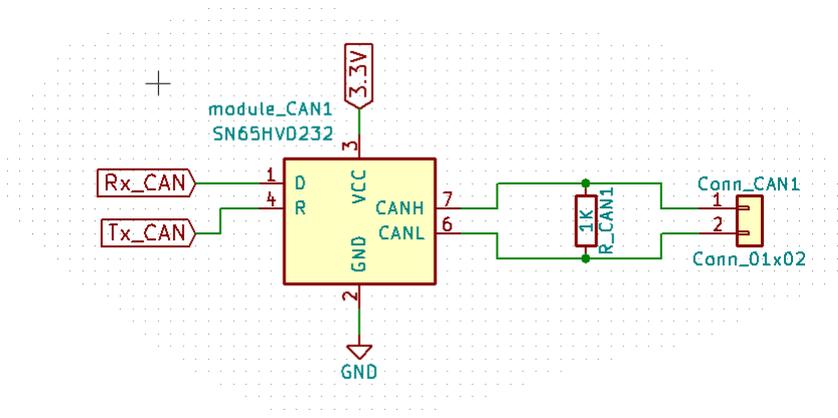
⁴ Envia e recebe informação em momentos diferentes.

Os pinos 1 e 4 são da comunicação TTL e assim como no RS232 é preciso usar um divisor resistivo na saída TTL (pino 1 da Figura 19) do MAX485, os pinos 2 e 3 estão curto-circuitados e conectados ao um pino digital da Tiva que determinará o modo de operação (transmissão/recepção). Segundo o fabricante, os pinos 6 e 7 são responsáveis pela comunicação RS485 e há entre eles um resistor de terminação que são ligados a um conector (Conn_RS485) que serve para ligar o SADIR ao transceptor TR485LoRa.

Além de conectar ao TR485LoRa, é possível também conectar ao SADIR, um transceptor RS485-USB a fim de ser utilizado por um computador para monitoramento da vazão ou então, a uma rede Modbus que usa como meio físico o padrão RS485, já instalada no LENHS, concedendo a possibilidade de conectar esta rede ao SADIR, isto é, o SADIR pode fazer a aquisição de dados da rede Modbus e enviá-los remotamente.

Para o CAN foi usado o transceptor SN65HVD23x. Ele recebe a informação por TTL (pinos 1 e 4 da Figura 20), que funciona com 3,3 V, e envia para os pinos CAN (pinos 6 e 7 da Figura 20) que junto a eles há um conector para interligar o SADIR a um barramento CAN, além de um resistor de terminação. O encapsulamento é do tipo SMD e é alimentado com 3,3 V.

Figura 20 – Esquemático CAN.



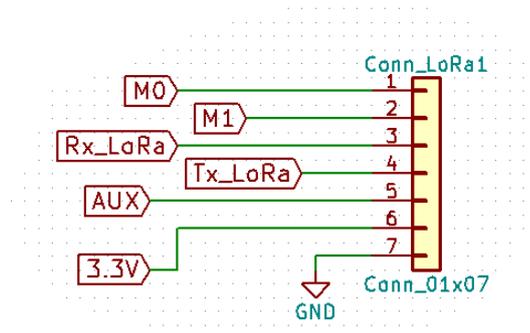
Fonte: Própria do autor (2018).

No LENHS existem sensores de 4-20 mA que podem ser interligados por meio da rede CAN, ou seja, é possível conectar o SADIR ao barramento CAN dessa rede de sensores a fim de monitorá-los.

Módulos sem fio

Um dos módulos sem fio é o LoRa E32-TTL-10, descrito na Seção 2.3.4. Na Figura 21 está ilustrada o conector (Conn_LoRa1) responsável pelo encaixe do módulo E32, cujos pinos estão ligados diretamente aos pinos digitais da Tiva.

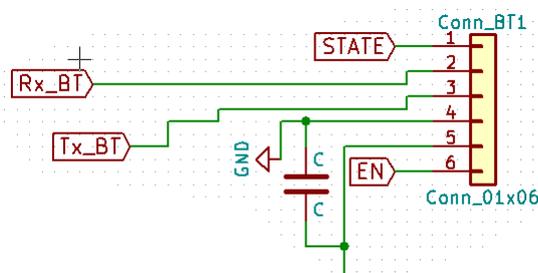
Figura 21 – Esquemático de pinos - LoRa.



Fonte: Própria do autor (2018).

Na Figura 22 é ilustrado o conector (Conn_BT1) referente ao módulo *bluetooth* usado que foi o módulo HC-05, com tensão de alimentação de 5 V. A comunicação é LV-TTL⁵, a mesma que o LaunchPad Tiva, assim, excluindo a necessidade de divisor resistivo.

Figura 22 – Esquemático de pinos - Bluetooth.



Fonte: Própria do autor (2018).

Este conector é responsável pelo encaixe do módulo, cujos pinos estão ligados diretamente aos da Tiva. O pino *STATE* indica o *status* da comunicação do módulo e o pino *EN* é utilizado para selecionar o modo de dados ou comandos AT. O pino 5 é o de alimentação. Além do mais há um capacitor entre os pinos 4 e 5 para eliminar ruído.

Circuito de condicionamento

O circuito de condicionamento completo pode ser visto no Apêndice C. Na Figura 23 está ilustrado a parte do amplificador de instrumentação.

O sensor de pressão utilizado MPX5010 mede pressões diferenciais de 0 até 10 kPa com saída de 0 a 5V. Como o conversor AD da Tiva 1294 tem faixa de entrada de 0 até

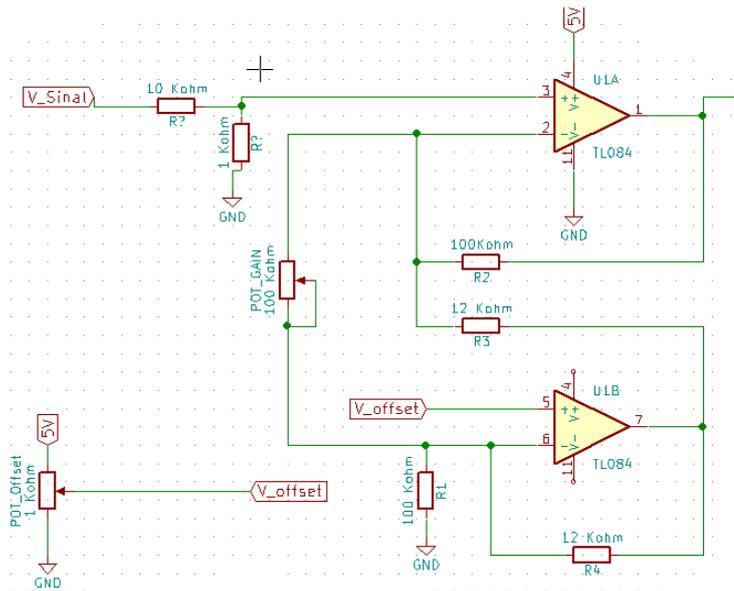
⁵ Low Voltage - Transistor Transistor Logic

3,3 V é preciso atenuar o sinal do MPX5010, para adequar à faixa de entrada do AD.

Além disto, o MPX5010 possui um *offset* de tensão em torno de 200 mV. Desta forma, na entrada do circuito de condicionamento utilizou-se um divisor resistivo para adequar a faixa do sensor para 3,3 V. O amplificador de instrumentação utilizado subtrai o valor de *offset* e possibilita o ajuste de ganho para regular o valor máximo da saída.

Nesse circuito, há dois potenciômetros: O POT_GAIN que regula o ganho do amplificador e o POT_Offset que ajusta o nível de *offset*.

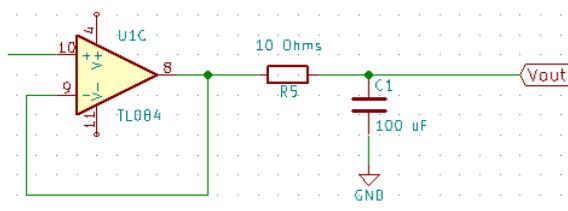
Figura 23 – Circuito de condicionamento - Amplificador de Instrumentação.



Fonte: Própria do autor (2018).

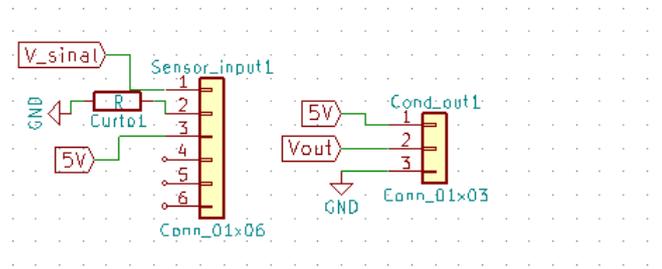
A saída do amplificador de instrumentação é conectada a um *buffer* e filtro passa-baixa (Figura 24), que minimiza o efeito do ruído. Além disso há o conector para encaixe do sensor (Sensor_input1) e outro para alimentação com saída para o SADIR (Cond_out1), ilustrado na Figura 25.

Figura 24 – Circuito de condicionamento - Filtro.



Fonte: Própria do autor (2018).

Figura 25 – Circuito de condicionamento - conectores.

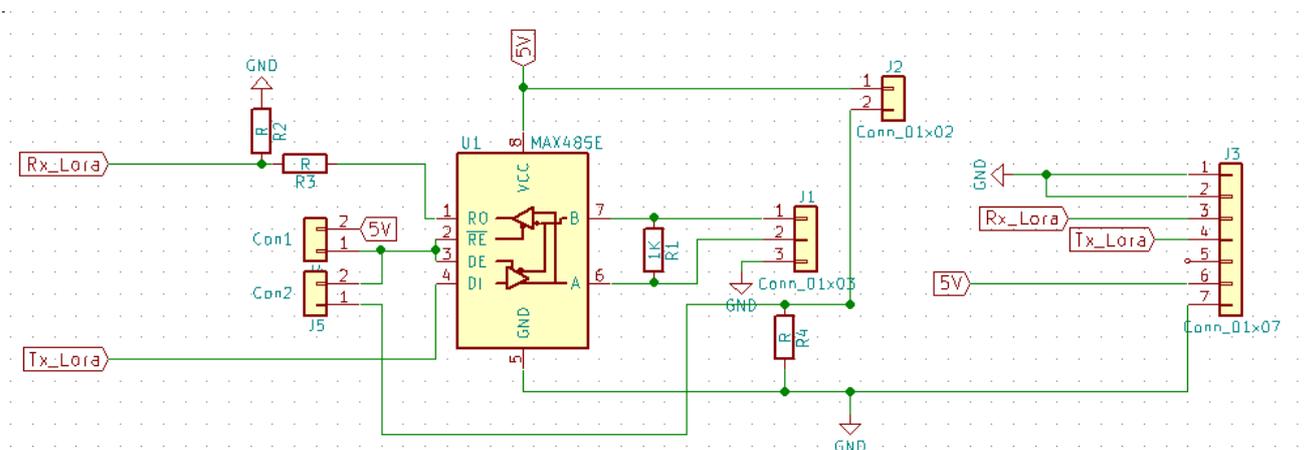


Fonte: Própria do autor (2018).

transceptor RS485-LoRa (TR485LoRa)

O transceptor RS485-LoRa (TR485LoRa) utilizado na estrutura da rede contém apenas dois tipos de comunicação: A RS485, que usa o driver MAX485 e a LoRa que utiliza o E32-TTL-100, cujo esquemático está na Figura 26.

Figura 26 – Hardware secundário - esquemático



Fonte: Própria do autor, 2018.

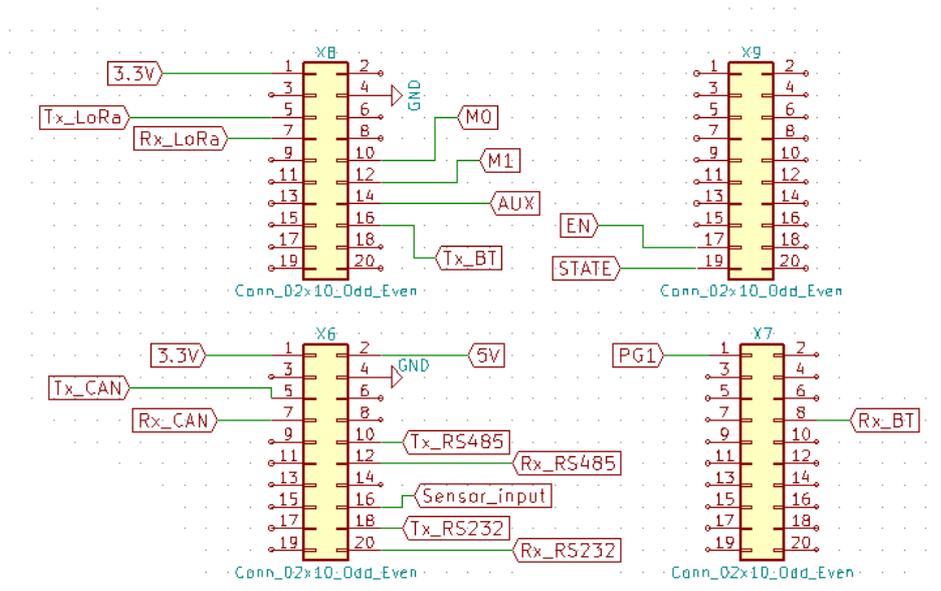
Assim como no SADIR, o TR485LoRa tem um divisor resistivo para 3,3 V no MAX485, pois é o nível de tensão usado pelo LoRa e um resistor de terminação. A placa funciona com 5 V também e não precisa estar conectado a Tiva.

Entretanto, por não estar conectado a um microcontrolador e devido a comunicação RS485 ser *half-duplex*, um par de pinos de seleção (Con1 e Con2) do modo de operação do RS485 foi adicionado, sendo assim, o transceptor RS485-LoRa transmite ou recebe dados.

Partes adicionais

Na Figura 27 é visto a pinagem do SADIR que faz referência a pinagem da comunicação TTL de todos os módulos cabeados e sem fio, entre outros parâmetros que serão conectados aos pinos da Tiva. Os nomes X6, X7, X8 e X9 estão relacionados aos nomes dos conectores do próprio LaunchPad.

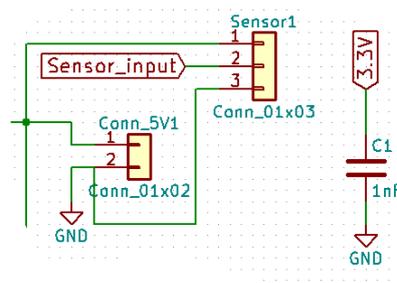
Figura 27 – Pinagem do SADIR



Fonte: Própria do autor, 2018.

Além da comunicação, a alimentação do sistema desenvolvido é de 5 V e possui um conector por alimentação externa (Conn_5V1 - Figura 28). Há também um conector com entrada para o circuito de condicionamento do sensor utilizado (Sensor1 - Figura 28) no projeto além de um capacitor entre alimentação de 3.3 V e o GND para diminuir ruídos. O pino 1 é a entrada para alimentação de 5 V em ambos os conectores .

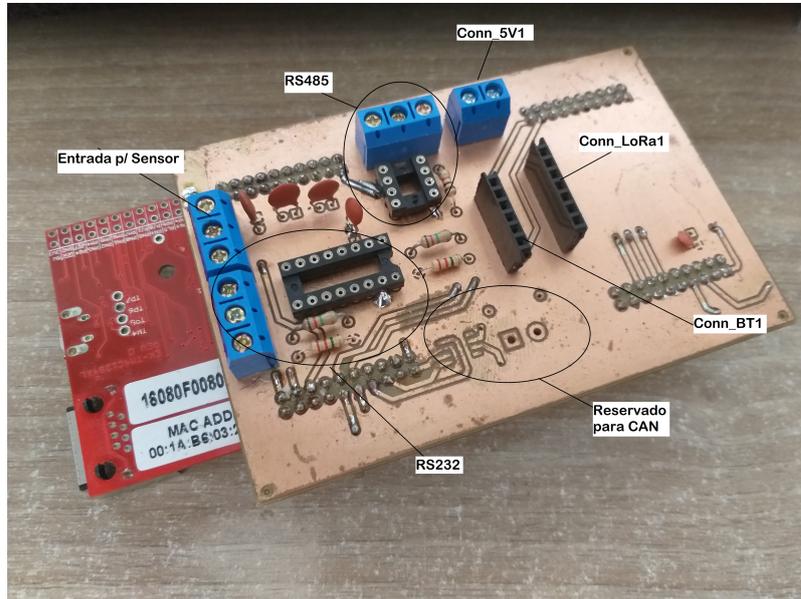
Figura 28 – Parte adicional do sistema - SADIR



Fonte: Própria do autor, 2018.

Nas Figuras 29 e 30 podem ser vistos as imagens do *hardware* SADIR e do RS485-LoRa.

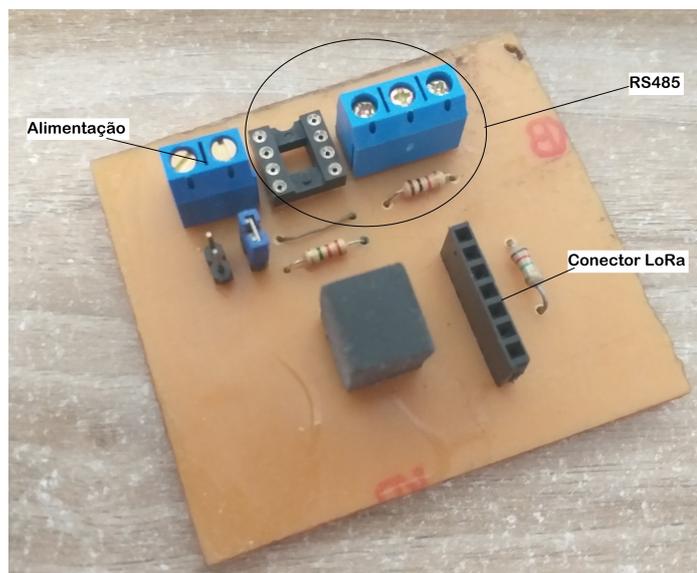
Figura 29 – Sistema de Aquisição e Interface de Rede - SADIR.



Fonte: Própria do autor, 2018.

Na estrutura física do SADIR vista na Figura 29, o transceptor CAN está ausente. Isso foi devido a indisponibilidade do transceptor durante a montagem, contudo há o espaço para sua futura instalação.

Figura 30 – Transceptor RS485-LoRa - TR485LoRa.



Fonte: Própria do autor (2018).

Topologia

A topologia do hardware construído pode ser vista no diagrama de rede da Figura 31. Com o hardware SADIR é possível montar uma rede RS485 que se comunica com um computador presente em uma sala dentro do LENHS que monitorará o sinal do sensor de vazão instalado.

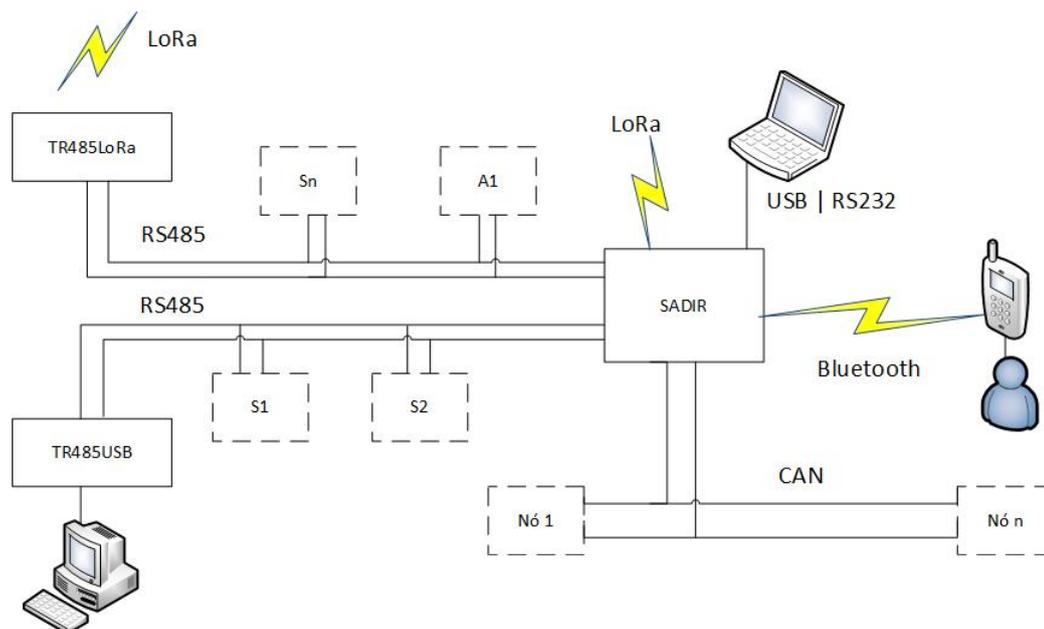
Ainda é possível adicionar outros nós (S1, S2, entre outros) a rede RS485 que liga o SADIR ao computador e estes novos nós podem fazer a aquisição no PC de sinais de outros sensores do LENHS. Em outros trechos do LENHS existem uma rede que utiliza modbus para comunicação, podendo ser incorporado ao sistema já que o modbus utiliza RS485 na camada física.

Além disso é possível criar uma rede de sensores e atuadores (Sn e A1) entre o SADIR e o transceptor TR485LoRa e conectar mais nós. Dessa forma, os nós podem enviar dados a locais remotos pelo transceptor.

Também é possível fazer monitoramento com um PC por meio da comunicação USB, RS232, ou em lugares mais distantes com o LoRa. É possível também visualizar a informação via *bluetooth* por meio de um tablet ou *smartphone* sem a necessidade de um computador.

No LENHS, há uma rede de sensores que funcionam de 4 a 20 mA. Um trabalho futuro é, a partir da comunicação CAN, criar uma rede e acoplar os sensores de 4-20 mA ao barramento CAN.

Figura 31 – Topologia do hardware.



Fonte: Própria do autor (2018).

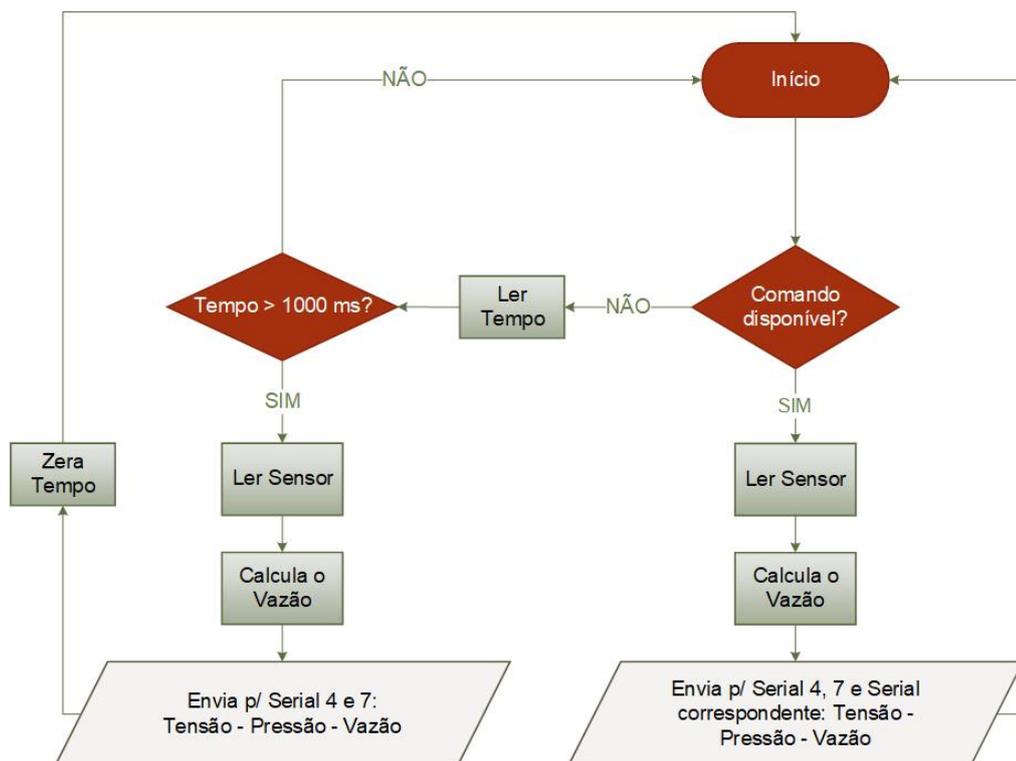
3.2 Software

No que se refere à *software* foram implementados interfaces em duas plataformas distintas. Para permitir a visualização dos dados através do PC, desenvolveu-se uma interface de monitoramento através do Labview. Com objetivo de visualizar os dados recebidos através da comunicação *bluetooth* em um smartphone, foi utilizado o aplicativo Bluetooth Electronics.

Por meio da IDE⁶ Energia⁷ foram feitas duas versões de *firmwares*, uma para cada módulo dentro dos laboratórios.

No do LENHS, o módulo aguarda sempre um comando vindo ou de computadores ligados a rede RS485 por um transceptor TRRS485USB, via RS232 ou USB como também de *smartphones* ou tablets conectado ao *bluetooth*. No fluxograma da Figura 32 é visto um resumo do processo do módulo do LENHS. A serial 7 contida nos fluxogramas 32 e 33 correspondem a serial do LoRa.

Figura 32 – Fluxograma LENHS.



Fonte: Própria do autor (2018).

Se o comando for recebido, o sensor será lido, dada em volts, que será convertido para pressão e calcula-se o valor do fluxo. Por fim, o dado será transmitido para a serial

⁶ *Interface Development Environment*

⁷ Plataforma de desenvolvimento para placas da Tiva

associada, para serial RS485, caso esteja conectado ao transceptor TR485LoRa e via LoRa, caso haja um MCL conectado ao SADIR.

Por exemplo: **BA19V** é um comando ligado ao *bluetooth*. Recebendo esse comando de qualquer serial acontecerá a aquisição do sensor e esta informação será transmitida via *bluetooth*, RS485 e LoRa. Na Tabela 3 pode ser visto comandos associados as respectivas seriais. A explicação do nome do comando é a seguinte: os primeiros caracteres correspondem as iniciais da comunicação e o termo "A19V" se refere ao valor do pino analógico 19 do LaunchPad.

Tabela 3 – Comandos associados as comunicações.

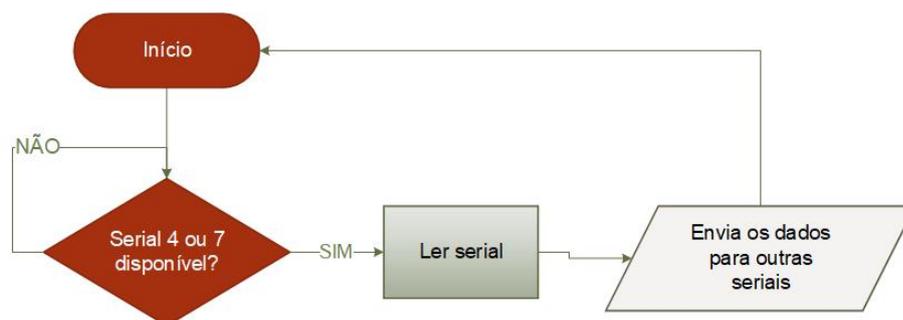
Comunicação	Comando	Serial
Bluetooth	BA19V	Serial 2
CAN	CA19V	Serial 6
RS232	RS232A19V	Serial 3
RS485	RS485A19V	Serial4

Fonte: Própria do autor, 2018.

Se não for recebido comando algum, o SADIR lê uma variável responsável pelo tempo decorrido no processo. Caso este tempo seja maior que 1 segundo, o SADIR faz a aquisição do sensor para então calcular a vazão e enviar o dado via RS485 e LoRa. Ao final, a variável é zerada e conta novamente o tempo decorrido. Ou seja, caso não seja recebido comandos, o SADIR envia automaticamente a cada segundo informações remotamente.

No LAC a versão é mais simples e está representada no fluxograma da Figura 33. De modo geral, o módulo do LAC aguarda a informação chegar pelo transceptor TR485LoRavia via RS485, que é proposta do projeto, ou diretamente via LoRa, caso este esteja conectado ao SADIR, para então repassar a informação para as seriais restantes.

Figura 33 – Fluxograma LAC

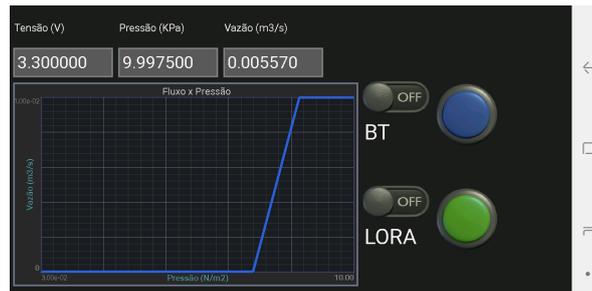


Fonte: Própria do autor, 2018.

A partir da informação recebida é possível monitorar o comportamento da planta analisando a vazão em função do tempo no aplicativo Bluetooth Eletronics e no LabVIEW.

A interface criada com o aplicativo se encontra na Figura 34 e pode ser utilizada tanto no ambiente do LENHS como no LAC, aonde é possível ver os parâmetros de tensão, pressão e vazão e além da curva vazão em função da pressão.

Figura 34 – Interface do bluetooth

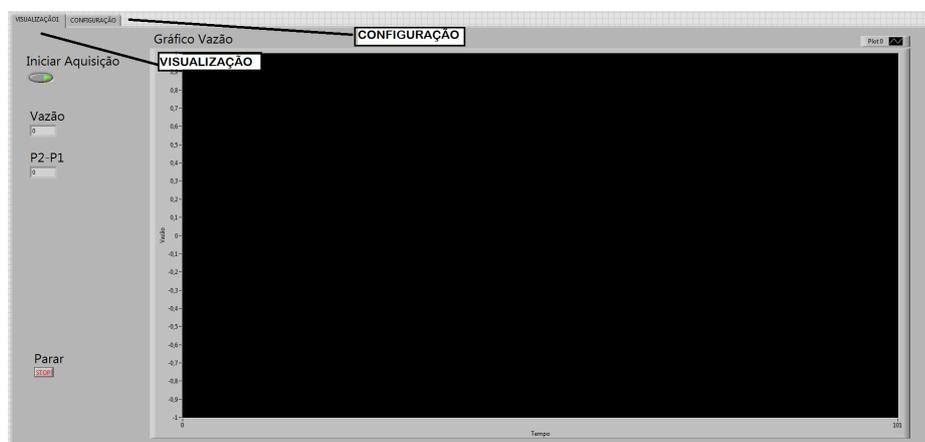


Fonte: Própria do autor, 2018.

Os botões são utilizados apenas no LENHS para a requisição de dados no celular (contínuo para o *on-off* e requisição única para o azul) ou para enviar os dados ao LAC via LoRa (contínuo para o *on-off* e requisição única para o verde). No LAC os valores são atualizados automaticamente, sem necessidade de requisição.

A interface desenvolvida para o computador está na Figura 35 e nela há duas abas: A primeira com a janela principal ilustrada na Figura 35, que contém um gráfico da vazão em função do tempo e indicadores do valor de vazão e pressão. A segunda aba contém opções para a configuração da comunicação serial.

Figura 35 – Interface do LabVIEW



Fonte: Própria do autor, 2018.

Em resumo, o *hardware* agrega uma junção de diferentes tipos de comunicação, tanto cabeada quanto sem fio e, aplicado a um medidor de fluxo, abre a possibilidade de fazer um monitoramento de diversas maneiras em momentos e locais diferentes. O *software*, de forma simplificada, controla o fluxo de informação entre as comunicações.

4 Resultados experimentais

Neste projeto foram analisados dois pontos: na primeira foram analisados a transmissão de dados do módulo LoRa, avaliando alcance de transmissão, perda de pacotes e potência do sinal recebido. A segunda análise foi em relação a instrumentalização de um planta, que é a base deste trabalho.

4.1 Análise de transmissão

Para auxiliar a análise foram implementados códigos de transmissão e recepção e escolhidos alguns cenários, em ambiente aberto livre de obstáculos e fechado com obstáculos, para aplicação, onde cada cenário tem sua própria metodologia, cuja explicação se dará nesta seção.

4.1.1 Metodologia

Como dito anteriormente, cada cenário teve sua própria metodologia, em que cada uma foram aplicados testes que auxiliaram na avaliação do comportamento da comunicação em seu respectivo cenário. Os resultados da aplicação desses testes em seus respectivos cenários está na Seção 4.1.2.

4.1.1.1 Teste 1 - Integridade da transmissão

O teste 1 é responsável por analisar a integridade do sinal em função do distanciamento dos módulos LoRa.

Figura 36 – Fluxograma do teste 1 - Transmissor



Fonte: Própria do autor, 2018.

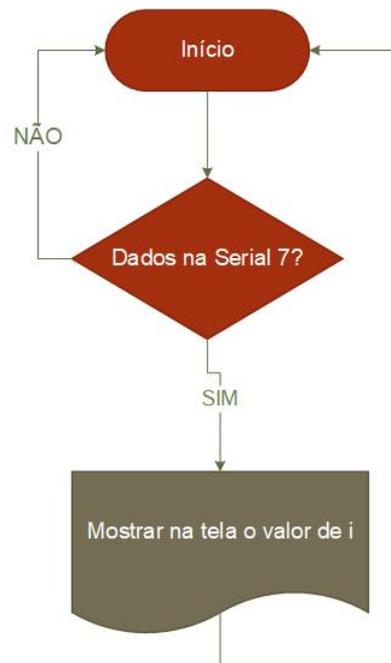
Nas Figuras 36 e 37 estão os fluxograma dos códigos utilizados para transmissão e recepção, respectivamente, que avaliam esta integridade.

A informação é enviada pelo transmissor continuamente ao receptor. Entretanto, haverá uma distância entre os módulos em que os dados não chegarão de forma contínua ao receptor, havendo então um comprometimento da integridade do canal de comunicação.

O Transmissor envia pela serial um valor incrementável i que será transmitido via LoRa, enviado a cada 1 segundo, como pode ser observado na Figura 36.

Já o receptor aguarda algum dado chegar no módulo LoRa e, em havendo dados, estes serão impressos na tela do computador ou outro dispositivo de monitoramento, conforme a Figura 37.

Figura 37 – Fluxograma do teste 1 - Receptor



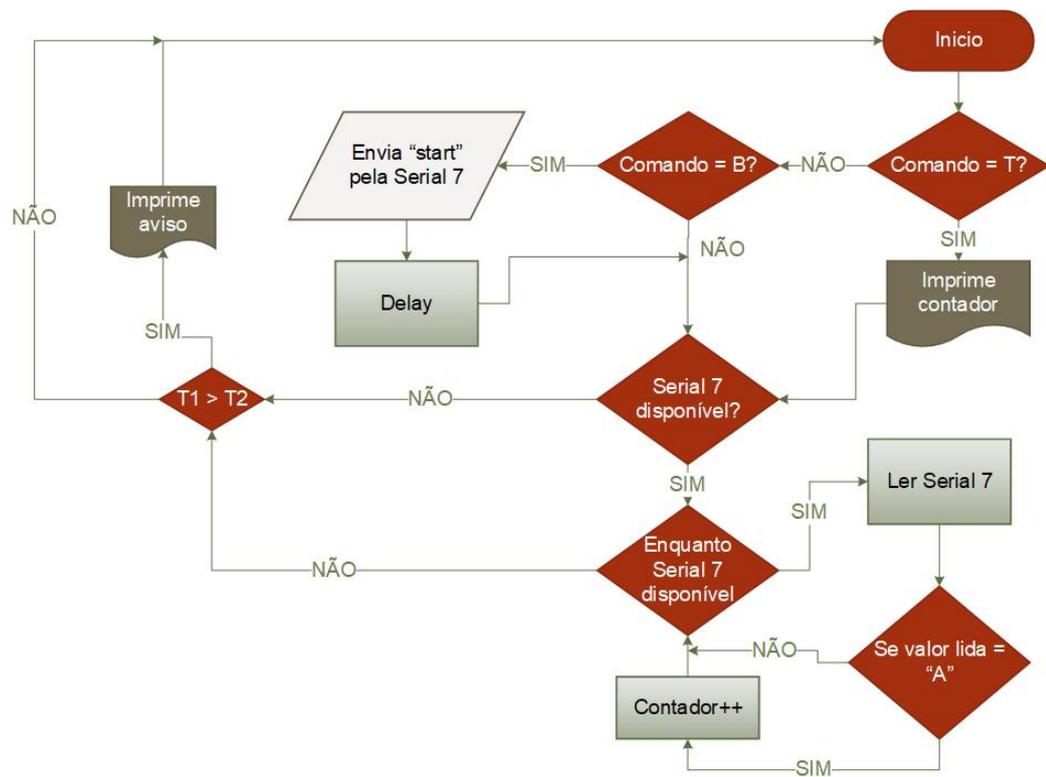
Fonte: Própria do autor, 2018.

4.1.1.2 Teste 2 - Perda de pacotes

O teste 2 é responsável por avaliar a perda de pacotes. Um pacote de dados é formado pelo transmissor e enviado ao receptor para avaliar em que momentos acontecerão as perdas, parcial ou total, da informação transmitida.

O fluxo da informação começa pelo receptor (Figura 38). Primeiramente ele aguarda um comando do dispositivo conectado a ele (PC, celular ou tablet). São dois os tipos de comando: Um para imprimir o valor de uma variável (**contador**) na tela do dispositivo, e o outro para requisitar o pacote de dados do transmissor.

Figura 38 – Fluxograma do teste 2 - Receptor



Fonte: Própria do autor (2018).

Quando o dispositivo enviar o comando de requisição, o receptor enviará um comando (**start**) via LoRa para o transmissor e, após esse envio, o receptor aguarda o pacote de dados vindos do transmissor.

Em havendo dados, será feita a leitura da serial LoRa e este dado será comparado ao caracter **A**. Caso afirmativo, um contador será incrementado, ou seja, o contador contém o valor de quantos caracteres **A** foram recebidos.

Quando não houver mais dados na serial, após certo tempo - grande o suficiente para a transmissão estar finalizada, um aviso será impresso, alertando o fim da transmissão na tela do dispositivo que monitora o receptor.

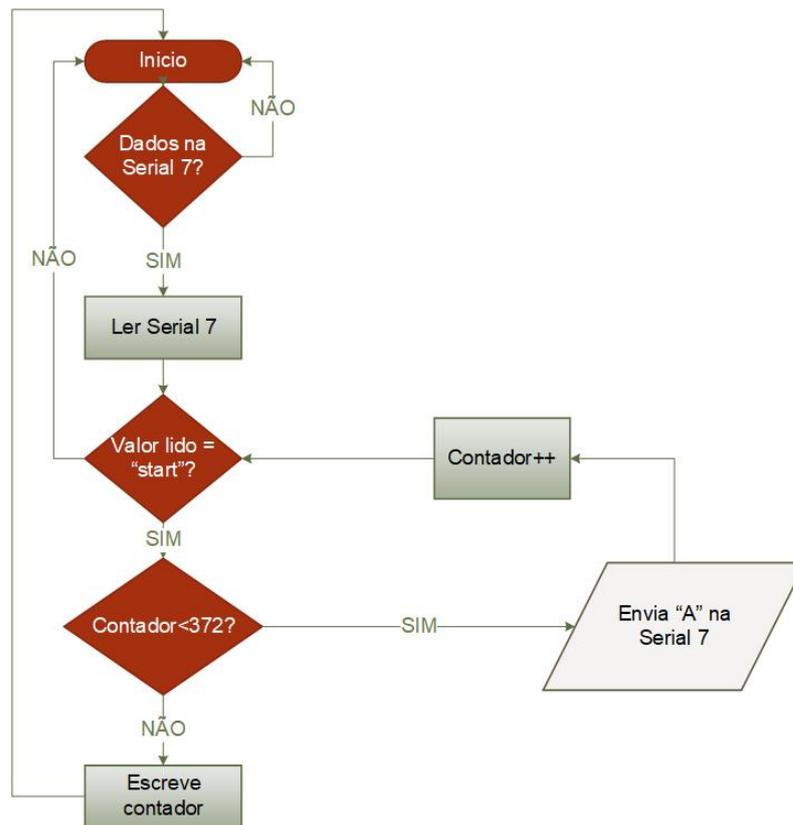
No transmissor é esperado um comando vir do receptor para inicializar a transmissão do pacote. Caso afirmativo, ele lê a informação obtida e compara com a palavra de requisição. Se a palavra for "start" será escrito na serial 7 (serial do módulo LoRa) o caracter **A** e um contador será incrementado. Caso este contador seja maior que 372 o envio de dados é finalizado.

Como descrito no Capítulo 2 na Seção (2.3.4), o módulo E32 tem uma memória de 512 *bytes* ou 4096 *bits*. Cada caracter "A" tem 8 *bits*. No protocolo da comunicação serial junto ao dado serão acrescentados os *bits* de início (*start*), paridade e de parada (*stop*),

ou seja, a informação abrange um total de 11 *bits*.

Enviando essa informação 372 vezes pela serial, forma-se um pacote de dados, na memória do módulo, com 4092 bits ou aproximadamente 511 *bytes*. Isso justica o valor escolhido de 372.

Figura 39 – Fluxograma do teste 2 - Transmissor



Fonte: Própria do autor (2018).

Finalizado o envio, o transmissor aguarda novamente a próxima requisição do receptor.

4.1.1.3 Teste 3 - Potência do sinal recebido

O terceiro teste é referente a análise da potência do sinal recebido. Sendo assim foi necessário um instrumento capaz de captar o sinal de transmissão e fornecer valores de potência de sinal.

Para isso foi utilizado o analisador de espectro N9340B, da fabricante *Keysight Technologies* (Figura 40) para captar a potência de sinal.

Este analisador estava ao lado do E32 receptor que, durante a comunicação entre transmissor e receptor, informa a potência do sinal recebido. O código usado para mediar a comunicação entre os módulos é o mesmo do fluxograma da Seção 4.1.1.1.

Figura 40 – Analisador de Espectro N9340B



Fonte: Keysight Technologies, 2018.

4.1.1.4 Cenário 1 - LAC/LENHS

No primeiro cenário foi avaliado o comportamento da transmissão do sinal, para avaliar a integridade da informação entre os pontos onde seriam instalados os módulo LoRa. Sendo assim foi usado o teste 1 (Seção 4.1.1.1) para auxiliar na avaliação do cenário.

Tabela 4 – Parâmetros do E32-TTL-100

Parâmetros	•
BaudRate	9600
Taxa de Transmissão no ar	300 bit/s
Modo de Transmissão	Normal
Tipo de Transmissão	Transparente
Potência de Transmissão	20 dBm
Paridade	8N1
FEC	On
Ganho da Antena	2,5 dBi
Tipo de Antena	Omnidirecional

Fonte: Própria do autor, 2018.

Neste cenário, os módulos E32 estavam conectados a Tiva por meio de *protoboards*, já que o SADIR ainda estava na fase de implementação. A configuração, para ambos os módulos E32, estão disponibilizados na Tabela 4.

O transmissor foi mantido fixo no LAC e o receptor levado inicialmente até o LENHS e em seguida para a sala do PET. O objetivo deste cenário era determinar se a informação seria recebida com qualidade em uma transmissão com presença de obstáculos e sem visada direta.

Para saber a distância entre os laboratórios com maior precisão foi utilizado o GPS etrex 10, da Garmin (Figura 41). O GPS determina a posição geográfica latitudinal e

longitudinal com erro de aproximadamente 3,6 metros, segundo informa o manual.

Figura 41 – GPS Etrex 10



Fonte: Garmin (2018).

Por meio da Equação 4.1 e 4.2 de Harvesine (INGOLE, P .V; NICHAT, M. K.) é determinado a distância entre dois pontos com os parâmetros de latitude e longitude. Como não é objetivo do trabalho a dedução da fórmula, então ela foi exibida em sua forma final.

$$H = \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{LTO - LTD}{2} \right) + \cos(LTO) \cos(LTD) \sin^2 \left(\frac{LGO - LGD}{2} \right)} \right) \quad (4.1)$$

$$D = 2rH \quad (4.2)$$

em que LTO, LTD, LGO, LGD, r e D são as latitudes de origem, de destino, longitude de origem, destino, em radiano e raio da terra (em quilômetros) e distância entre os pontos respectivamente.

4.1.1.5 Cenário 2 - Rua de maior comprimento da UFPB

O segundo cenário avaliado também foi dentro da UFPB em ambiente aberto e com obstáculos, em uma rua reta com o maior comprimento possível que permitisse o máximo de visada direta entre os módulos.

O objetivo deste cenário é analisar o comportamento da transmissão do sinal mediante a diversos obstáculos, para avaliar a distância máxima e também a perda de pacotes em função da distância e sobre influência de obstáculos.

Para avaliar o cenário foram utilizados os testes 1 e 2 (Seções 4.1.1.1 e 4.1.1.2, respectivamente) e os módulos E32 foram configurados com os parâmetros da Tabela 4, como também o GPS Etrex 10 para marcar as distâncias.

Além disso os módulos LoRa estavam conectados ao SADIR, sendo o transmissor ligado e alimentado por um computador enquanto o receptor estava alimentado por uma

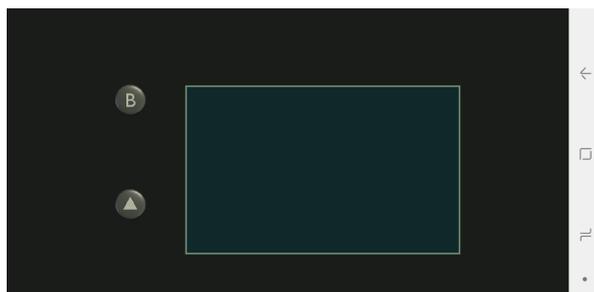
bateria externa. O monitoramento dos dados no receptor foi por meio de um *smartphone* através da comunicação *bluetooth*.

Com o aplicativo *Bluetooth Electronics* foi possível criar a interface ilustrada na Figura 42 que auxiliou o monitoramento do receptor.

Com o teste 1 é possível analisar a integridade da informação entre os módulos para avaliar distância máxima oferecida pelos LoRa. Para isto, fixou-se o módulo transmissor que transmitia um valor incrementável a cada segundo, no começo da rua escolhida. Já o módulo receptor foi sendo descolado e, simultaneamente, recebia os valores incrementados pelo transmissor que eram exibidos no tela do celular.

Com o teste 2 foi possível analisar a perda de pacotes em função da distância. Na interface da Figura 42 possui dois botões. O botão "B" é o botão de requisição de dados e o "Δ" (triângulo) é o botão que exhibe o valor do contador, mencionado na seção 4.1.1.2 do teste 2.

Figura 42 – Interface do bluetooth para o cenário 2



Fonte: Própria do autor, 2018.

No teste 2, dentro deste cenário, o transmissor estava fixo. Já o receptor foi sendo deslocado de 100 em 100 metros, sendo que a cada 100 metros deslocados o botão "B" era pressionado, ou seja, ocorria a requisição do pacote de 372 caracteres "A". Enquanto isso, esperava-se o aviso de término aparecer na tela para então pressionar o botão "Δ" e ver o valor de caracteres recebidos.

O deslocamento em ambos os testes buscou manter a linha de visada a mais direta e reta possível e aconteceu até o limite máximo da rua.

4.1.1.6 Cenário 3 - Aeroclube

Por fim, o terceiro cenário aconteceu fora da universidade na cidade de João Pessoa, localizado no Aeroclube da Paraíba - local com pista de pouso para aviões de pequeno porte - um ambiente de campo aberto, plano, livre de obstáculos, construções ou árvores.

O objetivo deste cenário é avaliar a integridade da informação para distância

Finalizado o armazenamento, foi contada a quantidade de caracteres presente no vetor a cada requisição. Ao final da contagem, o valor contado era armazenado em outro vetor.

Ainda no teste 2, o transmissor estava sendo deslocado a cada 100 metros, onde a cada distância percorrida, havia uma nova requisição de dados. Contudo, próximo ao ponto **X** mencionado no teste 1, o passo entre medidas foi diminuído para avaliar melhor a perda de pacotes em torno deste ponto.

Figura 44 – Pontos Y e Z - teste 2, cenário 3



Fonte: Própria do autor (2018).

O novo passo foi de 50 em 50 metros até o ponto **X** ou seja, foi analisado a perda 100 metros (Ponto Y, Figura 44) e 50 metros (Ponto Z, Figura 44) antes do ponto **X**.

Do ponto **X** em diante o passo foi novamente diminuído, onde o transmissor foi deslocado de 10 em 10 metros até o fim da pista. Além disso, a cada 10 metros a requisição feita ao transmissor era feita por 5 vezes.

4.1.2 Resultados

4.1.2.1 Cenário 1

Os pontos da latitude longitude de cada prédio do cenário 1, obtidos com o GPS etrex 10, estão presentes na Figura 45. Usando essas coordenadas e aplicando-as na equação de Harvesine (Equação 4.1 e 4.2) foi obtida uma distância de 99,1 metros e 197 metros entre LAC-LENHS e LAC-PET, respectivamente.

Apesar das distâncias obtidas representarem 3,03% e 6,56%, respectivamente, do valor máximo oferecido pelo módulo E32, que segundo o manual de especificações é de 3 km, havia muitos obstáculos entre os módulos.

Além dos obstáculos existentes, vistos na Figura 45, a análise foi feita com os módulos LoRa dentro de cada um dos prédios, não havendo linha de visada. Mesmo assim, a qualidade da comunicação se manteve íntegra.

Um ponto a se destacar é que dentro do LENHS há uma parte subterrânea, onde módulo também foi levado. Mesmo assim não houve comprometimento da informação. Sendo assim, um dos objetivos deste projeto, que é transmitir os dados adquiridos de uma planta hidráulica do LENHS para o LAC via LoRA, foi alcançado.

Figura 45 – Latitude e Longitude LAC, LENHS e PET



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

Mediante ao fato de que a qualidade da transmissão manter-se intacta, mesmo com obstáculos e sem linha de visada direta, não se faz mais necessário a instalação dos transceptores TR485LoRa - descritos no capítulo 3 - no telhados do LAC e do LENHS.

O intuito deste transceptor era instalá-lo no telhado dos prédios e promover uma comunicação livre de obstáculos, com visada direta, pois havia uma chance da comunicação não ser efetiva com os módulos dentro do prédio, por causa da quantidade de obstáculos existentes.

Entretando, viu-se que a comunicação teve boa qualidade, excluindo assim a instalação dele nos telhados. Apesar de não ser mais necessário para a aplicação do projeto, o transceptor TR485LoRa pode ser útil em trabalhos futuros, em que sejam exigidas distâncias maiores, fazendo necessário uma visada direta e livre de obstáculos.

4.1.2.2 Cenário 2

O cenário 2 completo se encontra na Figura 46. Usando os pontos inicial e final, presentes na mesma figura, dá um percurso de 1116 metros. No teste 1 a integridade dos

dados foi comprometida em alguns trechos do caminho.

Figura 46 – Cenário 2



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

O primeiro momento foi na distância de 463 metros (Ponto "L" da Figura 47), onde o valor do contador (variável incontrolável do teste 1) não foi recebido algumas vezes. Este ponto é próximo a mata e ainda há uma linha de alta tensão que, possivelmente, causou interferência no receptor. A partir da marca de 500 metros (Ponto "M" da Figura 47) a transmissão voltou ao normal.

Figura 47 – Zoom - Linha de transmissão.



Fonte: adaptado de Google Imagens (2018).

Outro ponto de comprometimento da informação foi entre os pontos de 600 e 700 metros (Ponto "N" e Ponto "O" da Figura 48, respectivamente), em que a recepção falhou

novamente algumas vezes e pode ser devido ao desvio presente na pista, que aumenta o número de obstáculos da linha de visada entre transmissor e receptor. Ao fim da curva, a integridade da informação se estabilizou.

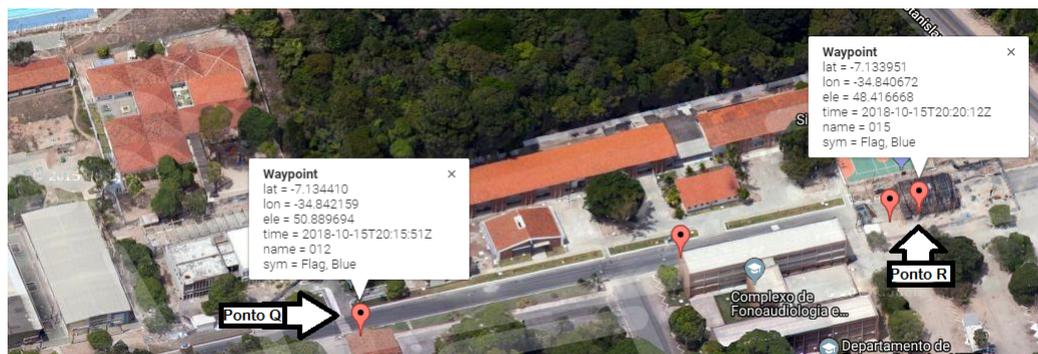
Figura 48 – Zoom - Trecho com desvio.



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

Logo após a marca de 900 metros (Ponto "Q" da Figura 49) a informação começa ser perdida com mais frequência até o fim do percurso. Porém mesmo no fim, sempre existiu valores do contador sendo recebido.

Figura 49 – Zoom - Trecho entre 900 a 1116 metros.



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

No teste 2, a perda de pacotes aconteceu em dois pontos. O primeiro foi na linha de transmissão (Ponto L da Figura 47), onde houve uma pequena perda na primeira requisição (apenas 317 caracteres chegaram), mas nas duas aquisições seguidas o pacote de dados foi recebido normalmente.

A outra perda de pacotes foi na marca de 1075 metros (Ponto "R" da Figura 49). A área deste ponto é coberta e em sua primeira aquisição houve perdas (apenas 254 caracteres chegaram). Entretanto nas duas seguintes o dado recebido foi completo.

4.1.2.3 Cenário 3

Os procedimentos do cenário 3 aconteceram em dois dias distintos. Os pontos do primeiro dia de experimentos no cenário 3 está na Figura 50 e nesse dia foram aplicados os testes 1 e 3 das Seções 4.1.1.1 e 4.1.1.3, respectivamente. Os pontos do segundo dia se encontra na Figura 56, sendo neste dia a aplicação do teste 2 (seção 4.1.1.2).

Figura 50 – Trajeto Aeroclube da Paraíba - teste 1 e 3.



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

Para o teste 1 da posição inicial até o ponto da perda de integridade (Ponto X da Figura 43) do dado foram aproximadamente 900 metros e é recapitulado na Figura 51.

Deste momento em diante o valor do contador recebido era descontínuo, ou seja, valores eram recebidos porém não a todo instante, cujas as ocorrências de valores não recebidos aumentadas a medida em que se aproximava ao fim da pista¹, na marca de aproximadamente 1015 metros.

¹ "Fim da pista" da Figura 50.

Figura 51 – Recapitulando o Ponto X - teste 1, cenário 3.



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

A queda na integridade da transmissão pode ter ocorrido devido a uma maior influência de reflexão do sinal da área urbana envolta do Ponto X e **Fim da pista**, como pode ser vista na Figura 52, ou pelo fato da potência de transmissão não ser suficiente para proporcionar comunicações dessa magnitude.

Figura 52 – Trecho entre Ponto X e Fim da pista.



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

Mesmo existindo comprometimento da integridade da transmissão houveram dados sendo recebidos, ou seja, espera-se que a distância máxima alcançada passa dos 1015

metros em campo aberto.

Do teste 3, partindo do ponto inicial até o último ponto adquirido pelo analisador (**Fim analisador**, Figura 53) foram aproximadamente 450 metros, pois o analisador não conseguia medir níveis de potência mais baixas que aquelas vistas na Figura 54.

Na Figura 53 é possível ver mais de perto os pontos e a partir dos valores de potência medidos foi possível plotar a curva experimental, presente na Figura 54.

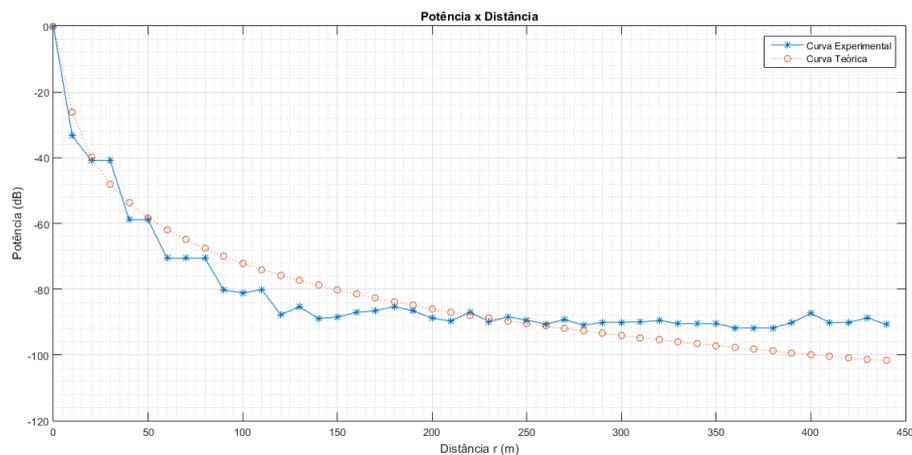
Figura 53 – Trecho do teste com o analisador



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

Usando a Equação 2.16 com os parâmetros $n = 2$, valor de espaço livre e $\beta_0 = 20$ dB, que foi o valor da potência recebida para a distância em torno de 1 metro plotou-se uma curva teórica, que está na Figura 54.

Figura 54 – Potência em função da distância

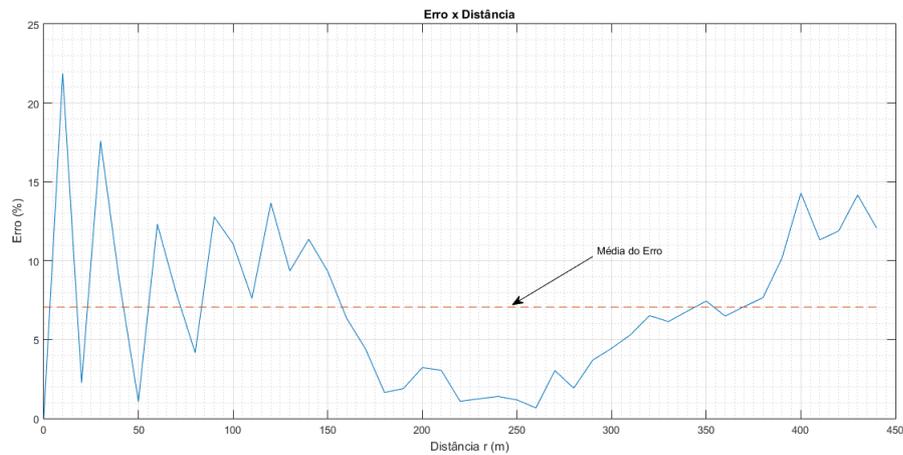


Fonte: Própria do autor (2018).

Observando a figura observa-se que comportamento da curva teórica plotada com os valores citados é uma boa estimativa para a curva experimental, ou seja, o cenário 3

pode ser caracterizado por um espaço livre de obstáculos, contudo há um erro entre elas, mostrada na Figura 55.

Figura 55 – Erro percentual entre curva experimental e teórico em função da distância



Fonte: Própria do autor (2018).

Para o teste 2, as coordenadas do ponto inicial², da primeira perda de pacotes³ e do fim do percurso⁴ estão na Figura 56. Do ponto inicial até o ponto **Y** foi uma distância em torno de 810 metros. Neste ponto, a informação foi completamente perdida.

Figura 56 – Trajeto Aeroclube da Paraíba - Teste 2



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018)

² Início da Figura 56.

³ Ponto **Y** da Figura 44 e 56.

⁴ **Fim da pista** da Figura 56.

Em seguida foi feita outra requisição de dados, onde o pacote foi recebido por completo. Sendo este o primeiro ponto de perda, andou-se mais 50 metros (ponto "Z", Figura 44 da seção 4.1.1.6) e novamente a primeira aquisição resultou em 0 pacotes mas na segunda requisição apresentou todos os 372 caracteres.

Os 50 metros seguinte era a marca onde aconteceu a perda de dados no teste 1 (ponto **X** da Figura 51). Deste ponto em diante, eram feitas cinco requisições a cada 10 metros até o fim do percurso, na marca de 1030 metros.

A partir do ponto **X** foi observado que entre as cinco requisições feitas a cada 10 metros haviam perdas de informações, em que alguns caracteres não foram recebidos completamente pelo receptor. Sendo assim, na Tabela 5 se encontram a média da perda de caracteres **A** como também o desvio padrão da quantidade de caracteres recebidos entre a cinco requisições.

Tabela 5 – Perdas em função da distância.

Distância (m)	Média de perdas (%)	Desvio padrão de caracteres
900	0	0
910	0	0
920	0	0
930	0	0
940	59,31	191
950	44,48	191
960	15,59	129
970	0	0
980	7,52	50
990	10,40	33
1000	3,11	25
1010	49,4	126
1020	49,4	130

Fonte: Própria do autor (2018).

A medida em que a distância entre os módulos aumentou, maior foi a perda de informação, como observado na tabela 5 entretanto, há pontos destoantes (marca entre 970 e 1000 metros) que não apresentaram tanta perda de caracteres em comparação com outros pontos.

Na região dos 900 metros até o fim da pista, como pode ser observado na Figura 57, há mais construções ao redor da pista que possivelmente causaram uma interferência de multipercusos do sinal e conseqüentemente as perdas.

Em relação ao desvio padrão, é observado que há uma variação maior da quantidade de caracteres recebidos entre as cinco requisições para os maiores valores de média, ou seja, a quantidade de caracteres recebidos foram mais homogêneos onde houve poucas

perdas.

Figura 57 – Trecho de 900 metros.



Fonte: Adaptado de Google Imagens (2018).

Além disso, essa variação dos valores da média e desvio padrão podem indicar que os módulos estejam próximos do limite de comunicação, isto é, a potência do transmissor não é mais suficiente para deixar a comunicação estável.

Em resumo, no primeiro cenário viu-se que a troca de dados se manteve intacta, mostrando que a implementação deste trabalho é viável. Já com o segundo cenário, o módulo teve um bom comportamento na comunicação porém, por causa da influência do ambiente (linha de transmissão, desvio do percurso, área com densa vegetação) fez da comunicação ser sensível, comprometendo a integridade em certos pontos.

Com o cenário 3 foi possível avaliar a potência do sinal recebido além de analisar o comportamento do E32 em campo aberto, que diferentemente do cenário 2, não tem tanta sensibilidade devido ao meio ser livre de obstáculos, apresentando perdas de informação depois de 900 metros.

4.2 Medição da vazão

Nesta seção será descrito toda a plataforma de testes antes e depois da instalação do módulo de comunicação híbrida, além de mostrar a curva real em comparação com a curva teórica esperada.

4.2.1 Plataforma de testes

Antes dos resultados, no laboratório do LENHS, a medição de vazão acontecia por meio de um medidor de pressão mecânico (manômetro) tipo tubo em U, como ilustrado

na Figura 58. Através da diferença do nível do elemento químico em seu interior é possível determinar a pressão usando a Equação 2.9.

Figura 58 – Fotografia do medidor de pressão mecânico do tipo tubo em U do LENHS.



Fonte: Própria do autor (2018).

No trecho em que se encontra esse medidor mecânico tipo tubo em U, há também sensores de fluxo por pressão diferencial placa de orifício e tubo de Venturi e um sensor eletromagnético, todos em série.

O manômetro do tipo tubo em U (Figura 58) é acoplado a placa de orifício (Figura 59) por mangueiras transparentes. O material químico deste manômetro é o mercúrio, um material mais denso se comparado com a água por exemplo. Assim, pode-se obter valores de pressão e vazão com pouco deslocamento de nível.

Figura 59 – Fotografia da placa de Orifício do LENHS



Fonte: Própria do autor, 2018.

A placa de orifício do LENHS(Figura 59) possui um diâmetro externo de 100 mm e interno de 50 mm, dando uma relação entre diâmetros de 0,5 e possui duas válvulas que permitem a passagem da pressão ao medidor mecânico.

Vale lembrar que o líquido que passa tanto pela placa de orifício quanto no tubo que liga o sensor de vazão ao medidor mecânico é água, isto é, a água que faz pressão no mercúrio e mudando, assim, a coluna de mercúrio.

Adaptação

Para o projeto o sensor utilizado para aquisição do SADIR é o MPX5010, descrito no Capítulo 2 na Seção 2.5. Lembrando que esse sensor fornece valores de tensão proporcionais a diferença de pressão e assim calcula-se a vazão.

Contudo, para não haver a remoção do medidor mecânico foi feita uma adaptação na tubulação que liga a placa de orifício ao visualizador, presente na Figura 60.

Figura 60 – Adaptador



Fonte: Própria do autor, 2018.

Este adaptador tem uma válvula esférica *on/off* que permitiu colocar e tirar o sensor MPX sem a remoção do manômetro em U ou até mesmo do desligamento da planta, não havendo comprometimento no funcionamento, além de possibilitar uma comparação de resultados das medições entre os sensores simultaneamente.

Assim como no manômetro mecânico, o MPX estava em contato com água. Com o adaptador instalado foi possível montar o circuito completo na planta (Figura 61).

Figura 61 – Circuito instalado.



Fonte: Própria do autor (2018).

O circuito instalado é composto pelo circuito de condicionamento do sensor, que regula a saída de 0 a 5 V do sensor para 0 a 3,3 V, suportado pela Tiva, o SADIR e uma bateria externa para alimentar o módulo e condicionamento.

4.2.2 Metodologia

Feita a instalação na planta, ocorreu um série de procedimentos para o correto funcionamento do sistema. O primeiro deles foi a retirada ao máximo de ar do tubo que interliga os sensor MPX e o manômetro a placa de orifício.

Para retirar o ar, as mangueiras foram desacoplados do MPX e manômetro. Após isso a planta foi ligada e as válvulas da placa de orifício foram abertas para que a água que circula nos tubos expulsassem o ar. Tendo o máximo de ar retirado, fechou-se as válvulas e desligou-se a planta para então reacoplar os sensores. A retirada do ar serve para diminuir os erros de medição.

Depois, o sensor MPX foi ligado ao condicionamento. Após isso, a planta hidráulica foi acionada para o ajuste dos potenciômetros de ganho e *offset*.

No primeiro momento não havia fluxo de água, logo foi feito o ajuste do *offset*. Em

seguida, regulou-se a válvula responsável pelo fluxo interno da planta para que houvesse uma diferença de coluna de mercúrio proporcional ao valor máximo de pressão suportado pelo sensor MPX e assim ajustar o potenciômetro de ganho.

O valor de referência mais próximo ao ajustar a válvula foi de aproximadamente 69 mm de mercúrio. Sendo assim, o ganho foi ajustado para um valor de pressão proporcional a 69 mm de mercúrio.

Feitos todos os ajustes e a instalação completa então partiu-se para o levantamento da curva experimental da planta. Para isso, foram usados os fluxogramas das Figuras 32 e 33 e a interface da Figura 34 para fazer a aquisição do MPX5010, além de lido e anotado os valores da coluna de mercúrio para comparação a posteriori.

O levantamento da curva procedeu da seguinte forma: começando do nível zero de vazão, anotou-se a altura da coluna de mercúrio, depois fez a aquisição via *bluetooth* do dado do sensor MPX, anotou-se os valores de tensão, pressão e vazão apresentados na interface.

Os valores presentes na interface *bluetooth* eram enviado também via LoRa ao outro SADIR, que estava conectado a um computador por meio do USB da Tiva. Para o levantamento da curva não foi usado o módulo secundário.

Logo após a primeira leitura, variou-se a válvula que regula a vazão da tubulação até aumentar um pouco o nível da coluna de mercúrio para fazer uma nova leitura. A variação ocorreu sempre buscando o menor incremento possível, sendo repetido até o máximo da coluna de mercúrio.

4.2.3 Resultados

Com a interface *bluetooth*, o gráfico plotado é o mesmo encontrado na Figura 34 que apresentou um resultado não esperado. Os valores da vazão estavam próximos de zero contudo, o *software* não foi capaz de ajustar a escala para melhor visualização.

Entretanto os valores obtidos a cada aquisição, visto na interface e visto na serial da IDE Energia recebidos via LoRa no módulo conectado ao PC, foram anotados a parte e se encontram na tabela 6 junto com os valores da variação da coluna de mercúrio.

Com os dados da coluna de mercúrio é possível descobrir a pressão exercida com a Equação 2.9, cujos valores de massa específica e da gravidade, apresentados por Balbinot e Brusamarello (2000), foram de aproximadamente 13595 Kg/m^3 e $9,8 \text{ m/s}^2$.

Como a ideia é ter uma estimativa do comportamento da curva, para o cálculo da curva experimental, o coeficiente de descarga, que depende da relação de diâmetros entre a placa de orifício e o diâmetro do tubo além do coeficiente de Reynolds, foi levado em consideração o valor padrão para placas de orifício de 0,6, também apresentado por

Tabela 6 – Dados para as curvas experimentais

Coluna de mercúrio (mm)	Tensão MPX (V)	Pressão MPX (KPa)	Fluxo MPX(m^3/s)
0	0	0	0
4	0,2617	0,1831	0,0007
8	0,5140	0,9313	0,0017
16	0,8519	1,9331	0,0024
21	1,0598	2,5498	0,0028
26	1,2890	3,2293	0,0031
33	1,6548	4,3140	0,0036
41	2,0043	5,3505	0,0040
54	2,4268	6,6036	0,0044
69	3,3000	9,1928	0,0052
80	3,3000	9,1928	0,0052
90	3,3000	9,1928	0,0052

Fonte: Próprio do autor, 2018.

Balbinot e Brusamarello (2000).

Para obter valores mais exatos, o correto seria calcular o número de Reynolds e associar o valor a relação de diâmetros. O fator de expansibilidade (ϵ) para a água é próximo de 1.

Assim, com o coeficiente de descarga igual a 0,6, o fator de expansibilidade igual 1, a relação de diâmetros de 0,5 e os valores de pressão do sensor mecânico em U, aplicados a equação 2.11, obteve-se os pontos da curva "manômetro" da presente na Figura 62 que junto aos dados de pressão e vazão da tabela 6, levantou-se a curva para o sensor MPX5010, contida também na mesma figura.

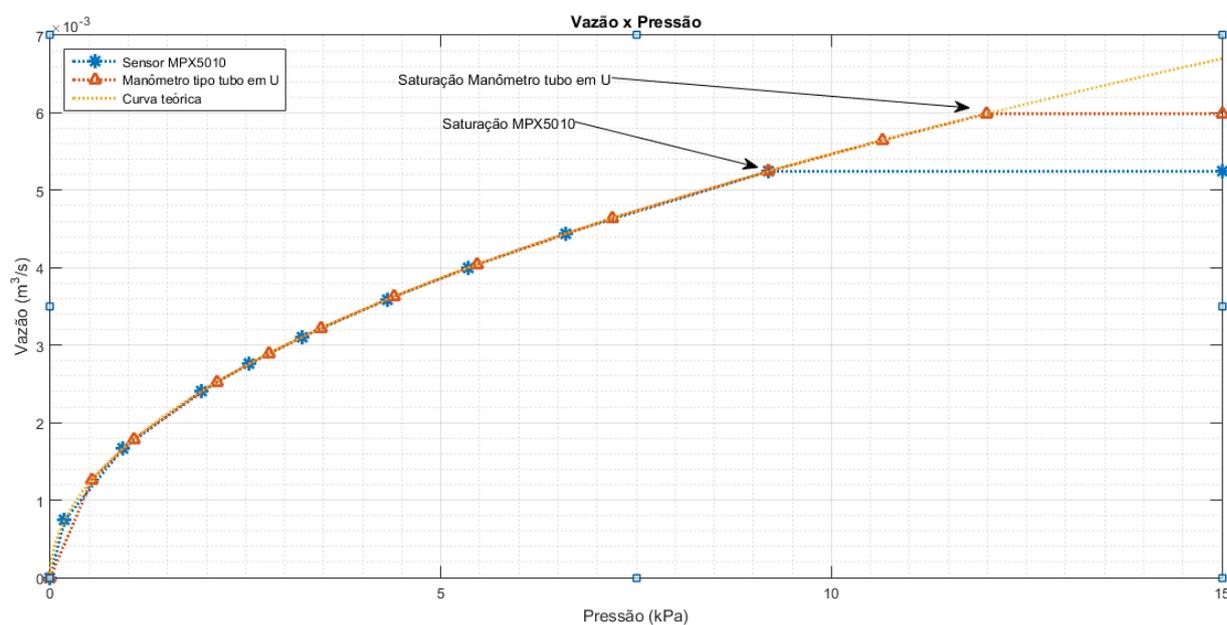
Além do mais, utilizando os fatores C_d , o fator de expansibilidade ϵ , relação dos diâmetros já mencionados, estima-se o comportamento da curva teórica, a fim de compará-lo com as curvas experimentais.

O valor máximo de pressão para os sensores são diferentes logo, devido ao ajuste do condicionamento ser para o valor de coluna de mercúrio 69 mm, valores maiores que este fará com que o sensor MPX sature e para valores acima de 90 mm, o manômetro em U sature.

Na Figura 62 é observado que os valores pontos obtidos por ambos os sensores (* para o MPX e Δ para o tubo em U) coincidem com a curva teórica. Entretanto, há um erro associado entre os valores de pressão e vazão obtidos pelo sensor MPX e pela coluna de mercúrio, apresentado na Tabela 7.

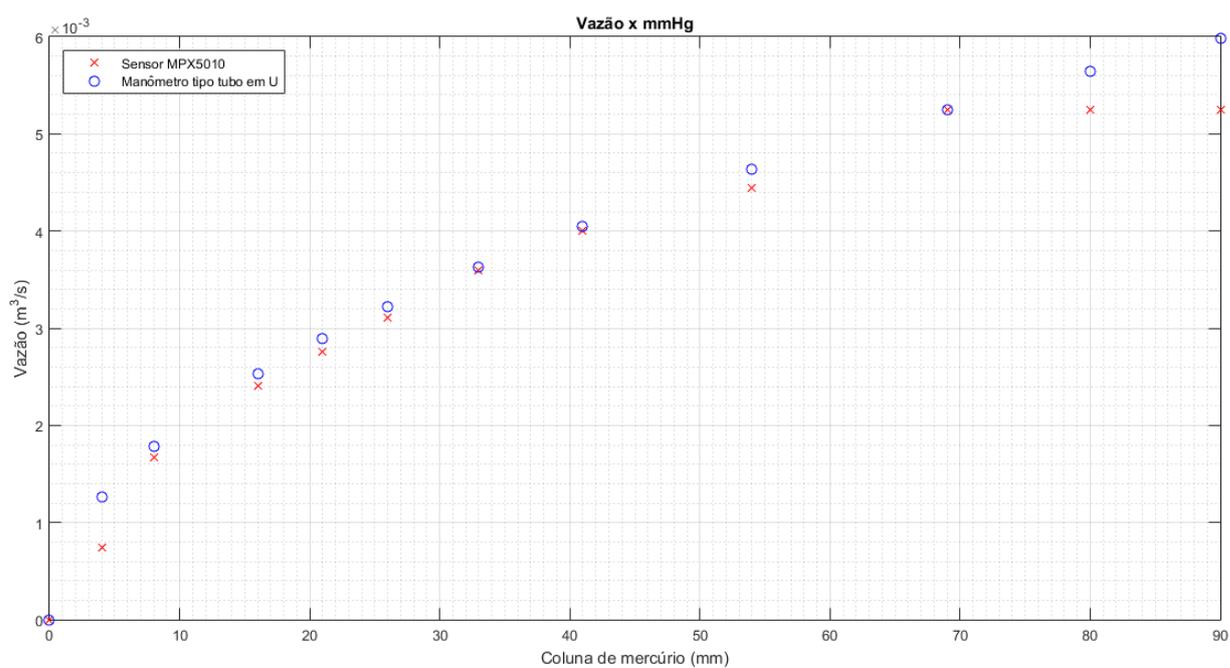
A fim de visualizar melhor o erro foram plotadas as curvas da vazão em função da coluna de mercúrio e da pressão em função da coluna de mercúrio, respectivamente,

Figura 62 – Gráfico com as curvas experimentais e teórica



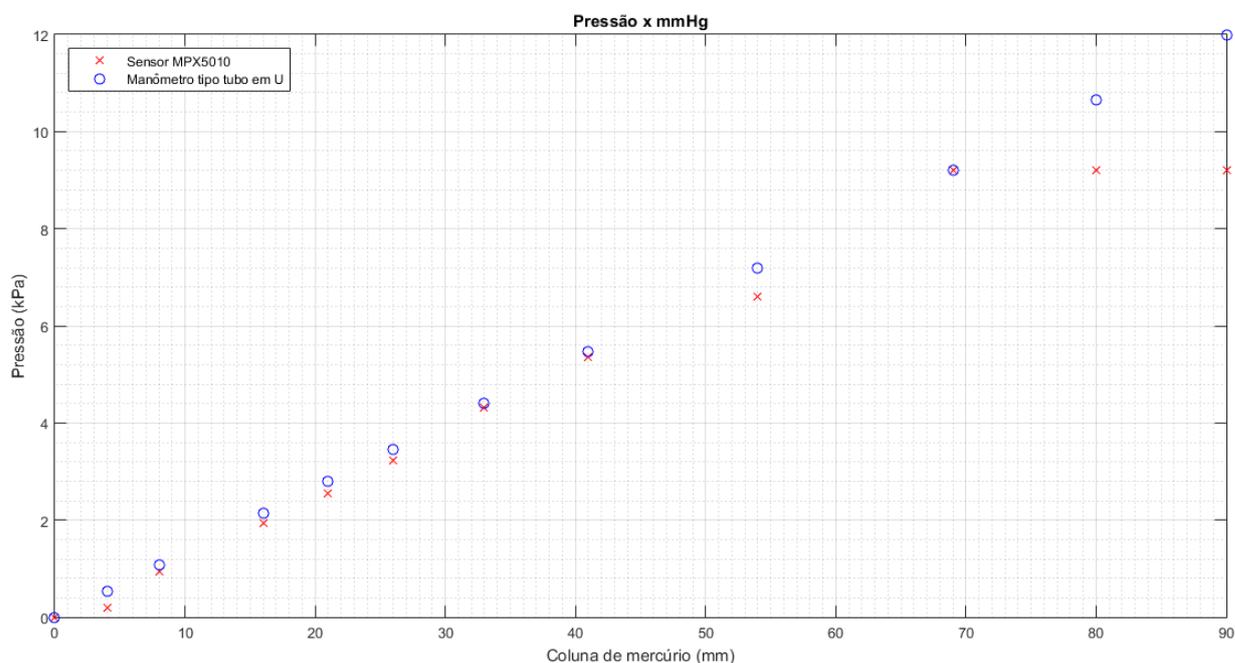
Fonte: Próprio do autor (2018).

Figura 63 – Gráfico Vazão em função da coluna de mercúrio



Fonte: Próprio do autor (2018).

Figura 64 – Gráfico Pressão em função da coluna de mercúrio



Fonte: Próprio do autor (2018).

nas Figuras 63 e 64. Nestas figuras, percebe-se que para um mesmo valor de coluna de mercúrio, há valores diferentes tanto de pressão, como de vazão e esses valores se aproximam a medida que a coluna de mercúrio atinge os 69 mm, ponto de ajuste do circuito de condicionamento.

Um dos fatores que ocasiona o erro está associado ao fato de haver bolhas de ar presente nos tubos. As bolhas presentes no interior do tubo podem ser comprimidas, gerando uma diminuição na medição da pressão pelo sensor utilizado.

Para altos valores de pressão vindos da placa de orifício, o valor da pressão lida pelo MPX5010 seria menor que o esperado devido a presença das bolhas, pois haveria ar comprimido. Já em pressões menores, o ar é menos comprimido e isso resulta em uma menor queda de pressão.

Sendo assim, o ajuste no circuito de condicionamento e nos cálculos para pressão e vazão deveria ser proporcional a queda de pressão exercida pelas bolhas. Contudo, o ajuste foi feito para que altas quedas de pressão fossem iguais tanto em baixas como em altas pressões, logo, é de se esperar que as pressões lidas pelo MPX, em baixa pressão, tenham valores mais baixos que o manômetro tipo tubo em U.

Por isso, de acordo com o observado na tabela 7, o erro é maior para as colunas de mercúrio mais baixas. A medida que se aproxima da referência de 69 mm, a queda de

Tabela 7 – Erro entre a pressão MPX e manométrica do tipo tubo em U.

Erro Pressão (%)	Erro Vazão (%)
0	0
65.64	41.38
12.62	6.52
9.31	4.77
8.86	4.53
6.77	3.44
1.87	0.94
2.04	1.02
8.21	4.19
0.00	0.00
13.75	7.13
23.33	12.44

Fonte: Própria do autor (2018).

pressão também se aproxima de sua referência, resultando em um erro tanto de pressão como de vazão de 0%. Como os valores do MPX saturam para valores acima de 69 mm de mercúrio, a tendência do erro é aumentar novamente.

Outro ponto que pode ocasionar erros é na precisão do sensor MPX, que segundo o manual, os valores lidos tem um erro de 5%. Outro possível erro é devido o medidor do tipo em U ser mecânico e visual, pode haver erros devido a observação errada na escala da graduação devido ao ângulo em que se esteja observando (erro de Paralaxe).

5 Considerações Finais

Tendo em vista o desenvolvimento deste trabalho, vale salientar alguns pontos importantes. Um deles é sobre o LoRa e sua modulação, a *Chirp Spread Spectrum* que é o diferencial da tecnologia, cuja aplicação permite uma comunicação entre dispositivos a distâncias longas, oferece mais robustez e imunidade a ruídos e interferência. Associados a ele há o protocolo que visa usufruir do hardware a fim de oferecer baixo consumo de energia.

Baseando-se em longas distâncias de comunicação e eficiência energética, o LoRa é um tecnologia interessante para aplicações em cidades inteligentes e na utilização da Internet das Coisas.

Em termos de *hardware e software* desenvolvidos, foi possível implementar uma solução para o LENHS, em que o sistema construído uniu comunicação híbrida com aquisição de dados, ou seja, conseguiu-se a instrumentação da planta hidráulica.

Na análise de transmissão, viu-se que no cenário 1, onde a distância entre os módulos LoRa foi de no máximo de 200 metros, com um ambiente com diversos obstáculos e que não permitia a visada direta entre eles, a comunicação se comportou bem, mostrando assim a viabilidade do projeto e da junção das diversas comunicações.

Com os cenários 2 e 3 foi visto que a quantidade de obstáculos influencia bastante na troca de informações. O cenário 2 permitia uma visada direta entre os LoRa conectados ao SADIR, contudo havia muitos obstáculos ao redor, o que possivelmente tornava a comunicação mais sensível no cenário 2 em relação ao 3, pois ao sair da linha de visada, havia comprometimento da transmissão

No cenário 3, em campo aberto e livre de obstáculos, foi possível adquirir a potência do sinal recebido e levantar a curva do comportamento da comunicação. Ainda foi possível, também, associar a curva experimental a uma curva teórica baseada em uma equação estatística e assim, estimar um modelo de curva próximo ao obtido com o analisador.

Ainda no cenário 3, é visível também que o meio tem suas influências na comunicação. No trecho de 900 metros deste cenário, há mais construções ao redor em comparação com o início do percurso. Nesse mesmo trecho, a qualidade da transmissão cai, havendo perda de pacotes a medida que se aproxima mais dos prédio da região do cenário.

Nos testes para medição da vazão, tanto o SADIR quanto as implementações de *firmware e software* se mostraram efetivas, dando a oportunidade de fazer o levantamento do comportamento da planta dentro do LENHS sem a necessidade de visualizar o medidor do tipo em U.

Apesar de neste trabalho ter-se uma proposta inicial de usar os módulos *TR485LoRa*, isto não foi necessário devido ao fato dos sistemas conseguirem se comunicar mesmo dentro

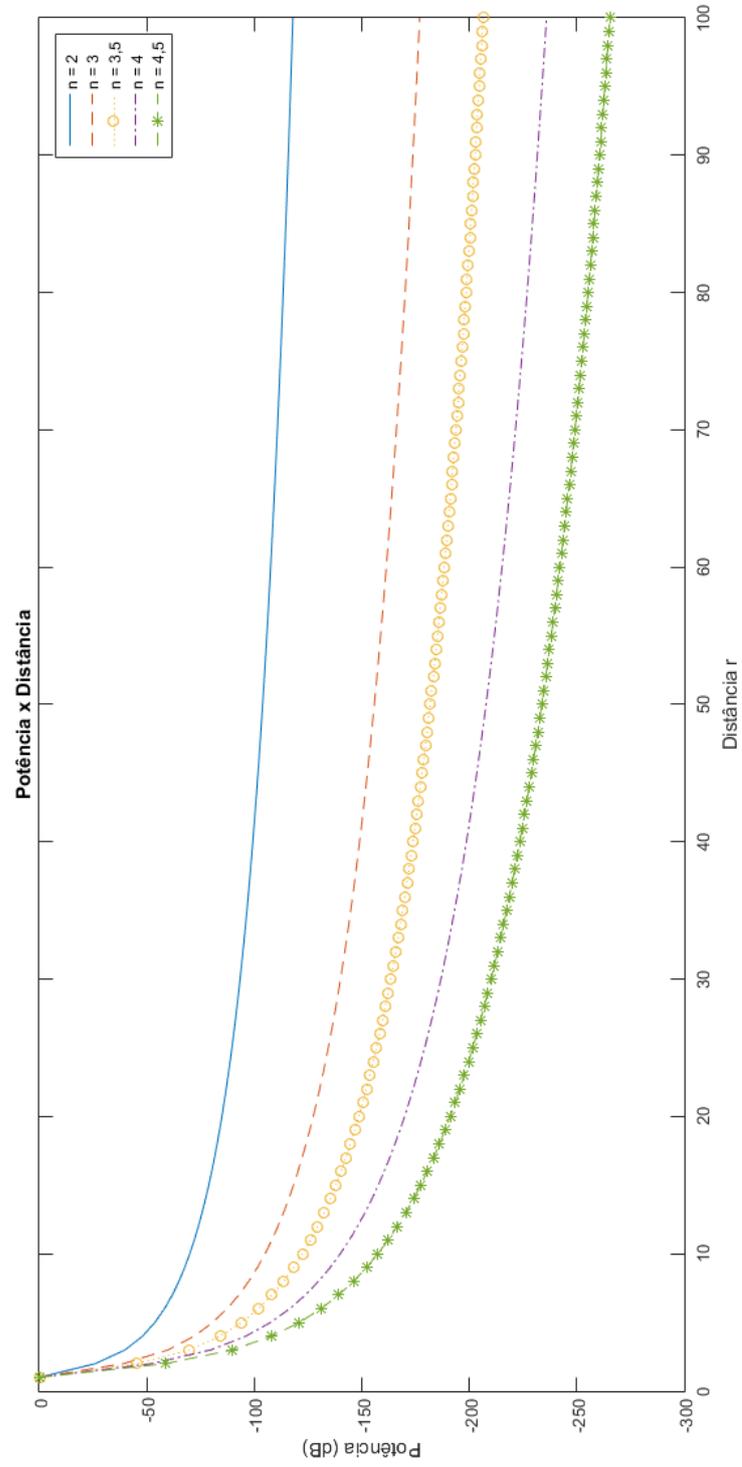
dos laboratórios. Contudo, a proposta inicial continua sendo válida para outros projetos em que houver necessidade de transmissão de dados a locais mais distantes que o LAC.

O sistema desenvolvido SADIR permite a expansão para trabalhos futuros que dão uma continuidade do projeto, dentre eles: calibração do sensor comparando os resultados com sensor de vazão eletromagnético, expansão da rede rs485 com a união à rede modbus já existente no LENHS, criação de uma rede CAN para os sensores 4-20 mA do LENHS, desenvolvimento de um aplicativo dedicado para visualização no smartphome.

Pode-se, também, desenvolver um servidor WEB na própria Tiva com possibilidade de criação de servidor online enquadrando-se no conceito de IoT, avaliar propagação do sinal LoRa para distâncias maiores e em ambientes urbanos com presença de obstáculos, criar uma rede na universidade com pontos fixos para transmissão e recepção do sinal, desenvolver um módulo com bateria para fixar no sistema já desenvolvido, onde este módulo utilizaria colheita de energia (solar, eólica) para regarregar a bateria.

Logo, com este trabalho é possível ver a união das áreas de comunicação e instrumentação, além da expansão para projetos futuros, que juntos proporcionaram solução prática e efetiva para o LENHS.

Apêndice A - Curva característica



Fonte: Própria do autor (2018).

Apêndice B - Ativação dos dispositivos

As informações da seção referente a ativação dos dispositivos foram retiradas exclusivamente do manual de especificações do protocolo LoRaWAN da LoRa Alliance (2016).

Para fazer parte da rede, cada dispositivo necessita de uma ativação que pode ocorrer de duas maneiras: *Over-The-Air Activation* (OTAA) ou *Activation by Personalization* (ABP).

Para cada ativação, há alguns fatores que os regem. O *JoinEUI* e o *DevEUI* são identificadores (ID) globais e únicos em cada módulo. O primeiro é usado a nível de aplicação e identifica qual *Join Server* - responsável por gerenciar chaves de segurança, melhor se adequa a rede, enquanto o outro é a nível de *end-device* e identifica o próprio dispositivo. Ambos são necessários para OTAA mas não para ABP.

As chaves de segurança (**AppKey** e **NwkKey**) são exclusivas em cada dispositivo, cuja atribuição vem de fabricação e são utilizadas para criptografar a informação difundidas na rede. Todas essas informações devem estar contidas nos *end-devices* antes de sua ativação.

Após a ativação surgem informações adicionais nos módulos: o endereço (**DevAddr**), chaves de segurança para a rede (**NwkSEncKey**, **SNwkSIntKey** e **FNwkSIntKey**), derivados da chave **NwkKey** e uma chave de segurança de aplicação (**AppSKey**) derivada da chave **AppKey**.

O *Forwarding Network Session Integrity Key* ou **FNwkSIntKey** é usado para calcular o **MIC** de todas as mensagens de *uplink*. O *Serving Network Session Integrity Key* ou **SNwkSIntKey** é responsável por verificar os **MIC** de *downlinks* e por fim, o *Network Session Encryption Key* ou **NwkSEncKey** faz a criptografia de *uplinks* e *downlinks* de comandos MAC. Todos são utilizados apenas pelos módulos finais.

O *Application Session Key* ou **AppSKey**, usado tanto pelos servidores de aplicativo quanto dispositivos finais, serve para criptografar mensagens de aplicação específicas presentes no campo *payload*.

No OTAA, os dispositivos finais participam de um procedimento de adesão da rede antes de qualquer troca de informação e esse procedimento é reiniciado sempre que houver perdas de informações do contexto da sessão ou *session context* - conjunto de dados que mantém a comunicação.

Na comunicação entre um módulo e o servidor de rede, a *session context* é chamada de *network session* e entre módulo e servidor de aplicação é de *application session*. A *network session* é formada por **FNwkSIntKey**, **SNwkSIntKey**, **FCntUp**¹, **FCntDwn** e **DevAddr**. A *application session* é composta por **AppSKey**, **FCntUp**, **FCntDwn**.

¹ **FCntUp** e **FCntDwn** estão contidos no *Frame Header* do **MACpayload** e são contadores de mensagens de *uplink* e *downlink* respectivamente.

Vale lembrar que o procedimento necessita dos parâmetros já mencionados: *JoinEUI*, *DevEUI*, *NwkKey* e *AppKey*.

O procedimento de adesão começa com uma mensagem de pedido de adesão (*join-request*) vindo de um módulo final. Esse pedido contém o *JoinEUI* e *DevEUI* além de um contador de quantos pedidos foram feitos. Periodicamente, o dispositivo envia mensagens de adesão (*rejoin-request*) dando a oportunidade de começar novas sessões.

Em resposta a esse pedido, o servidor de rede envia uma mensagem de aceitação (*Join-accept*), caso o servidor tenha recebido. A palavra *Join-accept* possui um contador, disponibilizado pelo *join server*, que é usado para gerar as chaves de segurança ditas anteriormente, o endereço do dispositivo (**DevAddr**), um campo com parâmetros para mensagens de *downlink*, outro para o delay que deve existir entre a transmissão e recepção (*RECEIVE_DELAY1* e *RECEIVE_DELAY2*) e um campo, opcional, que contém informações da rede local.

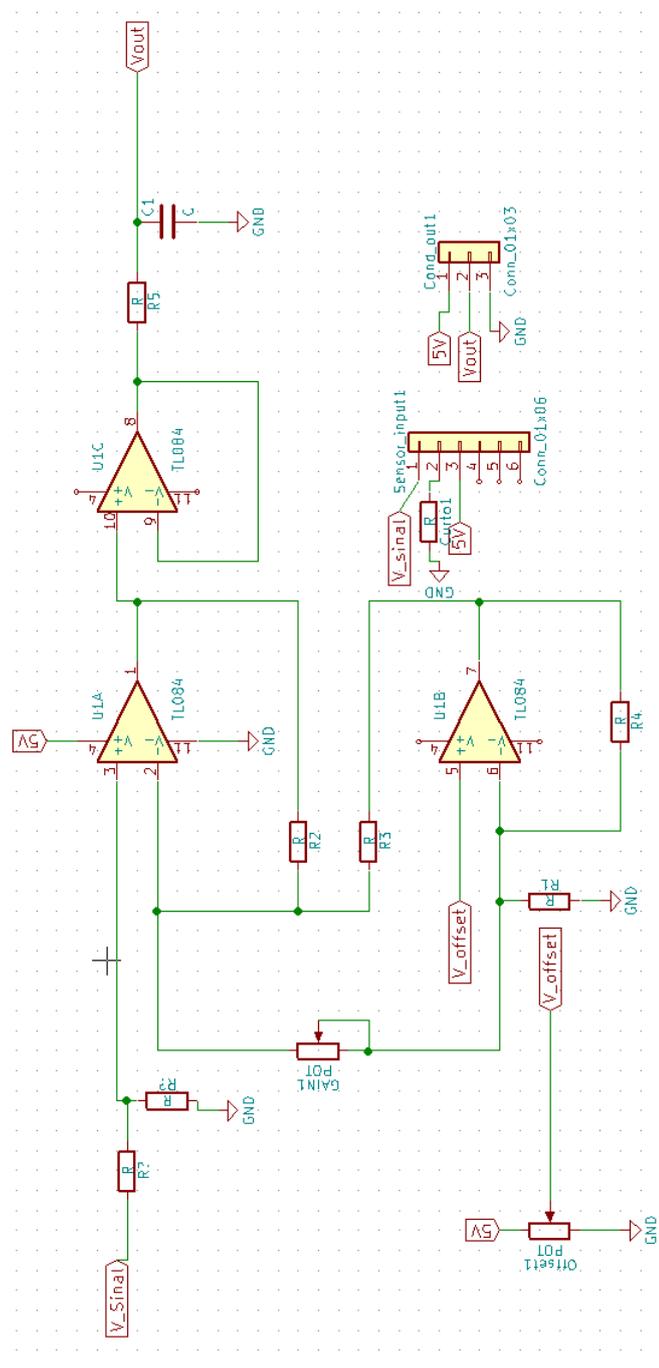
A ativação por ABP é feita em casos de um *end-device* se conectar a uma rede específica, ignorando os procedimentos de adesão. Nesse modo o endereço **DevAddr** e as chaves **NwkSEncKey**, **SNwkSIntKey** e **FNwkSIntKey** são gravadas diretamente no dispositivo, sem a necessidade de derivação vir do **DevEUI**, **JoinEUI**, **AppKey** e **NwkKey** durante a adesão. A participação de um módulo por essa ativação começa no momento em que a rede específica aparece.

Apêndice C - Tabela de Custos completa

Componente	Quantidade	Preço/unidade	Preço/unidade	Preço/unidade
Capacitor 1nF	2	R\$ 0,08	R\$ 0,09	-
Capacitor 0.1uF	8	R\$ 0,19	R\$ 0,12	-
Resistor 1Kohm	6	R\$ 0,08	R\$ 0,13	-
Resistor 5.1Kohm	6	R\$ 0,08	R\$ 0,11	-
Resistor 10Kohm	6	R\$ 0,08	R\$ 0,12	-
Resistor 1Mohm	6	R\$ 0,08	R\$ 0,11	-
Resistor 1.2Mohm	6	R\$ 0,08	R\$ 0,11	-
Borne 1x2 - 5.8mm	6	R\$ 0,78	R\$ 0,64	-
Borne 1x3 - 5.8mm	6	R\$ 1,09	R\$ 0,93	-
Barra de pino simples (fêmea) 1x4 - 2.54mm	2	R\$ 0,39	R\$ 0,84	-
Barra de pino simples (fêmea) 1x7 - 2.54mm	4	R\$ 0,88	R\$ 0,84	-
Barra de pino duplo (fêmea) 2x10 - 2.54mm	8	R\$ 0,98	R\$ 1,66	-
Driver MAX232	2	R\$ 2,22	R\$ 1,59	-
Driver MAX485	4	R\$ 2,90	-	-
Módulo CAN SV65H	2	-	-	-
Placa Fenolite 10x15 cm	4	R\$ 3,77	R\$ 4,97	-
Soquete para CI - 8 pinos	4	R\$ 0,15	R\$ 1,69	-
Soquete para CI - 16 pinos	2	R\$ 0,32	R\$ 0,33	-
LaunchPad Tiva TM4C1294	2	-	-	R\$ 107,00
Módulo Bluetooth HC05	2	-	-	R\$ 9,92
Módulo LoRa E32-TTL-100	2	-	-	R\$ 28,46
Sensor MPX5010	1	-	-	R\$ 31,07
Fornecedor		Eletrodex	Solda Fria	AliExpress

Fonte: Própria do autor (2018).

Apêndice D - Circuito de condicionamento



Fonte: Própria do autor (2018).

Referências

- AUGUSTIN, A. et. al. *A Study of LoRa: Long Range and Low Power Networks for the Internet of Things*. Basel, 2016.
- BALBINOT, A; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medida*. 2. ed. Grupo GEN - LTC, 2000. 2 v.
- CENTENARO, M. et. al. *Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart Cities Scenarios*. 2016.
- CHENGDY EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD. *SX1276/SX1278 Wireless Modules E32 Series User Manual*. Sichuan, 2018.
- HAYKIN, S; MOHER, M. *Sistemas Modernos de Comunicações Wireless*. 1. ed. Bookman, 2008.
- INGOLE, P .V; NICHAT, M. K. *Landmark based shortest path detection by using Dijkstra Algorithm and Haversine Formula*. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). p. 162-165. Mai-Jun 2013.
- JING, X. M. et. al. *An aerodynamically efficient sphere anemometer with integrated hot-film sensors for 2-D environmental airflow monitoring*. Institute of Electrical and Electronic Engineering, p.1, 2011.
- LANGE, P. et. al. *Thermal mass flow sensor for measurement of liquids (water)*. Itzehoe, p. 1, 2008.
- LORA ALLIANCE. *LoRaWANTM 1.1 Specification*. Beaverton, 2017.
- LORA ALLIANCE. *LoRaWANTM, What is it? A technical overview of LoRa[®] and LoRaWANTM*. San Ramon, 2015.
- LORA ALLIANCE. *LoRaWANTM Backend Interfaces 1.0 Specification*. Beaverton, 2017.
- MANN, S; HAYKIN, S. The Chirplet Transform: A Generalization of Garbo's Logon Transform. *Vision Interface '91*. Calgary, Alberta: Canadian Image Processing and Patern Recognition Society, 1991. p. 205-212.

MAXIM INTEGRATED. *MAX481/MAX483/MAX485/MAX487-MAX491/MAX1487 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers*. San Jose, 2014.

REAL WIRELESSE LTD. *A Comparison of UNB and Spread Spectrum Wireless Technologies as used in LPWAN M2M Application: A Whitepaper by Real Wireless*. Inglaterra, 2015.

RIGHETTO, M. A. *Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água*. Rio Grande do Norte, 2002.

SEMTECH. *SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*. Camarillo, 2016.

SEMTECH. *LoRa™ Modulation Basics*. Camarillo, 2015

SCHAFFERS, H. et. al. *Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation*. Berlin 2011.

TEXAS INSTRUMENTS. *MAX232x Dual EIA-232 Drivers/Receivers*. Texas, 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. *SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers*. Texas, 2018.

VILACA, N. M. C. A. A. et. al. *Smart city - caso de implementação em Buzios - RJ*. Rio de Janeiro, 2014.