

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TIAGO ALBERTO DERENIEVICZ

Sistema de comunicação veicular sem fio para redução do consumo de combustível, emissões e tempo de espera em semáforos de tempo fixo

CURITIBA

2023

TIAGO ALBERTO DERENIEVICZ

Sistema de comunicação veicular sem fio para redução do consumo de combustível, emissões e tempo de espera em semáforos de tempo fixo

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ph.D. André Augusto Mariano

CURITIBA

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos dessa graduação.

Agradeço a minha família, Carlos, Eliane, André e Thaís pelo amor, apoio e compreensão. Obrigado por serem motivação nos momentos mais sensíveis que passei durante esse período.

Agradeço especialmente aos meus pais, Carlos e Eliane, pelos valores e ensinamentos que me fizeram valorizar a oportunidade de realização desse curso.

Agradeço ao Professor André Augusto Mariano pela orientação e colaboração.

Agradeço a PRAE pelo apoio financeiro.

Agradeço ao PET Engenharia Elétrica pelo desenvolvimento pessoal e contribuição para realização desse trabalho.

RESUMO

Esse trabalho enfatiza a utilização de um sistema de comunicação veicular com semáforos para a redução do tempo de viagem e consumo de combustível. O sistema implementado calcula velocidades possíveis para o veículo atingir o próximo semáforo em estado favorável à sua travessia. Para implementação do sistema utilizamos o microcontrolador Atmega328p, Módulo RF Nrf24l01 PA NA, módulo GPS Neo-6M e um display LCD. Porém, apresentaremos outras tecnologias e componentes que também podem ser consideradas para implementação do sistema como a tecnologia de comunicação Lora e Zigbee. Como resultado o protótipo implementado apresenta desempenho satisfatório quanto as velocidades apresentadas pelo sistema. Erros de precisão do GPS, atenuação do sinal RF e dificuldade do condutor em manter o veículo em velocidade constante podem ocasionar em erros e mal funcionamento do sistema. Essas características podem ser solucionadas através da adição de extensões ao projeto, como a comunicação entre veículos e entre semáforos, por exemplo.

Palavras – chave: comunicação veicular; trânsito; semáforo; velocidade.

ABSTRACT

This work emphasizes the use of a vehicular communication system with traffic lights to reduce travel time and fuel consumption. The implemented system calculates possible speeds for the vehicle reach the next traffic light in a favorable state for its crossing. To implement the system, we used the Atmega328p microcontroller, RF module Nrf24l01 PA NA, GPS module Neo-6M and a LCD display. However, we will present another technologies and components that can also be considered for the system implementation, such as Lora and Zigbee communication technology. As a result, the implemented prototype presents satisfactory performance regarding the speeds presented by the system. GPS accuracy errors, attenuation of the RF signal and the driver's difficulty in keeping the vehicle at a constant speed can lead to system errors and malfunctions. These issues can be solved by adding extensions to the project, such as communication between vehicles and between traffic lights, for example.

Keywords: vehicular communication; Traffic; semaphore; speed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distâncias de comunicação e consumo	11
Figura 2 - Consumo de combustível e emissões.....	12
Figura 3 - Diferença de tempo devido a aplicação de VANET	15
Figura 4 - Simulação de sistema com controle de velocidades.....	18
Figura 5 - Topologia	21
Figura 6 - Circuito de alimentação de 5v	29
Figura 7 - Circuito de alimentação de 3,3v	30
Figura 8 - Conexões entre Atmega328p e módulo Nrf24I01 PA NA.....	31
Figura 9 - Conexões Atmega328p e módulo GPS neo-6M	32
Figura 10 - Conexões Atmega328p e módulo LCD	33
Figura 11 - Circuito de condicionamento	34
Figura 12 - Datagrama protocolo ESB	35
Figura 13 - Topologia em árvore	36
Figura 14 - Placa dedica e encapsulamento do transmissor	40
Figura 15 - Placa dedicada e encapsulamento do receptor	40
Figura 16 - Cenário de teste.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Semáforo tempo fixo vs semáforo tempo adaptativo	16
Tabela 2 - consumo e emissões do sistema com controle de velocidades	18
Tabela 3 - Precisão Latitude e Longitude	23
Tabela 4 - Requisitos microcontrolador	25
Tabela 5 - Especificações técnicas microcontroladores	25
Tabela 6 - Especificações técnicas tecnologias de comunicação sem fio.....	27
Tabela 7 - Resultado testes Rua Elétrica	42
Tabela 8 - Resultados testes Rua Engenharias	42
Tabela 9 - Comparação velocidade medida e teórica	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS.....	8
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3	METODOLOGIA	20
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	20
3.2	REQUISITOS NECESSÁRIOS.....	22
3.2.1	MICROCONTROLADORES	22
3.2.2	TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO	26
3.2.3	MÓDULOS SECUNDÁRIOS	27
3.3	IMPLEMENTAÇÃO.....	28
3.3.1	HARDWARE	28
3.3.2	SOFTWARE	34
3.3.3	PLACA DEDICADA E ENCAPSULAMENTO.....	40
3.3.4	TESTES REALIZADOS	41
4	RESULTADOS	44
4.1	TRABALHOS FUTUROS.....	48
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO MÓDULO TRANSMISSOR	55
	APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO MÓDULO RECEPTOR	56
	APÊNDICE C – CÓDIGO FONTE MÓDULO TRANSMISSOR	57
	APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE MÓDULO RECEPTOR	59

1 INTRODUÇÃO

A palavra engenharia consiste em um conjunto de saberes, técnicas e métodos que visam a utilização de recursos da natureza em benefício do ser humano (ENGINEERING, 2023) . A utilização desses recursos é inerente a existência desses indivíduos e apresentou-se de maneiras distintas ao longo da história. Se no começo nos preocupava apenas com a coleta e a caça, hoje conhecemos os materiais a nível atômico e utilizamos dessas propriedades para a criação e domínio de novas tecnologias. Foi através desse processo que prédios, trens, navios, aviões, automóveis e demais invenções que beneficiam nossas vidas tiveram origem. Porém, a origem de novas tecnologias e sistemas engenhosos exige cautela e conhecimento. Assim como os indivíduos da pré-história conheciam alimentos, raízes, ciclos e técnicas de caça, hoje precisamos conhecer os impactos da utilização de um novo sistema na sociedade e meio ambiente, tal como adaptar as tecnologias existentes de acordo com as exigências e recursos de cada era. Nos últimos anos, dois temas que tem gerado preocupação no Brasil são a quantidade de CO₂ lançada na atmosfera por veículos devido a queima de combustível fóssil (COSTA, 2022) e o tempo gasto no trânsito nas grandes capitais do país (PESQUISA... 2022). Dessa forma, o trabalho de engenharia, interpretado como a definição descrita, não apenas está presente, mas também se faz necessário. Uma solução que tem sido avaliada é a utilização de um sistema de comunicação veicular com semáforos. Um projeto desenvolvido pela Audi mostra que a utilização de tecnologia V2I (veículo para infraestrutura) pode reduzir o consumo de combustível devido a paradas em semáforos em até 10%. (AUDI... 2022) Outro estudo mostra que o consumo de combustível e emissões de CO na travessia de semáforos pode ser reduzido em 22% e 80% respectivamente. (TIELERT et al., 2010).

Nesse contexto, esse trabalho busca a implementação de um sistema de comunicação veicular com semáforos para a redução de emissões, consumo de combustível e tempo de viagem em semáforos de tempo fixo utilizando como base principal o trabalho de Asadi (2010). Essa comunicação busca a apresentação da velocidade ideal do veículo ao condutor para que este atinja o próximo semáforo com estado favorável à sua travessia.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo da elaboração desse trabalho é a implementação de um sistema de comunicação entre veículos e semáforos de baixo custo baseado principalmente no trabalho de Asadi (2010). O sistema implementado busca o cálculo e apresentação da velocidade ideal do veículo para que este atinja o próximo cruzamento com semáforo em estado favorável à sua travessia. Reduzindo dessa forma o tempo de espera de veículos em intersecções com semáforos de tempo fixo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Levantar os requisitos do projeto: distância de comunicação; taxas de transmissão; memória e velocidade de Clock necessárias; protocolos de comunicação, circuitos de alimentação, custos, entre outros;
2. Escolher tecnologia de comunicação mais adequada para a implementação do sistema;
3. Estabelecer comunicação entre veículo e semáforo;
4. Elaborar, implementar e validar os algoritmos e rotinas necessários;
5. Testar e validar o funcionamento completo do sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a elaboração desse trabalho buscamos referência na literatura mais atual acerca de comunicação veicular. A maturidade e viabilidade de uma determinada tecnologia é temporalmente registrada através do número de trabalhos publicados com foco nessa tecnologia. De forma que, muitas vezes, referenciar um trabalho mais atual pode englobar o conteúdo e resultado de trabalhos mais antigos. Porém, apesar disso, alguns trabalhos apresentam conceitos e conclusões tão fundamentais que mesmo apesar do tempo devem ser referenciados. Dito isso, nossa pesquisa bibliográfica inicia-se por volta de 2006, mais especificamente, com o surgimento do projeto Travolution desenvolvido pela Audi em parceria com a Universidade Técnica de Munique, cidade de Ingolstadt, entre outros (AG, 2010). A motivação para o surgimento do projeto foi a redução do tempo de espera em semáforos vermelhos e a redução de emissões proveniente de veículos. Para isso, parte do escopo do projeto foi definido como:

1. Desenvolvimento de um sistema que permitisse a comunicação entre veículos e semáforos utilizando redes WLAN (Wireless Local Area Network) e UMTS (Universal Mobile Telecommunications System);
2. Sugestão de velocidade para atingir o próximo semáforo com sinal verde passada ao condutor através de gráficos apresentados no painel do veículo;
3. Caso o sinal fosse vermelho, então o sistema apresentaria o próximo instante em que o semáforo estaria verde;
4. Por fim, o sistema deveria comunicar o condutor caso o sinal estivesse na eminência de ficar amarelo.

A comunicação veicular com semáforos faz parte de um conjunto específico que convém ser definido nesse momento visto que está intrinsecamente ligado com a proposta desse trabalho. Em palavras simples, o termo Car-to-X communication é a troca de informação sem fio entre veículos assim como a troca de informações entre veículos e infraestrutura de trânsito (CAR-TO-X... 2016). O projeto Travolution utilizou duas abordagens para a criação de seu sistema Car-to-X communication: No primeiro, os semáforos transmitiam informação utilizando uma rede WLAN; No segundo, os semáforos utilizam um sistema de transmissão com cabos para transmitir informação para um servidor. Os veículos recuperavam a informação do servidor através de uma

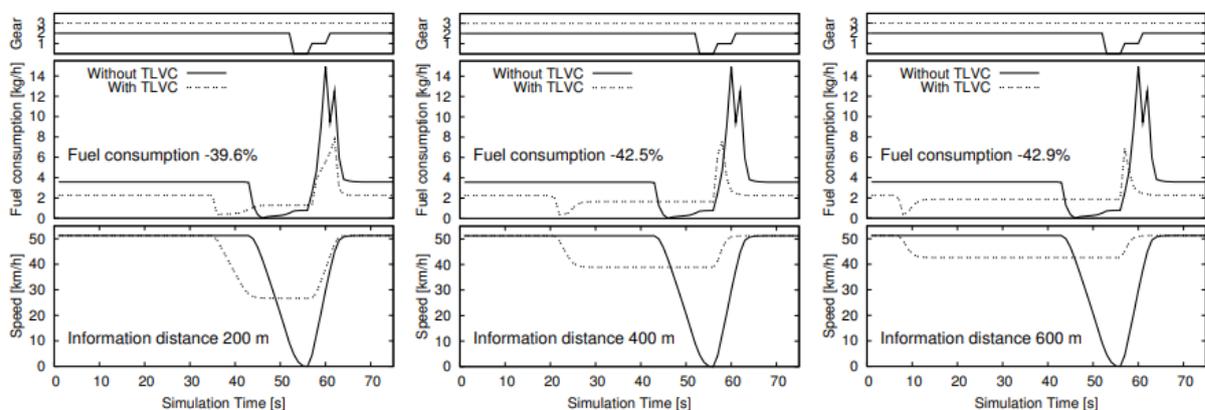
comunicação UMTS. Em ambas as abordagens os semáforos transmitiam um pacote de dados padrão contendo informações como o estado do semáforo e uma prévia de como o sinal iria mudar num futuro próximo. Ao receber os dados, um algoritmo implementado no veículo calculava a velocidade ideal para o veículo atingir o próximo sinal verde; alertava o condutor caso o sinal estivesse na eminência de ficar amarelo (através de um sinal no painel ou leve acionamento nos freios) ou, caso não fosse possível passar pelo semáforo, então o algoritmo indicaria o próximo instante que o sinal seria verde. Como resultado, pesquisadores do projeto Travolution mostraram que o sistema desenvolvido pela Audi possui a capacidade de reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera em 15%, o que corresponde a aproximadamente 900 milhões de litros de gasolina polpados por ano caso a tecnologia fosse aplicada em toda a Alemanha (AG, 2010). Infelizmente não conseguimos acesso ao algoritmo que produziu o potencial para o alcance de tais resultados, porém o projeto Travolution mostra o impacto que a aplicação de um sistema Car-to-X communication teria caso fosse aplicado no dia a dia do trânsito.

Outro trabalho que utilizamos como objeto de estudo foi o produzido por Tielert et al. (2010). Nesse trabalho, o autor apresentou simulações utilizando os softwares VISSIM e PHEM para avaliar o consumo de combustível devido a aplicação de um sistema de comunicação traffic-light-to-vehicle (TLVC). O objetivo da troca de informações entre veículos e semáforos foi similar ao do projeto Travolution: adaptar a velocidade do veículo para atingir o próximo semáforo com sinal verde evitando paradas em semáforos vermelhos e polpando combustível. Diferente do projeto Travolution, o trabalho de Tielert et al. (2010) não objetiva a criação de um sistema específico de comunicação veicular para a redução de combustível e emissões. Mas sim, busca avaliar o impacto da utilização de tal sistema.

O autor classifica os componentes de simulação para validar o TLVC em três itens principais: consumo de combustível e emissões; tráfego veicular e comunicação. Para isso, o autor busca a integração de um modelo de comunicação sem fio em um software de simulação microscópico de tráfego (VISSIM). Já para o cálculo do consumo de combustível e emissões o autor utiliza o modelo PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model). O trabalho de Tielert et al. (2010) produziu resultados importantes que iremos apresentar na sequência. Um item de grande importância mencionado pelo autor está relacionado com as características de

comunicação entre veículos e semáforos. Essas características são de grande importância para a realização desse trabalho, visto que grandezas como taxas de transmissão, atrasos de propagação, largura de banda, entre outras grandezas influenciam diretamente no desempenho do sistema proposto. Tielert et al. (2010) diminuí a dependência do sistema a tais características propondo um sistema onde o cálculo de distância, tempo e velocidade fossem realizados dentro do veículo. Dessa forma, é mais relevante garantir que o veículo receba o sinal do semáforo, mesmo que a baixas taxas de transmissão, do que prezar por taxas elevadas de transferência de dados (TIELERT et al., 2010). A justificativa do autor está no fato que uma vez que as informações do semáforo tenham chegado ao veículo. Então o próprio veículo pode realizar cálculos para prever o estado futuro do semáforo. Essas características possibilitam a utilização de tecnologias mais acessíveis para a implementação do projeto e viabilizam a utilização de sistemas de comunicação sem fio a longas distâncias. Porém, exige que os tempos de troca de estado do semáforo sejam conhecidos pelo veículo além de excluir a utilização do sistema para configurações onde há semáforos com tempos adaptados para diferentes fluxos de veículos. Destacamos alguns resultados fundamentais do trabalho de Tielert et al. (2010) que justificam a utilização de tal sistema. É importante evidenciar que o autor simula o impacto do TLVC para três distâncias mínimas de comunicação entre veículos e semáforos: 200m, 400m e 600m. A Figura 1 ilustra o resultado das simulações.

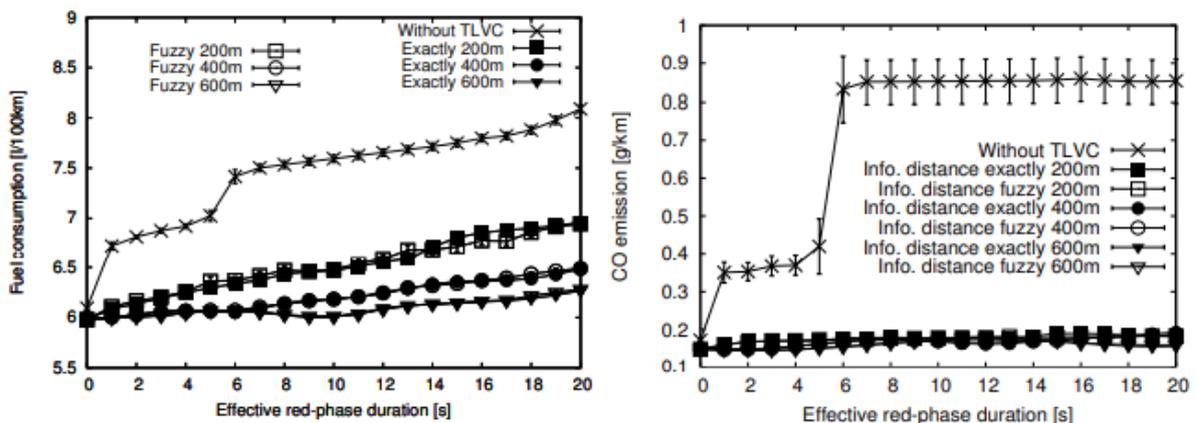
Figura 1 - Distâncias de comunicação e consumo



Fonte: Tielert et al. (2010)

Pode-se observar que a faixa de distâncias para o qual o sistema possui o melhor resultado ocorre entre 200m e 400m, pois o benefício em aumentar a distância de comunicação de 200m para 400m é maior do que aumentar a distância de 400m para 600m (TIELERT et al., 2010). O autor ainda argumenta que os benefícios do TLVC para distâncias maiores que 600m são ainda menores. De forma similar, utilizar distâncias de comunicação menores que 100m também produzem resultados insatisfatórios, visto que para essa distância o condutor diminuí a velocidade naturalmente, inibindo o funcionamento do TLVC. A Figura 1 também mostra que na ausência do TLVC o veículo precisa parar completamente devido ao semáforo no estado vermelho (entre 50s e 60s), isso faz com que o consumo de combustível aumente, visto que o veículo precisa alterar sua inercia para entrar em movimento novamente (TIELERT et al., 2010). O impacto no consumo de combustível e emissões durante o estado vermelho do semáforo é detalhado na Figura 2.

Figura 2 - Consumo de combustível e emissões



Fonte: Tielert et al. (2010)

Pode-se observar que para tempos no estado vermelho maiores o consumo de combustível para o sistema com TLVC apresenta redução de aproximadamente 22% de combustível (TIELERT et al., 2010). Já para as emissões de CO a porcentagem é ainda maior, podendo reduzir as emissões durante o estado vermelho em até 80%. Como mencionado acima, mudar o estado de inercia do veículo influencia no consumo de combustível. O “joelho” presente em ambos os gráficos da Figura 2 (entre 5s e 6s) representa uma parada total do veículo. O aumento expressivo no consumo de

combustível e emissões de CO presentes nos gráficos é devido a essa mudança de inercia (TIELERT et al., 2010).

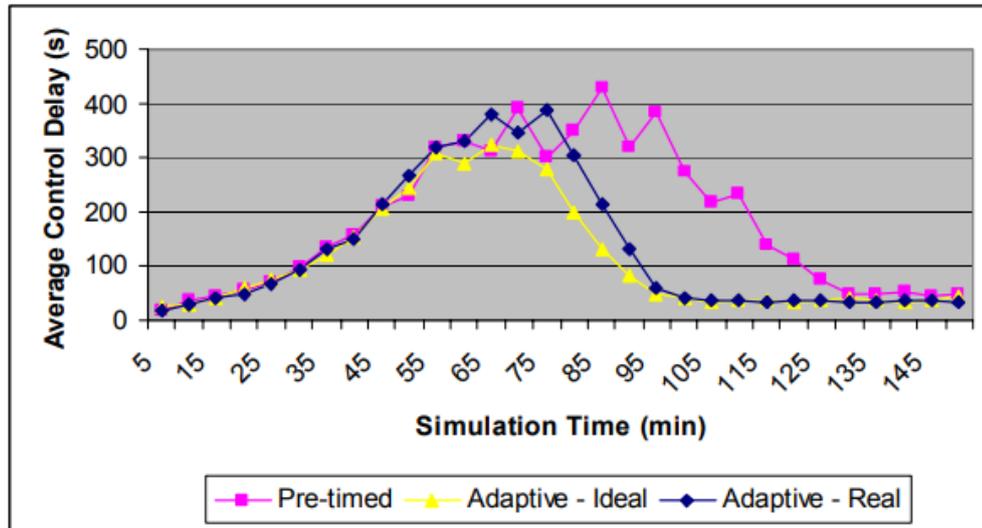
Os dois trabalhos que referenciamos até o momento estavam intrinsecamente ligados a comunicação veicular com infraestrutura de trânsito. Outra abordagem que é importante ressaltar é a comunicação entre dois ou mais veículos. Referenciar ambas as tecnologias, permite pontuar e comparar as principais características de ambas, de forma a possibilitar a escolha de uma determinada tecnologia ou ainda a mescla de suas principais características. Nesse sentido o trabalho de Grandinescu et al. (2007) apresenta resultados interessantes no fluxo de trânsito devido a utilização de um sistema car-to-car communication. A proposta do trabalho de Grandinescu et al. (2007) é examinar a possibilidade de se utilizar um semáforo com tempo adaptativo baseado em informações transmitidas pelos veículos. Assim como o trabalho de Tielert et al. (2010), o autor limita-se a simulações computacionais, de forma que não há a presença de um sistema físico implementado. Logo, o autor assume que os veículos são equipados com um dispositivo WI-FI de baixo alcance, além de supor a presença de um nó principal no semáforo. Essa configuração, constitui uma rede AD-ROC veicular, também conhecida como VANET (Veicular Ad-Roc networks) (GRADINESCU et al., 2007).

Grande parte dos trabalhos sobre semáforos com tempos adaptativos são baseados em técnicas de otimização que utilizam detectores de fila presentes em cada interseção com semáforo. Alguns exemplos são as técnicas Split, Cycle and Offset Optimization Technique (SCOOT) e Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) que utilizam detectores que antecedem a faixa de pare do semáforo. O grande problema dessas técnicas é a falta de acurácia do sistema quando a fila de veículos cresce além do alcance dos detectores (GRADINESCU et al., 2007). Pare esses casos a utilização de semáforos adaptativos através de tecnologia WI-FI apresenta maior flexibilidade: Grandinescu et al. (2007) argumenta que o processo de decisão do semáforo é feito com uma maior quantidade de informações, visto que os veículos podem oferecer informações como posições e velocidades. A primeira característica principal do sistema proposto pelo autor é a troca de informações entre os veículos. Cada pacote transmitido contém informações como posição, número de identificação, velocidade, entre outras. Os semáforos escutam a troca de informações entre os veículos e utilizam essas informações para descobrir a superlotação da

interseção. Caso um novo veículo aproxime-se da interseção, o primeiro pacote recebido pelo semáforo é armazenado na memória e seus dados são considerados no próximo cálculo de parâmetros (superlotação, tempos de estado verde e estado vermelho). A segunda característica do sistema é devido a suposição de troca de informações entre semáforos subsequentes. Através de uma rede cabeada os semáforos podem compartilhar informações complementares como, por exemplo, posições e velocidades dos veículos que estão entre os semáforos. Dessa forma, o semáforo subsequente consegue determinar antecipadamente os parâmetros mencionados acima. Grandinescu et al. (2007) argumenta que existem muitos modelos matemáticos baseados no comportamento do condutor e dados estatísticos para o cálculo das métricas do semáforo. Porém, conforme mencionado pelo autor, muitas vezes esses modelos podem apresentar erros significantes, visto que em uma situação real as características do trânsito dependem de um número elevado de variáveis dificilmente consideradas nesses modelos. Dessa forma, a utilização de um sistema de comunicação WI-FI mostra benefícios se comparado a utilização de tais modelos, visto dados reais do fluxo de interseção são considerados para o cálculo das métricas do semáforo.

A simulação do sistema VANET proposto por Grandinescu et al. (2007) utiliza um simulador que integra simulação de mobilidade veicular e transmissão WI-FI desenvolvido pelo próprio autor. O autor não disponibiliza o simulador desenvolvido, porém apresenta suas principais características. Uma consideração importante quanto ao simulador proposto pelo autor é a consideração de fenômenos que afetam a propagação das ondas de rádio, como perda de percurso, atenuação e sombreamento. O simulador preocupasse principalmente com o fenômeno de perda de percurso, visto que atenua a potência do sinal no espaço. Dessa forma o simulador considera dois modos de propagação: um modo em espaço livre e outro modo que considera a perda de percurso devido a reflexão do sinal na superfície da terra. O resultado do sistema simulado por Grandinescu et al. (2007) é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Diferença de tempo devido a aplicação de VANET



Fonte: Grandinescu et al. (2007)

Control delay é a diferença do tempo de viagem do veículo entre um caminho sem a presença da interseção e com a presença da interseção com semáforo. A simulação da Figura 3 mostra o resultado para um sistema de semáforo com tempo fixo, tempo adaptativo ideal (sem perda de percurso) e tempo adaptativo real (com perda de percurso). Podemos observar que o semáforo se recupera do congestionamento mais rapidamente para a condição com tempo adaptativo se comparado com a condição com tempo fixo. Para esse caso, o sistema apresenta melhoria de 28,3% no tempo de espera dos veículos no semáforo (GRADINESCU et al., 2007). Além disso, o semáforo com tempo adaptativo real demora um pouco mais de tempo para se recuperar do congestionamento que o sinal com tempo adaptativo ideal, o que evidencia a presença do fenômeno da perda de percurso no sistema. A última consideração importante do trabalho de Grandinescu et al. (2007) é o desempenho do sistema com relação ao consumo de combustível e emissões. A Tabela 1 sumariza esses resultados, onde pode-se observar que o sistema proposto é relativamente melhor que o sistema de semáforos com tempos fixos.

Tabela 1 - Semáforo tempo fixo vs semáforo tempo adaptativo

	Tempo de espera (h)	Consumo de combustível (L)	CO (Kg)
Semáforo tempo fixo	539,5	1597,7	334,4
Semáforo tempo adaptativo	386,3	1572,6	321,9
Benefícios	28,3%	6,5%	6,5%

Fonte: Adaptado de Grandinescu et al. (2007)

Por fim, o último trabalho que referenciaremos será o proposto por Asadi (2010). Esse trabalho baseia-se na previsão do estado futuro de semáforos para a redução de combustível e tempo de viagem. Asadi (2010) preocupa-se principalmente com a validação dos algoritmos propostos, de forma que protocolos, tecnologias, fenômenos e requisitos de comunicação não são apresentados pelo autor. O objetivo do trabalho de Asadi (2010) é encontrar a melhor velocidade do veículo para que os tempos devido a presença de semáforos sejam reduzidos. O autor argumenta que a dinâmica de troca de estados do semáforo produz um problema de otimização com espaço não convexo. A solução de problemas de otimização com espaço de valores válidos não convexo demanda elevado esforço computacional e não garante que o valor global ótimo seja atingido (ASADI, 2010). Para contornar esse problema, o autor propõe a utilização de uma velocidade de referência a ser visada pelo algoritmo. Dessa forma, a solução final pode não ser ótima, mas pode ser implementada em tempo real sem muito esforço computacional.

A velocidade de referência proposta pelo autor pode ser determinada com base na velocidade instantânea do veículo e nos dados recebidos pelo próximo semáforo. Dessa forma, o veículo deve aumentar a velocidade até um valor máximo permitido (v_{max}), quando há tempo no estado verde suficiente para passar o cruzamento ou diminuir, até um valor mínimo permitido (v_{min}), para chegar ao próximo estado verde. O algoritmo proposto pelo autor assume que a distância (d) entre veículo e semáforo seja conhecida durante a aproximação do veículo ao cruzamento, além de supor que o semáforo transmite regularmente os tempos para seus próximos estados verde e

vermelho. Um exemplo dos dados transmitidos pelo semáforo é apresentado pela igualdade:

$$[g_{11}, r_{11}, g_{12}, r_{12}, g_{13}, \dots] = [40, 100, 150, 200, 240, \dots]$$

Onde " g_{ij} " é o tempo de início do estado verde do ciclo " j " do semáforo " i " e " r_{ij} " é o tempo de início do estado vermelho do ciclo " j " do semáforo " i ". A igualdade indica que o semáforo está atualmente no estado vermelho. Seu próximo estado verde ocorrerá em 40 segundos, vermelho novamente em 100 segundos e assim sucessivamente (ASADI, 2010). A determinação da velocidade de referência é feita mediante os passos:

1. Para o veículo passar pelo primeiro semáforo no primeiro estado verde sua velocidade deve estar dentro do intervalo $\left[\frac{d}{r_{11}}, \frac{d}{g_{11}}\right]$. Dessa forma, caso esse intervalo seja vazio, passar pelo semáforo durante o primeiro estado verde sem parar torna-se impossível (ASADI, 2010). Nesse caso, o próximo ciclo do semáforo deve ser checado e assim sucessivamente até que um intervalo $\left[\frac{d}{r_{1j}}, \frac{d}{g_{1j}}\right]$ não seja vazio. O conjunto de valores que viabilizam o cruzamento do veículo sem parar em um estado vermelho é caracterizado por:

$$\left[\frac{d}{r_{1i}}, \frac{d}{g_{1i}}\right] \cap [v_{min}, v_{max}]$$

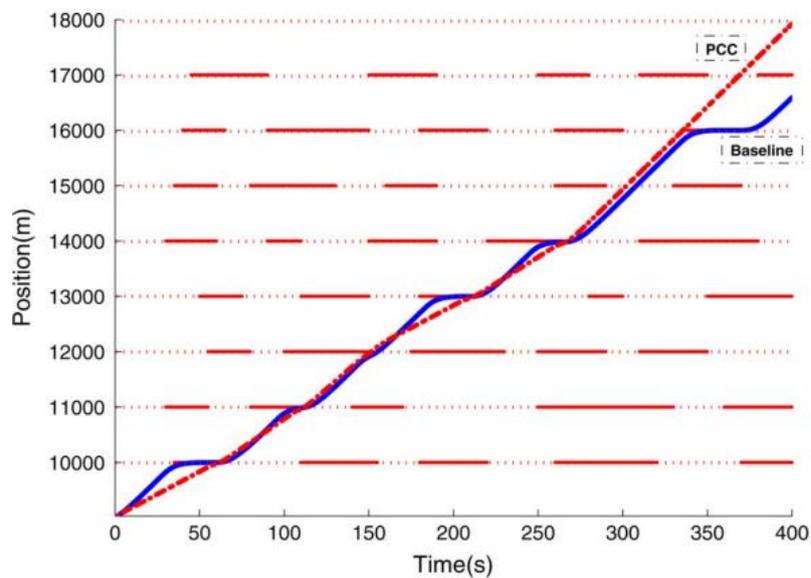
2. Caso passar pelo primeiro semáforo sem parar seja viável o processo definido no passo 1 é repetido para o segundo semáforo;

3. Caso passar por ambos os semáforos sem parar em estado vermelho seja viável, então a existência de um intervalo $[v_{low}, v_{high}]$ que possibilite a travessia em ambos os semáforos com velocidade constante pode ser avaliada. Contudo, caso o intervalo $[v_{low}, v_{high}]$ seja vazio, não significa que uma parada em estado vermelho seja inevitável, mas indica que o veículo deve ajustar sua velocidade entre os semáforos (ASADI, 2010);

4. O processo é repetido para os semáforos subsequentes até que uma parada em estado vermelho seja inevitável.

Para validar o sistema proposto, Asadi (2010) considerou um cenário de comunicação com apenas um único veículo e 10 semáforos subsequentes distantes de 1Km, limites de velocidade superior de 30Km/h e velocidade inferior de 0Km/h. A Figura 3 abaixo apresenta os resultados da simulação. Onde as linhas vermelhas na horizontal representam os estados vermelhos dos semáforos. A curva vermelha tracejada representa um veículo equipado com o sistema proposto e a linha azul um veículo base sem o sistema.

Figura 4 - Simulação de sistema com controle de velocidades



Fonte: Asadi, Vahidi (2010)

Nessa figura pode-se observar que o veículo equipado com o sistema percorreu aproximadamente 1500m a mais que o veículo base (ASADI, 2010). O consumo de combustível e emissões são ilustrados na Tabela 2, onde pode-se observar que o consumo e emissões foi reduzido em 47% e 56% respectivamente (ASADI, 2010)

Tabela 2 - consumo e emissões do sistema com controle de velocidades

	Sistema com controle de velocidade	Veículo base
Economia de combustível (milhas/galão)	28,72	19,22

Emissão de CO2 (g/milha)	290	453
-----------------------------	-----	-----

Fonte: Adaptado de Asadi, Vahidi (2010)

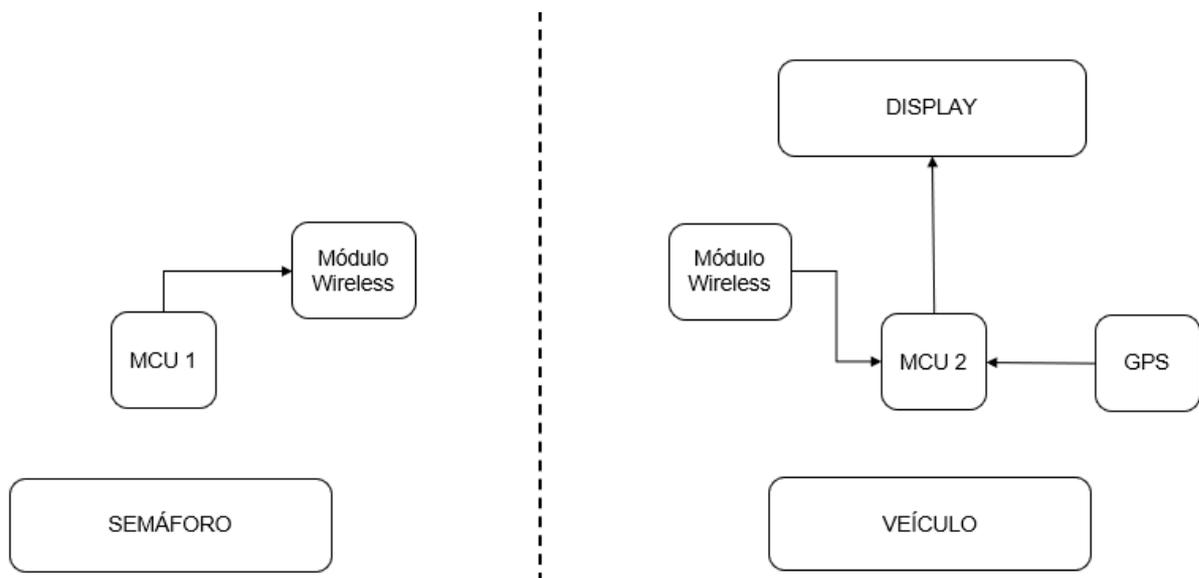
3 METODOLOGIA

Para a implementação do sistema de comunicação veicular com semáforos buscamos dividir esse capítulo em 3 subdivisões principais: Primeiro apresentamos uma descrição detalhada do sistema a ser implementado. Em seguida levantamos os requisitos necessários para a implementação do projeto e apresentamos os componentes e tecnologias utilizadas e, finalmente, detalhamos a implementação do sistema.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Conforme mencionado anteriormente, esse projeto baseia-se principalmente no trabalho de Asadi (2010), porém também tomamos o cuidado para não excluir a possibilidade de expansão do projeto de forma a incorporar características relevantes dos demais trabalhos mencionados, como a comunicação entre veículos e troca de informações entre semáforos mencionada por Grandinescu et al. (2007). Dessa forma, nosso sistema parte de duas características principais: Comunicação entre veículo e semáforo e apresentação de velocidades ao condutor. Uma ilustração da topologia do sistema pode ser visualizada na Figura 5. Podemos observar que o sistema considera a implementação de dois módulos principais. Um para o semáforo e outro para o veículo.

Figura 5 - Topologia



Fonte: o autor

O funcionamento do sistema começa com a transmissão de pacotes periódicos pelo semáforo. Nesses pacotes informações dos próximos estados, limites de velocidade da rodovia e posição do semáforo são transmitidas. Essas informações são gerenciadas por uma unidade de processamento (MCU 1) e transmitidas via um módulo wireless. O datagrama dos pacotes transmitidos é definido como:

$$[g_{11}, r_{11}, g_{12}, r_{12}, r_{13} \dots, Lat, Long, v_{max}]$$

Onde " g_{ij} " e " r_{ij} " são os mesmos determinados no trabalho de Asadi, (2010), " Lat " e " $Long$ " são respectivamente a latitude e longitude do semáforo e " v_{max} " o limite de velocidade superior da rodovia.

Os pacotes transmitidos são interceptados por um segundo módulo wireless presente no veículo. Uma segunda unidade de processamento (MCU 2) é responsável por ler as informações recebidas, calcular a velocidade ideal do veículo e apresentar os resultados ao condutor (esse trabalho não contempla o controle de velocidade do veículo). O cálculo da velocidade ideal do veículo é realizado exatamente conforme apresentado por Asadi (2010). Onde se determina o conjunto de valores válidos da expressão

$\left[\frac{d}{r_{1i}}, \frac{d}{g_{1i}}\right] \cap [v_{min}, v_{max}]$. Para esse projeto consideramos " v_{min} " um valor fixo e já conhecido pelo veículo (5km/h por exemplo), porém, esse dado pode ser facilmente incorporado ao datagrama do semáforo caso seja desejado. As informações de posição do veículo são coletadas através de um módulo GPS. Por fim, os resultados dos cálculos de velocidades são apresentados ao condutor através de um display.

3.2 REQUISITOS NECESSÁRIOS

Uma vez descrito o comportamento do sistema podemos determinar os principais requisitos para a elaboração do protótipo e escolher os componentes e tecnologias a serem utilizados. A topologia da Figura 5 sugere que devemos escolher dois componentes principais (tecnologia de comunicação e microcontrolador) e demais componentes secundários (display e módulo GPS). Para a escolha desses componentes é necessário definir o cenário de validação do sistema, visto que os componentes escolhidos devem suprir os requisitos do cenário. Dessa forma consideramos que o sistema seria validado para uma configuração de linha de visada direta composta por um único veículo presente em uma rodovia com um único semáforo de tempo fixo. A escolha desse cenário visa eliminar características e restrições do sistema que possam desviar o esforço principal desse trabalho, como interferências de comunicação entre veículos, segurança do sistema e mudanças de estado do semáforo adaptativas. Tais características podem ser adicionadas ao sistema em trabalhos futuros.

3.2.1 MICROCONTROLADORES

Para a determinação do microcontrolador utilizado no projeto buscamos olhar para dois requisitos principais: memória do dispositivo e processamento. Conforme mencionado na subdivisão anterior, o funcionamento do sistema baseia-se nos pacotes periódicos transmitidos pelo semáforo. Logo, o microcontrolador utilizado precisa ter memória suficiente para armazenar os dados recebidos. O número de bits utilizado em cada campo do datagrama dos pacotes pode ser visualizado na expressão:

$$[g_{11}, r_{11}, g_{12}, r_{12}, g_{13}, r_{13}, Lat, Long, v_{max}] \rightarrow [10,10,10,10,10,10,64,64,10]bits$$

Para a mensuração do microcontrolador consideramos que o semáforo enviaria dados dos próximos três ciclos subsequentes. A utilização de 10 bits para os tempos dos próximos ciclos permite a representação de valores entre 0 e 1023, visto que $2^{10} = 1024$. Isso significa que ao representar os tempos dos estados do semáforo em segundos, podemos prever o estado do semáforo com 1023 segundos de antecedência (aproximadamente 17 minutos), o que vai ser suficiente para a aplicação desse projeto. Os campos de latitude e longitude possuem tamanho de 64 bits. Esses valores foram escolhidos como parâmetros de mensuração inicial do microcontrolador. Esses campos exigem maior número de bits, visto que a latitude e longitude são números fracionários com sinal, o que implica na necessidade de sua representação em complemento de dois. A precisão da posição de um determinado objeto em função de sua latitude e longitude está diretamente ligado ao número de casas decimais utilizado na representação desses valores. A Tabela 3 apresenta a precisão da posição de um objeto em metros em função do número de casas decimais utilizadas.

Tabela 3 - Precisão Latitude e Longitude

Precisão (graus decimais)	Distância do equador (metros)	Escala qualitativa que pode ser identificada
0,1	11131,96m	Grande cidade ou distrito
0,01	1113,195m	Vila ou aldeia
0,001	111,319m	Bairro, rua
0,0001	11,131m	Ruas individuais, propriedades particulares
0,00001	1,113m	Árvores individuais
0,000001	0,111m	Humanos individuais

Fonte: Adaptado de Bornemann (2016)

Para nossa aplicação a utilização de 6 casas decimais na representação da latitude e longitude é suficiente. Nesse caso, a representação de 0,000001 em binário

utilizando 32 bits fornece 0,0000009998, o que mostra que os 64 bits disponíveis para esse campo estão suficientes para a aplicação. Outro número de bits que também é utilizado apenas como parâmetro de mensuração do microcontrolador são os 10 bits reservados para o campo de velocidade máxima da rodovia. As rodovias em que o protótipo será submetido jamais terão limite de velocidade de 1023 (valor máximo que pode ser representado com essa quantidade de bits).

Definido o número de bits utilizado em cada campo do datagrama, podemos agora determinar o requisito de memória do dispositivo a ser utilizado. Somando os bits de cada campo do datagrama vemos que o microcontrolador precisa ser capaz de armazenar dados no tamanho de até 198 bits. A memória do dispositivo é o principal requisito para a escolha do microcontrolador, caso este requisito não seja satisfeito, o sistema jamais será capaz de processar todos os campos presentes no datagrama dos dados transmitidos pelo semáforo.

O requisito de processamento do microcontrolador não impacta de forma a impedir o funcionamento do sistema, porém aprimora e viabiliza a utilização do projeto. Para determinar a capacidade de processamento necessária do microcontrolador podemos olhar para a arquitetura, velocidade de Clock e número de bits dos registradores do dispositivo. O principal impacto do requisito de processamento no protótipo resume-se ao tempo que o dispositivo levará desde o momento em que os dados foram recebidos até o fim do cálculo de velocidades. Esse tempo é importante pois a distância que o veículo percorrerá nesse intervalo pode gerar falhas no funcionamento do projeto. Nesse caso, a confiabilidade do protótipo é maior quando o intervalo de processamento é mínimo. O segmento mais popular de microcontroladores presentes no mercado apresenta registradores de 8 bits e arquitetura RISC. Estimar o número de ciclos de Clock que serão necessários até o fim do cálculo de velocidades pode ser complexo, visto que esse número não depende apenas da arquitetura utilizada pelo microcontrolador, mas também de características específicas de cada dispositivo. Nesse caso, uma estratégia que pode ser utilizada como parâmetro de mensuração inicial é escolher um valor máximo permitido para o tempo de processamento e calcular a frequência de Clock para o melhor caso do número de ciclos de Clock necessários. Para isso, consideramos que o intervalo de processamento não ultrapassasse o valor de 1ms. Supomos que a velocidade ideal do veículo fosse calculada em 1 ciclo de Clock (melhor caso) e utilizamos o tamanho

dos pacotes transmitidos pelo semáforo como dados a serem processados. A frequência de Clock (f) necessária para essa configuração pode ser determinada por:

$$t_{proc} = \frac{d}{n_b C f} \Rightarrow f = \frac{d}{n_b C t_{proc}} = \frac{198}{8 \times 1 \times 1m} = 24,75KHz$$

Onde " t_{proc} " é o intervalo de processamento em segundos, " d " é o tamanho dos dados em bits, " n_b " o número de bits do microcontrolador e " C " o número de ciclos de Clock. Conforme mencionado anteriormente, o cálculo exato do intervalo de processamento depende de variáveis que não são consideradas nessa equação, como intervalo de decodificação dos dados, tempo de leitura, entre outros.

Com os requisitos de memória e processamento do microcontrolador definidos, podemos agora olhar para as especificações dos microcontroladores disponíveis no mercado. A Tabela 4 resume os requisitos necessários.

Tabela 4 - Requisitos microcontrolador

Memória	>198 bits
Frequência de clock	>24,75KHz
Número de bits dos registradores	8 bits

Fonte: O autor

Não faz parte do escopo desse trabalho detalhar as especificações técnicas de todos os dispositivos disponíveis. Invés disso, buscamos exemplificar em uma tabela as especificações dos microcontroladores que impactam diretamente na realização do projeto. Para otimizar a busca e também devido a acessibilidade, maturidade, robustez e quantidade de material didático disponível, restringimos nossa pesquisa aos microcontroladores mais populares presentes no mercado. Dessa forma, cobrimos quatro microcontroladores diferentes: MSP430G, Esp32, Ateмега328p e PIC16. As especificações de cada microcontrolador são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações técnicas microcontroladores

Microcontrolador	Arquitetura	Clock	Memória

ATmega328P (Arduino Uno)	8-bit RISC	16Mhz	2KB
MSP430G2553	16-bit RISC	16Mhz	512B RAM
Esp32	32-bit RISC	240Mhz	520KB SRAM
PIC16F84A	8-bit RISC	20Mhz	68B RAM

Fonte: O autor

Exceto pelo microcontrolador PIC que apresenta uma baixa especificação de memória, todos os demais microcontroladores cumprem os requisitos do projeto. Pode-se observar que o microcontrolador Esp32 apresenta melhores requisitos de memória e processamento se comparado com os demais. Para esse projeto, optamos por utilizar a placa de desenvolvido Arduino Uno com o microcontrolador Atmega328p embarcado. Porém, a Tabela 5 apresenta alternativas de microcontroladores que podem ser empregados em trabalhos futuros, visando aumentar o desempenho, viabilidade e capitalização do projeto.

3.2.2 TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO

Para determinar a tecnologia de comunicação a ser utilizada podemos considerar dois requisitos principais: distância necessária de comunicação e taxa de transmissão de dados. O requisito de distância de comunicação vem do trabalho de Tielert et al. (2010), onde consideramos uma distância de comunicação inicial de 400m (maior economia de combustível). Já o requisito de taxa de transmissão de dados pode ser determinado através do tamanho dos pacotes a serem transmitidos pelo semáforo. Nesse caso, como os pacotes possuem tamanho de 198 bits, uma taxa de transmissão de 1kbps pode ser utilizada como parâmetro de mensuração da tecnologia de comunicação. Assim como os microcontroladores, restringimos nossas buscas aos módulos de comunicação sem fio mais populares presentes no mercado, cobrindo as tecnologias WI-FI, Lora, Bluetooth e Zigbee. A Tabela 6 apresenta as principais características de cada módulo.

Tabela 6 - Especificações técnicas tecnologias de comunicação sem fio

Tecnologia	Alcance	Taxa de transmissão
Lora 1276 (915Mhz – homologado no Brasil)	4Km	1.2-300 Kbps
Zigbee cc2035	100m	250Kbps
Nrf24l01 PA NA	750m	250kbps
XBee-PRO Xbp24-z7uit-004	750m	250kbps
Bluetooth HC-05	10m	1Mbps

Fonte: O autor

Podemos observar que todos os módulos cumprem com o requisito de taxa de transmissão. Porém, os módulos Zigbee cc2035 e HC-05 são excluídos por não apresentarem a distância de comunicação necessária. Para esse trabalho utilizamos o módulo Nrf24l01 PA NA por apresentar características satisfatórias de taxa de transmissão e alcance. Porém, outra alternativa poderia ser a utilização do módulo Lora 1276 visto que essa tecnologia também satisfaz os requisitos do projeto.

3.2.3 MÓDULOS SECUNDÁRIOS

Uma vez determinado os módulos principais precisamos agora determinar os módulos secundários utilizados no projeto, como o GPS e o display. Diferentemente dos componentes principais não vamos levantar as características dos principais componentes secundários presentes no mercado. Invés disso utilizaremos os componentes conforme sua disponibilidade, visto que esses componentes podem ser facilmente intercambiáveis. Dessa forma utilizamos como GPS o módulo GPS neo-6M, com acurácia horizontal de 2,5m e o display LCD 16x2 JHD162a.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO

A terceira parte dessa metodologia dedicasse a implementação do projeto proposto. Buscamos apresentar essa etapa dividindo esta subdivisão em quatro itens distintos: Hardware, software, placa dedicada e encapsulamento e testes. No primeiro item apresentamos as conexões entre os módulos, circuitos de alimentação e circuito de condicionamento do microcontrolador. O item seguinte dedica-se a implementação de algoritmos e descrição de protocolos utilizados no protótipo. Na sequência apresentaremos a placa dedicada do circuito e encapsulamento do protótipo e, finalmente, apresentamos os testes realizados.

3.3.1 HARDWARE

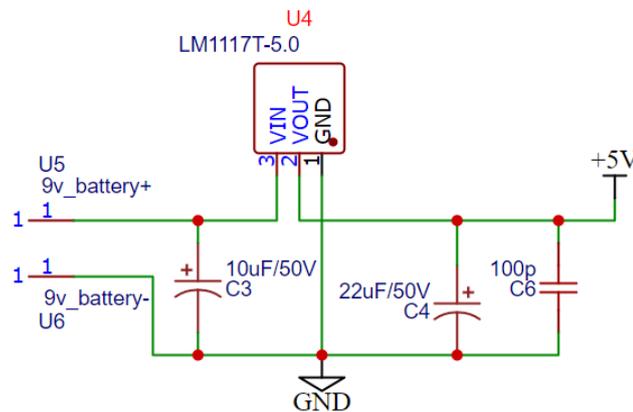
3.3.1.1 CIRCUITO DE ACIONAMENTO

Iniciamos nosso protótipo determinando os circuitos de alimentação necessários para cada módulo. Como os módulos presentes no semáforo (transmissor) são iguais aos módulos do veículo (receptor) (exceção para o GPS e display) podemos determinar os circuitos de alimentação necessários do receptor e utilizar os mesmos circuitos para o transmissor. O esquemático completo do módulo transmissor é disponibilizado no Apêndice A, enquanto o esquemático completo do módulo receptor é disponibilizado no Apêndice B. As especificações técnicas do GPS neo-6M, Atmega328p e display LCD 16x2 JHD162a apresentam tensão de alimentação de 5v. Uma vez que o protótipo estaria em movimento foi necessário a utilização de uma fonte de energia primária proveniente de uma bateria, logo consideramos a utilização de uma bateria de 9v de 450mAh como fonte principal de energia. A corrente drenada em cada módulo especificada pelo fabricante é de 10mA para o GPS e Atmega328p e 20mA para o display LCD, o que implica no período de funcionamento do protótipo:

$$t_{ativo} = \frac{450mAh}{(10 + 10 + 20)mA} = 15horas$$

Como a tensão fornecida pela bateria é de 9v, um circuito conversor de 9v para 5v foi necessário. Nosso circuito foi confeccionado baseado no conversor LM1117T-5.0, que fornece tensão de saída de 5v para tensões de entrada de até 15v. O esquemático do circuito de alimentação de 5v pode ser visualizado na Figura 6. Onde utilizamos capacitores como filtros de entrada e saída para reduzir tensões de ripple e eliminar harmônicos conforme sugerido pelo fabricante (“LM1117 800-mA, Low-Dropout Linear Regulator”, 2023).

Figura 6 - Circuito de alimentação de 5v



Fonte: O autor

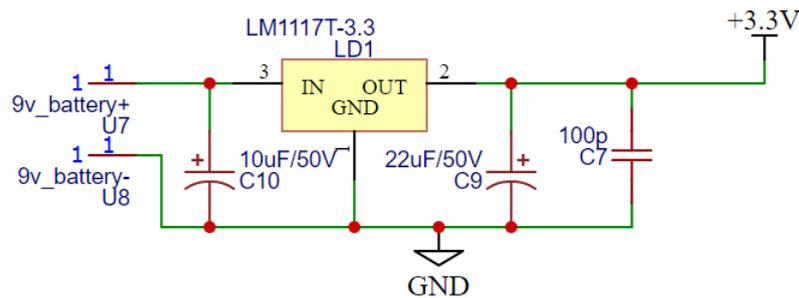
Diferente dos componentes alimentados pelo circuito de 5v as especificações técnicas do modulo Nrf24l01 PA NA indicam tensão de entrada de 3,3v. O circuito conversor de 9v para 3,3v utilizado para alimentar esse modulo pode ser visualizado na Figura 7. Nesse circuito utilizamos o conversor LM1117-3.3 que fornece tensão de saída de 3,3v para tensões de entrada de até 15v. Os capacitores utilizados possuem as mesmas finalidades dos capacitores do circuito de alimentação de 5v. A potência dissipada no componente quando comunicando em longa distância é de cerca de 13mA. Utilizando a mesma fonte primaria dos componentes de 5v o período de funcionamento do protótipo seria reduzido:

$$t_{ativo} = \frac{450mAH}{(10 + 10 + 20 + 13)mA} = 8,5 \text{ horas}$$

Dessa forma, para aumentar o período de funcionamento do protótipo optamos por utilizar uma bateria dedicada ao módulo RF. A utilização de uma fonte de energia

independente para esse módulo não apenas aumenta o período de funcionamento do protótipo, mas também reduz problemas relacionados a sensibilidade do componente a variações na tensão de entrada (NEDELKOVSKI, 2022b), visto que menos cargas estão conectadas a fonte.

Figura 7 - Circuito de alimentação de 3,3v



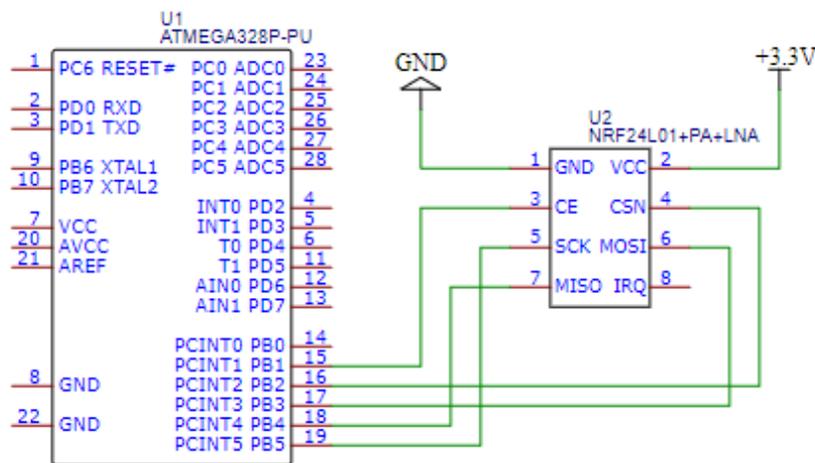
Fonte: O autor

3.3.1.2 CONEXÕES ENTRE MÓDULOS

Uma vez determinado os circuitos de alimentação buscamos realizar as conexões necessárias entre os diferentes módulos do protótipo. Novamente apresentaremos as conexões presentes apenas no módulo receptor, visto que essas conexões podem ser facilmente expandidas para os componentes do módulo transmissor. A topologia da Figura 5 sugere que os módulos GPS, LCD e RF apresentam conexões com o microcontrolador. Dessa forma, iniciamos as conexões olhando primeiramente para o módulo RF. O módulo Nrf24I01 PA NA utiliza um tipo de comunicação síncrona denominado SPI (Serial Peripheral Interface). Nosso sistema demanda uma comunicação SPI apenas entre dois componentes distintos: um Master (microcontrolador) e outro Slave (módulo RF), porém a comunicação SPI apresenta inúmeras características e modos de operação, como, por exemplo, a comunicação entre um componente Master e diversos componentes Slave. Em seu modo de operação mais simples a comunicação SPI utiliza quatro barramentos de comunicação: um para a comunicação de Master para Slave (MOSI); outro para comunicação de Slave para Master (MISO); outro para seleção do Slave (CSN) e um último para o sinal de Clock (SCK) que garante a sincronização da comunicação. Além dos quatro pinos de comunicação SPI o módulo Nrf24I01 PA NA também apresenta

outros quatro pinos distintos: dois utilizados para alimentação (VCC e GND, VCC= 3,3v), outro para seleção do modo de operação (CE, transmissor ou receptor) e um último para gerar interrupções no Master (IRQ). As conexões entre o módulo RF e o Atmega328p podem ser visualizadas na Figura 8. Os pinos para comunicação SPI são restritos aos pinos 16 (CSN), 17 (MOSI), 18 (MISO) e 19 (SCK) do Atmega328p, porém os demais pinos IRQ e CE podem ser arbitrados. Nesse projeto não consideramos a utilização da função presente no pino IRQ visto que o escopo principal desse trabalho enfatiza a comunicação entre veículo e semáforo e apresentação de velocidades sugeridas ao condutor.

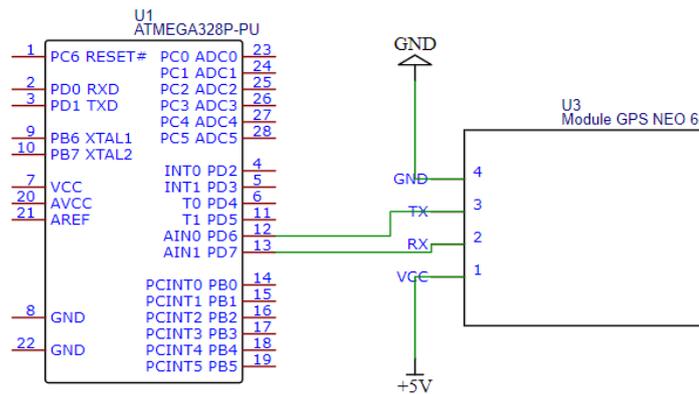
Figura 8 - Conexões entre Atmega328p e módulo Nrf24l01 PA NA



Fonte: O autor

O segundo componente que possui conexões com o microcontrolador é o módulo GPS neo-6M. Diferentemente do módulo RF o módulo GPS comunica-se com o microcontrolador através de uma comunicação serial assíncrona chamada UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). Esse tipo de comunicação não necessita um barramento de Clock para sincronização. Dessa forma apenas dois barramentos de dados são necessários para a comunicação: um para o transmissor (TX) e outro para o receptor (RX). Não há pinos restritos do Atmega328p para comunicação UART, visto que qualquer pino de entrada e saída pode ser facilmente configura para essa função. A Figura 9 apresenta as conexões entre o microcontrolador e o módulo GPS. Além dos pinos UART o módulo GPS também apresenta dois pinos de alimentação (VCC e GND, VCC=5v).

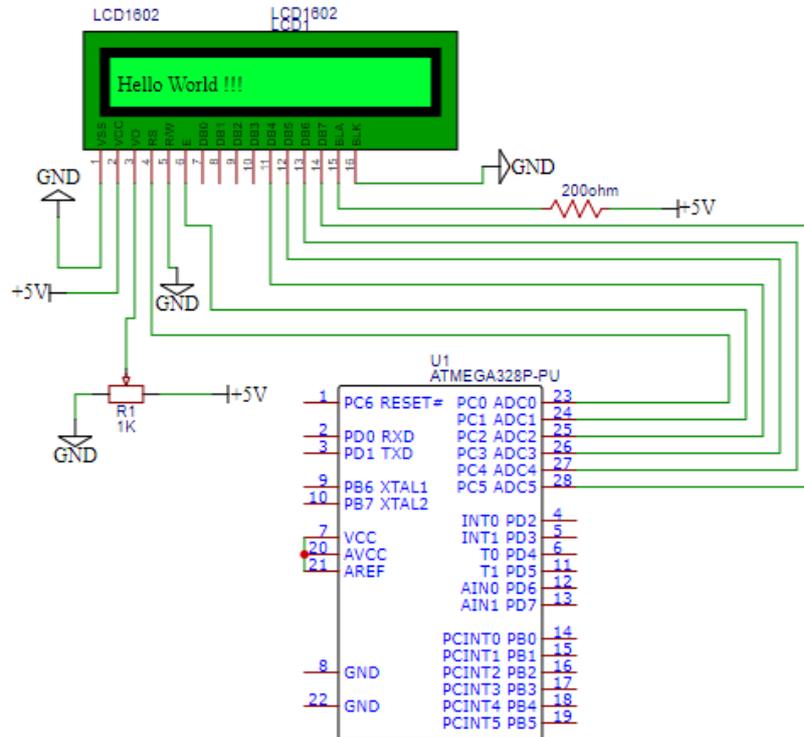
Figura 9 - Conexões Atmega328p e módulo GPS neo-6M



Fonte: O autor

Por fim o ultimo componente conectado ao microcontrolador é o módulo LCD. As conexões com o módulo LCD não utilizam um padrão popular de comunicação. Invés disso, os dados são transferidos em pacotes de 8 bits através de 8 barramentos de entrada (DB0 a DB7). Felizmente o módulo LCD 16x2 JHD162a permite a transmissão de dados através de apenas quadro dos oito barramentos disponíveis. Nesse modo, os pacotes de 8 bits são divididos em duas partes, onde o envio sequencial dos quatro bits menos significativos seguido dos quatro bits mais significativos ocorre. Além dos barramentos de dados o módulo LCD 16x2 JHD162a também apresenta três pinos de alimentação e controle de contraste (VCC, GND e Contrast Control (V_o)), dois pinos de alimentação da luz de fundo (LED positive (BLA) e LED negative (BLK)) e outros três pinos de configuração (Enable (E), Write/Read (R/W) e Register Select (RS)) que podem ser utilizados para: habilitar a transferência de dados entre o microcontrolador e o LCD (pino E); alternar entre os modos de escrita e leitura (pino R/W) e indicar se dados ou comandos estão sendo transmitidos pelos barramentos (pino RS). As conexões do módulo LCD com o Atmega328p podem ser visualizadas na Figura 10.

Figura 10 - Conexões Atmega328p e módulo LCD



Fonte: O autor

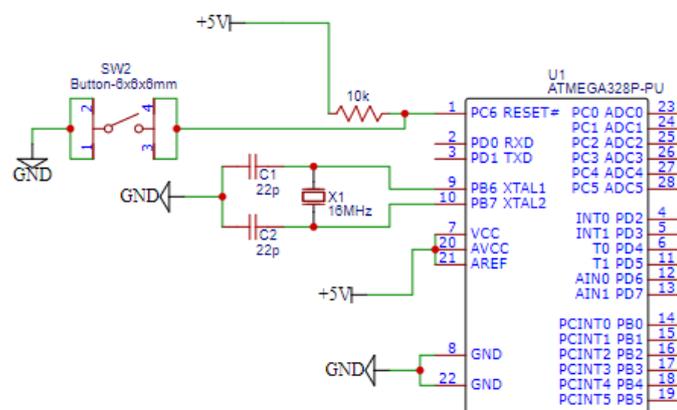
O controle de contraste do LCD ocorre através da variação da tensão no pino “ V_0 ”. Dessa forma um potenciômetro pode ser utilizado para o ajuste analógico do contraste conforme indicado na Figura 10. Para nossa aplicação a utilização do módulo LCD é devido a apresentação das distâncias e velocidades ao condutor. Para essa finalidade o fornecedor indica modo de operação de escrita e nível lógico baixo no pino R/W o que justifica sua conexão com o GND conforme indicado pela Figura 10. A tensão e corrente de alimentação da luz de fundo especificada pelo fornecedor é de $V_{led} = 3v$ e $I_{led} = 10mA$. Utilizando a fonte de tensão de 5v uma resistência de proteção deve ser adicionada entre o LED da luz de fundo. O valor dessa resistência pode ser definido como:

$$R_{led} = \frac{(5 - 3)v}{10mA} = 200\Omega$$

3.3.1.3 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO

Para finalizar as conexões elétricas de nosso protótipo buscamos olhar para o circuito de condicionamento do Atmega328p. Esse item não seria necessário caso o microcontrolador fosse utilizado em conjunto com a placa de desenvolvimento Arduino. Porém, como buscamos a confecção de uma placa dedica ao protótipo tal item tornasse necessária. A justificava para a utilização desse circuito é devido a alimentação, fonte de Clock utilizada pelo microcontrolador e o acesso ao pino de Reset. A tensão de alimentação especificada pelo fabricante do Atmega328p é de 5v. O mesmo também especifica frequência máxima do Clock interno de 8MHz. Logo, para frequência de 16MHz um cristal oscilador externo deve ser conectado entre os pinos XTAL1 (9) e XTAL2 (10) do componente. O acesso ao pino de reset pode ser feito através de um botão. A Figura 11 apresenta o circuito de condicionamento do Atmega328p.

Figura 11 - Circuito de condicionamento



Fonte: O autor

3.3.2 SOFTWARE

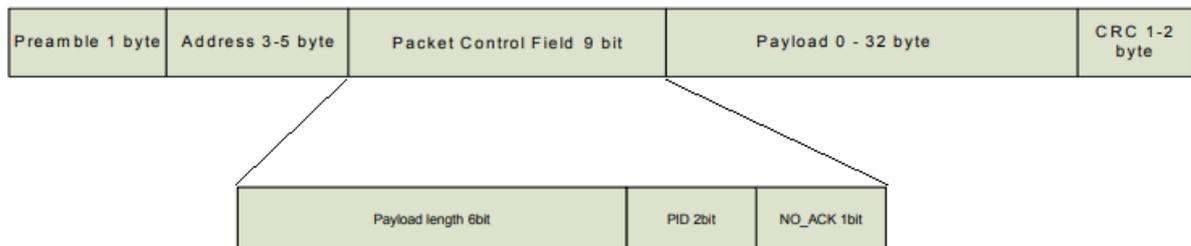
Uma vez determinado o hardware precisamos agora descrever os algoritmos e protocolos que constituíram o protótipo implementado. O primeiro item que deve ser apresentado nessa subdivisão é o protocolo de comunicação utilizado pelo módulo RF, seguido da estratégia utilizada para o cálculo de posições, algoritmos de escolha

de velocidades e compensação de erros de posição. O código fonte do transmissor pode ser encontrado no Apêndice C, enquanto o código fonte do receptor pode ser encontrado no Apêndice D. Ambos os códigos foram escritos em linguagem de programação C++ utilizando a plataforma de desenvolvimento integrada Arduino IDE.

3.3.2.1 PROTOCOLO

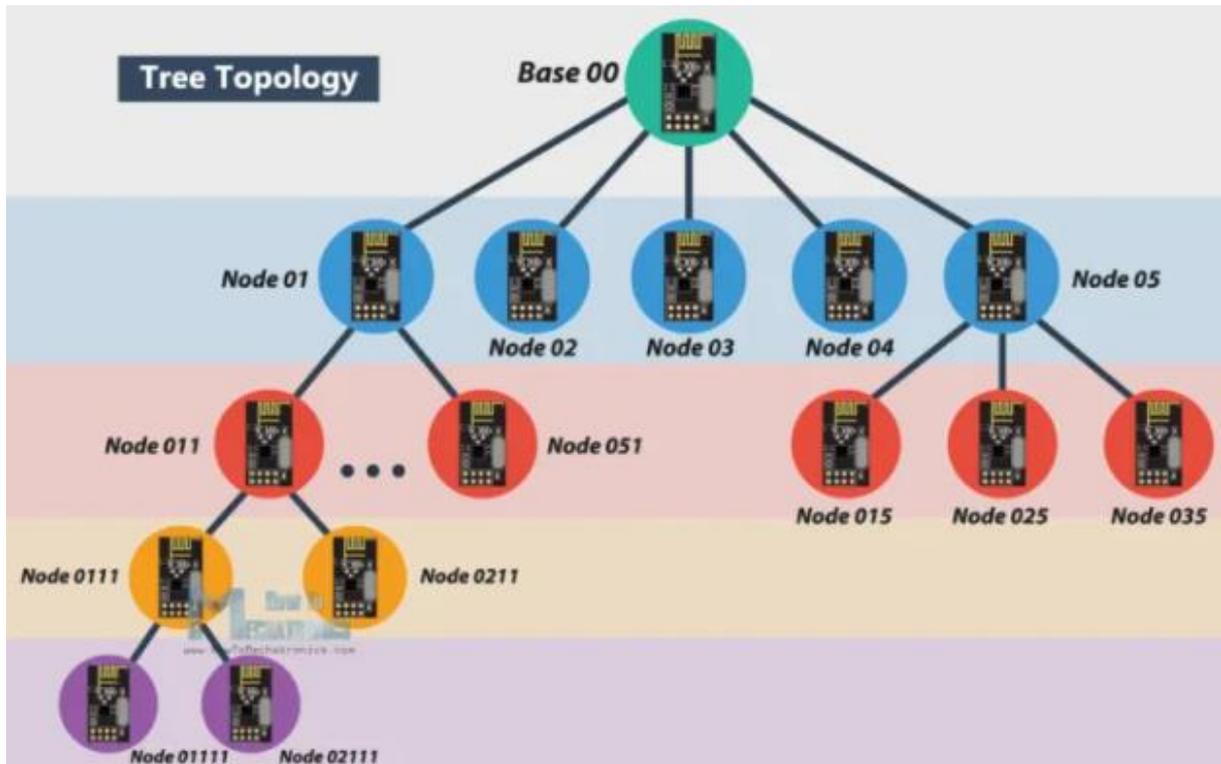
O módulo Nrf24l01 PA NA utilizada um protocolo de comunicação chamado Enhanced ShockBurst (ESB) (NORDIC, 2007) específico para aplicações de baixa potência que atende os requisitos desse projeto. Esse protocolo possui ao todo cinco campos distintos, conforme pode ser observado na Figura 12. O primeiro campo dedica-se a estabilização do demulador do receptor para o fluxo de bits de entrada. O segundo campo contém os possíveis endereços do receptor (seção 3 do Apêndice C). Esses endereços podem ter tamanho máximo de até 5 bytes. O protocolo ESB permite que um receptor escute até um máximo de 6 transmissores, o que permite a construção de topologias em árvore conforme mostra a Figura 13.

Figura 12 - Datagrama protocolo ESB



Fonte: Adaptado de Nordic (2007)

Figura 13 - Topologia em árvore



Fonte: (NEDELKOVSKI, 2022a)

O próximo campo do protocolo ESB dedica-se ao controle dos pacotes a serem transmitidos. Esse campo pode ser utilizado para controlar o tamanho dos dados a serem transmitidos (Payload Length), identificação do pacote transmitido (PID), utilizado para evitar que o mesmo pacote seja apresentado ao microcontrolador pelo receptor. E controle de tentativas de retransmissão do transmissor (NO_ACK). O protocolo ESB permite a transmissão de pacotes com tamanho máximo de 32 bytes. Para nossa aplicação o campo Payload Length é configurado para transmissão de pacotes no tamanho máximo disponível (seção 3 do Apêndice C), visto que o número de ciclos do semáforo que podem ser transmitidos é diretamente proporcional ao tamanho dos pacotes. O controle de retransmissão do campo NO_ACK é fundamentado em mensagens transmitidas pelo receptor ao transmissor denominadas Acknowledgment. Ao receber um pacote o receptor transmite um Acknowledgment ao transmissor informando que o pacote foi corretamente recebido. O transmissor aguarda o recebimento de um Acknowledgment por um tempo definido e, caso a mensagem não seja recebida, o pacote é retransmitido. Para nossa aplicação a utilização dessa função pode introduzir erros de velocidade e distância no

sistema, visto que durante o período que o transmissor aguarda confirmação de recebimento do pacote pelo receptor o veículo moveu-se e a informação contida no pacote deixa de ser verdadeira caso haja retransmissão. Dessa forma, configuramos esse campo do protocolo de forma a desativar essa função (seção 4 do Apêndice C). Os últimos dois campos do protocolo ESB dedicam-se aos dados a serem transmitidos (Payload) e verificação de erro (CRC). O campo CRC é mandatório e aplica-se aos campos endereço, controle do pacote e dados. Nenhum pacote é aceito pelo receptor caso um erro seja detectado pelo campo CRC.

3.3.2.2 CÁLCULO DE DISTÂNCIA

O cálculo de distância entre o veículo e semáforo baseia-se nas coordenadas geográficas de cada componentes. As coordenadas geográficas do semáforo são fixas e podem ser previamente determinadas com o auxílio de mapas ou GPS (seção 3 Apêndice C). Já as coordenadas do veículo são calculadas através do módulo GPS neo-6M presente no sistema (seção 5 Apêndice D). Esse módulo apresenta precisão horizontal de 2,5m que trataremos mais adiante nesse trabalho. O cálculo da distância entre dois pontos em coordenadas geográficas se dá através da fórmula de Haversine conforme apresenta a equação (AZDY; DARNIS, 2020):

$$d = 2r \operatorname{sen}^{-1} \left(\sqrt{\operatorname{sen}^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \operatorname{sen}^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

Onde " φ_1 " e " φ_2 " são as latitudes do ponto 1 e ponto 2, " λ_1 " e " λ_2 " são as longitudes do ponto 1 e ponto 2 e " r " é o raio da terra. Para salvar linhas de código e melhorar a organização do mesmo optamos por utilizar a fórmula de Haversine disponível na biblioteca TinyGPS (seção 2 Apêndice D) para o cálculo da distância entre semáforo e veículo. A apresentação da distância ao condutor através do display LCD é ilustrada na seção 5 do Apêndice D.

3.3.2.3 CÁLCULO DE VELOCIDADES

O cálculo e escolha da velocidade ideal do veículo é feito através do algoritmo definido por Asadi (2010). A determinação dessa velocidade começa com a transmissão dos pacotes pelo semáforo (seção 5 Apêndice C). Para nossa aplicação, a utilização de dois ciclos do semáforo é suficiente. Dessa forma, o datagrama dos pacotes transmitidos torna-se:

$$[g_{11}, r_{11}, g_{12}, r_{12}, Lat, Long, v_{max}]$$

Conhecida a distância (d) entre veículo e semáforo o conjunto de velocidades possíveis para atingir o semáforo no estado verde pode ser definido através do intervalo:

$$\left[\max\left(\frac{d}{r_{1i}}, v_{min}\right), \min\left(\frac{d}{g_{1i}}, V_{max}\right) \right]$$

Onde o limite inferior é definido pelo valor máximo entre o limite de velocidade mínimo da rodovia e a velocidade calculada para atingir o semáforo no instante da troca de estados de verde para vermelho. E o limite superior é definido pelo valor mínimo entre o limite de velocidade máximo da rodovia e a velocidade calculada para atingir o semáforo no instante da troca de estados de vermelho para verde. Caso o intervalo de velocidades possíveis não seja nulo, a velocidade sugerida ao motorista pode ser determinada por:

$$V_{ideal} = \max\left(\max\left(\frac{d}{r_{1i}}, v_{min}\right), \min\left(\frac{d}{g_{1i}}, V_{max}\right)\right)$$

Onde a escolha do valor máximo visa reduzir o tempo de viagem. A seção 6 do Apêndice D do anexo 2 ilustra a escolha da velocidade ideal do veículo tal como a apresentação dessas velocidades ao condutor.

3.3.2.4 COMPENSAÇÃO DE ERROS

Conforme mencionamos anteriormente o fabricante do modulo GPS neo-6M especifica acurácia horizontal de 2,5m, o que significa que a distância entre veículo e semáforo possui uma incerteza de 2,5m que deve ser considerada no cálculo da velocidade ideal. Considerando a incerteza do GPS o intervalo de velocidades possíveis torna-se:

$$\left[\max\left(\frac{d - 2,5}{r_{1i}}, v_{min}\right), \min\left(\frac{d + 2,5}{g_{1i}}, V_{max}\right) \right]$$

Supondo,

$$\max\left(\frac{d - 2,5}{r_{1i}}, v_{min}\right) = \frac{d - 2,5}{r_{1i}}$$

E

$$\min\left(\frac{d + 2,5}{g_{1i}}, V_{max}\right) = \frac{d + 2,5}{g_{1i}}$$

Então o intervalo valido torna-se:

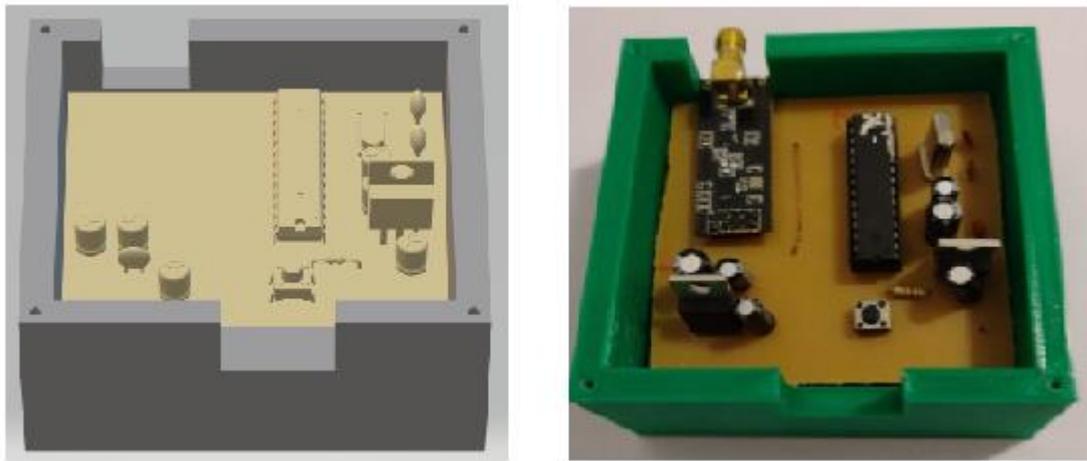
$$\left[\frac{d - 2,5}{r_{1i}}, \frac{d + 2,5}{g_{1i}} \right]$$

Logo, como $r_{1i} > g_{1i}$ qualquer valor no intervalo $\left[\frac{d+2,5}{r_{1i}}, \frac{d+2,5}{g_{1i}} \right]$ está contido dentro do intervalo $\left[\frac{d-2,5}{r_{1i}}, \frac{d+2,5}{g_{1i}} \right]$. A compensação do erro do GPS também esta ilustrada na seção 6 do Apêndice D.

3.3.3 PLACA DEDICADA E ENCAPSULAMENTO

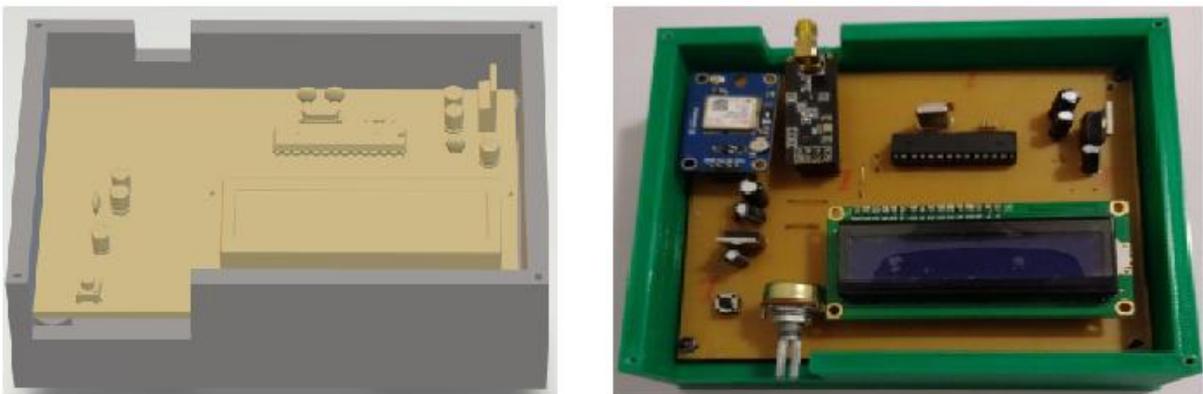
Nessa breve subdivisão buscamos apresentar a placa dedicada do sistema e o encapsulamento desenvolvido para o mesmo. A motivação para a confecção da placa de circuito impresso dedicada ao sistema e encapsulamento visou reduzir erros e ruídos devido a conexões ruins, tal como aumentar a robustez e confiabilidade do sistema. A Figura 14 apresenta a placa e encapsulamento do transmissor enquanto a Figura 15 apresenta a placa e encapsulamento do receptor.

Figura 14 - Placa dedica e encapsulamento do transmissor



Fonte: O autor

Figura 15 - Placa dedicada e encapsulamento do receptor

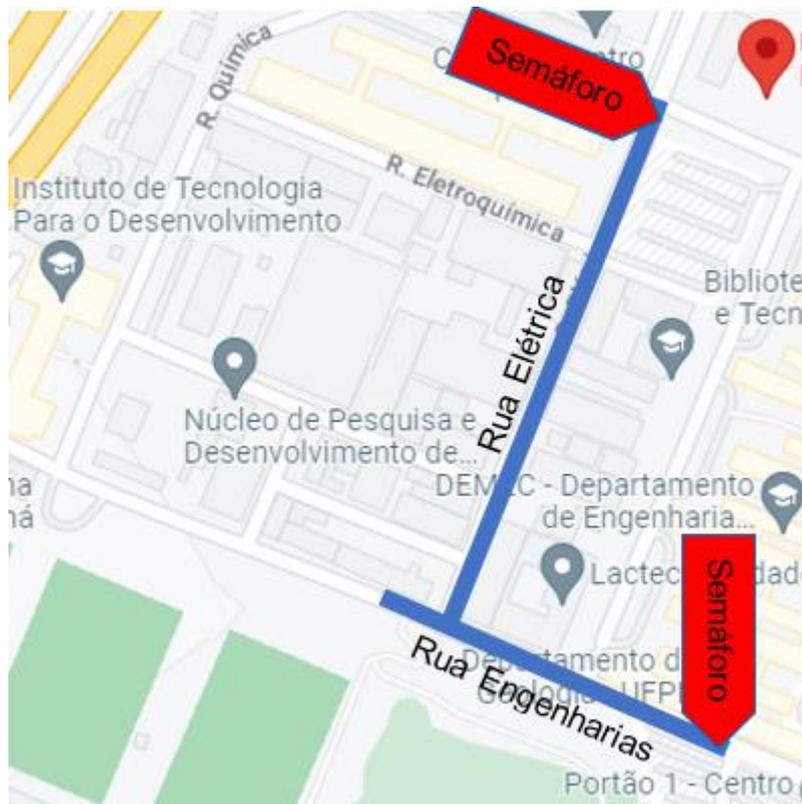


Fonte: O autor

3.3.4 TESTES REALIZADOS

A última subdivisão da nossa metodologia dedica-se a descrição dos testes realizados para validação do protótipo. A estratégia utilizada para realização dos testes visa identificar a confiabilidade das velocidades apresentadas ao condutor, tal como erros, característica e restrições do microcontrolador, módulos RF, LCD e GPS. Dessa forma concentramos nossos testes em duas ruas controladas localizadas no centro politécnico da Universidade Federal do Paraná, conforme mostra a Figura 16. A razão para escolha dessas ruas é justificada pela extensão, ausência de curvas e segurança que mais se aproximam às restrições do projeto.

Figura 16 - Cenário de teste



Fonte: Adaptado de Google Maps 2023)

Buscamos realizar os testes para três pacotes de ciclos do semáforo distintos escolhidos de forma a testar os limites de velocidade inferior e superior apresentados pelo sistema ao condutor. Os testes foram realizados de acordo com a ordem dos itens descritos:

1. Primeiro posicionamos o modulo transmissor a uma altura de aproximadamente 1,5m em uma determinada posição da rua de forma a simular a presença de um semáforo (ilustrado na Figura 16);
2. Em seguida nos aproximamos do transmissor com o veículo e módulo receptor;
3. Assim que uma velocidade e distância fossem detectadas pelo receptor paramos o veículo e medimos a distância entre veículo e semáforo com o auxílio de uma trena métrica;
4. Tendo a distância real entre os componentes cronometramos o intervalo de tempo necessário para o veículo atingir o semáforo mantendo velocidade igual ou próxima da velocidade apresentada pelo sistema;
5. Repetimos o processo para os três pacotes distintos nos dois trechos de rodovia apresentados na Figura 16.

Os resultados dos testes estão sumarizados na Tabela 7 e Tabela 8. Onde pode-se observar os pacotes de transmissão utilizados, distâncias medidas e calculadas, velocidade ideal sugerida pelo sistema e tempo de percurso do veículo.

Tabela 7 - Resultado testes Rua Elétrica

Pacote transmitido	Rua Elétrica			
	Dist. Med. (m)	Dist. Cal. (m)	Vel. (Km/h)	Tempo (s)
[20,30,50,70, -25.45037, -49.23375, 20]	258	257	18,5	50
[2,5,10,20, -25.45037, -49.23375, 20]	52	54	19,4	19
[50,100,120,140, -25.45037, -49.23375, 20]	255,3	254	18,3	52

Fonte: O autor

Tabela 8 - Resultados testes Rua Engenharias

Pacote transmitido	Rua Engenharias			
	Dist. Med (m)	Dist. Cal. (m)	Vel. (Km/h)	Tempo (s)
[20,30,50,70, -25.45318, -49.23338, 20]	234,3	230,5	16,6	55

[2,5,10,20, -25.45318, -49.23338, 20]	53,2	53,5	19,3	22
[50,100,120,140, -25.45318, -49.23338, 20]	233,5	230	16,6	54

Fonte: O autor

4 RESULTADOS

Nesse capítulo buscamos fazer uma análise dos dados coletados durante os testes descritos no capítulo anterior. Conforme mencionamos anteriormente esses testes buscam levantar erros, características e restrições dos componentes utilizados com relação a aplicação desse trabalho, tal como avaliar as velocidades sugeridas pelo sistema e aplicabilidade do projeto. Dessa forma, o primeiro item que comentaremos nesse capítulo é a tecnologia de comunicação utilizada pelo sistema.

Conforme enfatizado em seções anteriores, o módulo RF foi escolhido por satisfazer os requisitos do projeto e por apresentar elevado alcance de comunicação. Infelizmente, não conseguimos testar o funcionamento do projeto para distâncias maiores do que 260m devido ao tamanho limitado do trecho de rodovia utilizado, porém pudemos observar que o sistema funcionou de maneira satisfatório para as distâncias e condição de linha de visada direta impostas pelo projeto. Essa configuração é inibida quando a antena do módulo RF é colocada no interior do veículo, onde pudemos observar uma perda de sinal com ocorrência proporcional a quantidade de obstáculos e distância entre veículo e semáforo. Supondo a aplicação do sistema em uma configuração real de trânsito esses obstáculos podem inviabilizar sua utilização. Nesse caso, posicionar o módulo transmissor na mesma altura das luzes do semáforo pode reduzir o número de obstáculos, visto que o percurso do sinal é desviado do tráfego de veículos.

Outra característica do módulo RF utilizado são os 32 bytes disponíveis para o campo de dados do protocolo ESB. Vimos anteriormente que a consequência desse valor é a restrição do número de ciclos do semáforo (dois ciclos) transmitidos, porém não detalhamos os principais impactos desse número nesse trabalho. Uma análise preliminar sugere que o desempenho do protótipo é prejudicado à medida que o número de ciclos do semáforo diminui. Esse fato é justificado pelo conjunto reduzido de velocidades possíveis que afetam tanto a funcionalidade do sistema tal como o consumo de combustível, visto que dificilmente o sistema apresentará velocidades ao condutor à distância de comunicação de 400m que minimiza o consumo de combustível. Essas ponderações são validas considerando uma aplicação genérica do sistema. Porém, supondo sua aplicação em uma região com distâncias entre semáforos menor que 400m (centro da cidade de Curitiba, por exemplo) os dois ciclos

de semáforo transmitidos podem satisfazer a aplicação do sistema. Nesse caso a comunicação entre veículos e entre semáforos pode ser adicionada ao sistema para possibilitar cálculos de velocidades que englobam não apenas um, mas dois ou mais semáforos, adicionando funcionalidades ao sistema e o melhorando o consumo de combustível. Essas características podem ser atendidas com a exploração da topologia em árvore apresentada na Figura 13 e disponível no módulo Nrf24I01 PA NA. Outro item que limita a funcionalidade do sistema é a concorrência pela frequência de $2,4GHz$ utilizada pelo módulo. A ampla utilização dessa frequência para finalidades variadas que estão ligadas principalmente ao acesso à internet, pode interferir no sinal transmitido pelo semáforo de modo a prejudicar o funcionamento do sistema. Nesse caso, a utilização de tecnologias com menor alcance, mais robustas a ruído e que utilizem frequências menos poluídas também podem ser exploradas.

Por fim, nossas últimas ponderações acerca do módulo RF utilizado dedicam-se a segurança do protocolo ESB. Até o momento nos referimos as velocidades apresentadas ao condutor como velocidades sugeridas. Enfatizamos novamente que o propósito desse trabalho não é o controle de velocidade do veículo, mas sim sugerir possíveis velocidades ao condutor. Essa restrição reduz a dependência desse trabalho a descrição de sistemas de segurança necessários. Porém optamos por apresentar alguns comentários sobre o tema, visto que esse sistema também está ligado a integridade física dos usuários. Nesse contexto o protocolo ESB utilizado não apresenta segurança satisfatória que justifique a aplicação do sistema. A análise do datagrama do protocolo ESB apresentado anteriormente mostra a ausência de campos que tratem da segurança dos dados transmitidos. De forma que informações como ciclos do semáforo e endereços do receptor são facilmente obtidas caso o sinal seja interceptado. Uma estratégia que pode ser utilizada para melhorar a segurança do sistema é a adição de extensões ao protocolo ESB que assegurem tanto a identidade do remetente quanto a integridade do pacote entregue ao receptor. O Authentication Header (AH) é uma extensão amplamente utilizada pelo protocolo IP que possui essas características (STALLINGS, 2005), porém a utilização dessa extensão demanda nova análise do datagrama do protocolo ESB, visto que 8 bits de comprimento são requeridos pelo AH.

De forma similar ao módulo RF, uma análise e apontamento de pontos de melhoria do módulo GPS utilizado também se fez necessária. A discussão acerca

desse componente é devido a precisão da posição do veículo fornecida ao sistema. Apresentamos anteriormente que uma compensação via software pode ser utilizada para contornar possíveis erros devido a essa precisão, contudo, essa ação é válida apenas para condições onde a precisão especificada pelo fabricante é garantida. O fabricante do módulo GPS neo-6M não especifica o ambiente necessário para garantir a precisão descrita. Durante nossos testes observamos variações nas distâncias maiores do que a precisão horizontal do componente, o que torna o módulo não confiável. Uma alternativa à utilização do módulo GPS é a utilização de tecnologias de posicionamento global mais precisas, tais como os sistemas embarcados em veículos que utilizam conexão com a internet.

Até o momento apresentamos a análise do módulo RF e GPS utilizados. Apresentaremos agora uma análise dos dados contidos na Tabela 7 e na Tabela 8 a fim de avaliar os algoritmos utilizados tal como a aplicação real do sistema proposto. A primeira característica dos dados da Tabela 7 e Tabela 8 é devido a precisão do módulo GPS. Pode-se observar que em mais da metade dos experimentos a distância lida pelo módulo estava dentro da precisão horizontal especificada pelo fabricante. Porém, para o primeiro e terceiro pacote transmitidos (Tabela 8) o erro de posição foi maior que os 2,5m especificado:

$$234,3m - 230,5m = 3,8m$$

$$257,3m - 254 = 3,3m$$

Essa diferença pode ser devido a obstáculos entre o satélite e o módulo GPS, visto que nessa posição havia vegetação com potencial para obstruir o sinal do módulo (Figura 16). Outra característica importante dos dados coletados é a velocidade calculada pelo sistema. Uma estratégia que pode ser utilizada para avaliar as velocidades apresentadas é calcular a velocidade teórica através da distância medida e comparar com a velocidade calculada pelo sistema. A Tabela 9 ilustra esse cálculo. Podemos observar que para o pacote presente na primeira linha da Tabela 9 não há velocidade possível para atingir o semáforo no primeiro ciclo, visto que:

$$\frac{257m}{20s} \left(\frac{3600s}{1000m} \right) = 46,26Km/h > 20Km/h$$

E,

$$\frac{257m}{30s} \left(\frac{3600s}{1000m} \right) = 30,84Km/h > 20Km/h$$

Logo, a decisão do sistema em utilizar o segundo ciclo para o cálculo de velocidade está correta, já que para esse caso a velocidade ideal está dentro dos limites de velocidade:

$$\frac{257m}{50s} \left(\frac{3600s}{1000m} \right) = 18,5Km/h < 20Km/h$$

Outro indicativo do funcionamento correto dos algoritmos do sistema é devido ao erro percentual entre as velocidades. A Tabela 9 mostra que esse erro é menor que 1% para a maioria das amostras coletadas. Além disso, como a diferença nos parâmetros do cálculo de velocidades estavam apenas nas distâncias (utilizamos mesma informação de tempo em ambos os cálculos), podemos dizer todo o erro presente nas velocidades é devido a precisão do módulo GPS.

Tabela 9 - Comparação velocidade medida e teórica

Pacote transmitido	Vel. Teórica (Km/h)	Vel. med. (Km/h)	Erro percentual $\left \frac{v_{med} - v_{teo}}{v_{teo}} \right \times 100$
[20,30,50,70, -25.45037, -49.23375, 20]	18,58	18,5	0,43%
[2,5,10,20, -25.45037, -49.23375, 20]	19,22	19,4	0,94%
[50,100,120,140, -25.45037, -49.23375, 20]	18,38	18,3	0,43%
[20,30,50,70, -25.45318, -49.23338, 20]	16,87	16,6	1,60%
[2,5,10,20, -25.45318, -49.23338, 20]	19,15	19,3	0,78%
[50,100,120,140, -25.45318, -49.23338, 20]	16,81	16,6	1,25%

Fonte: O autor

Além das distâncias e velocidades outra grandeza que precisamos analisar são os intervalos de tempo que o veículo utilizou para atingir o semáforo. Podemos observar que o veículo atingiu o semáforo no estado verde para 5 amostras, porém para o pacote da segunda linha da Tabela 8 o veículo atingiu o semáforo durante seu estado vermelho. Uma vez que mitigamos possíveis erros do algoritmo de cálculo de velocidades, duas justificativas ligadas a esse fato podem ser apresentadas. A primeira é que o intervalo de tempo de aceleração do veículo não é considerado no cálculo de velocidades. Em nossos experimentos a velocidade inicial do veículo foi nula, de forma que durante o trecho do percurso em que o veículo estava em aceleração a velocidade instantânea do mesmo foi inferior a velocidade sugerida pelo sistema. A segunda é devido à dificuldade do condutor em manter o veículo na mesma velocidade sugerida pelo sistema. As velocidades apresentadas na Tabela 9 utilizam uma casa decimal. Porém, o velocímetro de veículos comuns não utiliza casas decimais para indicação da velocidade, dessa forma, um arredondamento natural de velocidade apresentada pelo sistema é realizado pelo condutor. Além disso, manter o veículo em uma velocidade fixa pode ser difícil caso o veículo não disponha de funcionalidades eletrônicas como o controle de cruzeiro, por exemplo. Nesse caso a velocidade instantânea do veículo pode sofrer variação em relação a velocidade sugerida pelo sistema, gerando erros de tempo e posição do veículo. Infelizmente não dispomos de um veículo com controle de cruzeiro para a realização dos testes. Porém, erros devido a diferença de velocidades entre veículo e sistema são inerentes a proposta do projeto de fornecer velocidades sugeridas e não controlar a velocidade do veículo.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Apresentamos nesse trabalho um protótipo inicial de comunicação entre veículo e semáforo para redução do tempo de viagem e consumo de combustível. Vimos anteriormente que há diversas características e funções que podem ser adicionadas a esse projeto, tal como melhorias nas funcionalidades apresentadas por ele. O objetivo dessa subdivisão é traçar um possível caminho de continuidade desse trabalho, apresentando características e funcionalidades que podem ser exploradas em trabalhos futuros. Apresentaremos inicialmente pontos de melhoria das funções e

componentes que já estão presentes nesse protótipo e em seguida detalharemos novas características que podem ser adicionadas. Conforme apresentamos anteriormente, dois componentes principais utilizados possuem características que podem ser melhoradas, são eles os módulos RF e GPS. Alternativas de melhoria do módulo GPS já foram apresentadas anteriormente. Onde propomos a comunicação entre nosso sistema e veículo para reduzir erros de posição do módulo GPS Neo-6M. As motivações para escolha de uma tecnologia diferente de comunicação são devidas a segurança e concorrência da frequência de comunicação utilizada pelo módulo Nrf24l01 PA NA. Nesse caso, a utilização de tecnologias que exploram frequências menos concorridas, como o Lora, podem ser exploradas. Além disso, vimos que para aplicações específicas a distância de comunicação de 400m é irrelevante para o desempenho do sistema, o que permite a utilização de tecnologias com menor alcance como o Zigbee, por exemplo.

A segunda parte dessa subdivisão dedica-se ao detalhamento de novas características e funcionalidades que podem ser adicionadas a esse projeto. Esse trabalho foi restrito a comunicação entre veículos e semáforos de tempo fixo, porém, a aplicação real desse sistema exige que o mesmo também contemple semáforos de tempo adaptativo, tal como comunicações entre veículo e entre semáforos, o que podem ser considerados em trabalhos futuros. O primeiro impacto no nosso sistema dado a adição dessas características é devido o cálculo de velocidades para um número qualquer de semáforos sequentes e não apenas um semáforo conforme o sistema atual. Outra funcionalidade que pode ser adicionada é o cálculo de filas e indicação de tráfego intenso ao condutor. Uma vez que há comunicação paralela e transversal tanto entre veículos e semáforos, cálculos de filas podem ser implementados através do número de veículos conectados aos semáforos. Essas informações podem ser passadas ao condutor como sugestão de percursos mais rápidos e menos movimentados. Além dessas funcionalidades, a implementação de sistemas de segurança também se torna possível. Cálculos de distância segura entre veículos podem ser realizados através das distâncias respectivas de cada veículo em relação ao próximo semáforo. Essas distâncias podem ser passadas ao condutor como forma de evitar possíveis acidentes devido à proximidade entre veículos. Por fim, outra funcionalidade que pode ser explorada pelo sistema é a fiscalização de velocidades do veículo. A arquivagem de distâncias calculadas, ciclos do semáforo e

velocidade instantânea do veículo pode ser utilizada por sistemas de fiscalização para identificar possíveis travessias de veículos em semáforos no estado vermelho. Para isso, tanto a aquisição de velocidades do veículo como utilização de um sistema de armazenamento de dados devem ser considerados em trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

Com a realização desse trabalho pudemos verificar as principais características, restrições e requisitos necessários devido a utilização de um sistema de comunicação entre veículos e semáforos para redução do consumo de combustível e tempo de viagem. Através do protótipo implementado observamos que o microcontrolador Atmega328p utilizado satisfaz os requisitos da aplicação. Porém, alternativas como Lora e Zigbee podem ser utilizadas como tecnologia de comunicação devido a larga utilização da frequência de 2,4 GHz do módulo RF. Além disso, a baixa precisão do módulo GPS neo – 6M pode ser compensada através de uma comunicação entre sistema e veículo que pode ser considerada futuramente. Também observamos que as velocidades sugeridas pelo sistema estavam de acordo com a distância entre veículo e semáforo fornecidas pelo módulo GPS. A proposta do projeto em não controlar a velocidade do veículo implica na sensibilidade a erros humanos durante utilização do sistema. Pudemos observar que houve uma dificuldade do condutor em manter a velocidade do veículo igual a velocidade apresentada pelo sistema, fazendo com que o veículo atingisse o semáforo no instante em estado vermelho em uma amostra. De forma similar o intervalo de aceleração do veículo não é considerado no cálculo de velocidades, o que também pode ocasionar em erros de posição e tempo.

Outra característica que observamos foi a diversidade de possibilidades para trabalhos futuros acerca desse tema. Enfatizamos que a utilização de um sistema de comunicação entre veículos e entre semáforos possibilita a adição de funcionalidades ao sistema, como a expansão do projeto para mais de um semáforo, cálculo de filas e implementação de sistemas de segurança. Além disso, mostramos que o sistema também pode ser utilizado para fiscalização de trânsito, onde registros da velocidade do veículo no instante de travessia do semáforo podem ser utilizados pelos sistemas de fiscalização. Em resumo o protótipo implementado apresenta uma ferramenta poderosa para sistemas de comunicação veicular com semáforos de tempo fixo. Onde erros de posição e características de comunicação ainda precisam ser mitigados, porém a exploração das tecnologias descritas tal como a comunicação do sistema com o veículo permite estimar não apenas dados específicos do consumo de

combustível, emissões e tempo de viagem, mas também permite sua aplicação em veículos autônomos e utilitários através do controle real de velocidade do veículo.

REFERÊNCIAS

AG, A. Efficient urban driving-the Audi travolution project Greater efficiency and lower emissions in urban traffic-the Audi travolution project. 2010.

ASADI, B.; VAHIDI, A. Predictive Cruise Control: Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improving Fuel Economy and Reducing Trip Time. 2010.

Audi testa ‘Onda Verde’, tecnologia que a DATAPROM já disponibiliza - Integra Dataprom. Disponível em: <<https://integra.dataprom.com/cidades-inteligentes/audi-testa-onda-verde-tecnologia-que-a-dataprom-ja-disponibiliza/>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

AZDY, R. A.; DARNIS, F. Use of Haversine Formula in Finding Distance between Temporary Shelter and Waste End Processing Sites. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1500, n. 1, 28 maio 2020.

BORNEMANN, J. **Deciding how many decimal places to include when reporting latitude and longitude – Behind the Map.** Disponível em: <<https://gisjames.wordpress.com/2016/04/27/deciding-how-many-decimal-places-to-include-when-reporting-latitude-and-longitude/>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

“Car-to-X” Communication | Mercedes-Benz of Sugar Land. Disponível em: <<https://www.mbsugarland.com/car-to-x-communication/>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

COSTA, D. **Os desafios do Brasil para descarbonização no transporte; confirma | Estadão Mobilidade | Mês da Mobilidade 2022.** Disponível em: <<https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/os-desafios-do-brasil-para-descarbonizacao-no-transporte/>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

engineering noun - Definition, pictures, pronunciation and usage notes | Oxford Advanced Learner’s Dictionary at OxfordLearnersDictionaries.com. Disponível em: <<https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/us/definition/english/engineering?q=engineering>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

GRADINESCU, V. et al. Adaptive traffic lights using car-to-car communication. **IEEE Vehicular Technology Conference**, p. 21–25, 2007.

LM1117 800-mA, Low-Dropout Linear Regulator. 2023.

NEDELKOVSKI, D. **Arduino Wireless Network with Multiple NRF24L01 Modules.** Disponível em: <<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/how-to-build-an-arduino-wireless-network-with-multiple-nrf24l01-modules/>>. Acesso em: 11 fev. 2023a.

NEDELKOVSKI, D. **nRF24L01 – How It Works, Arduino Interface, Circuits, Codes.** Disponível em: <<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-wireless-communication-nrf24l01-tutorial/>>. Acesso em: 11 fev. 2023b.

nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver. CupertinoNordic Semiconductor, , 2007. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Nordic/nRF24L01P_Product_Specification_1_0.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2023

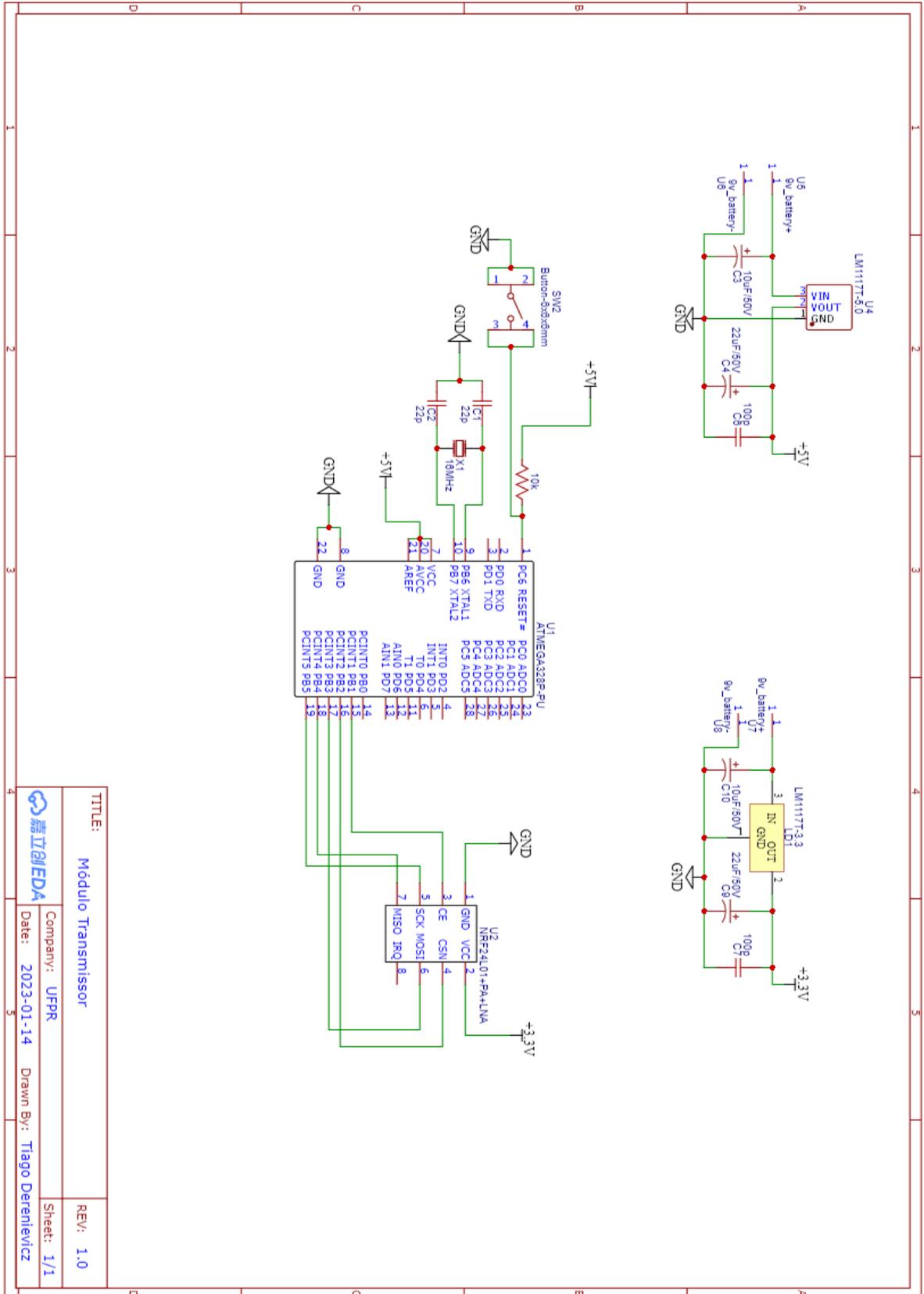
Pesquisa mostra o tempo gasto no trânsito por moradores das capitais do país - Portal do Trânsito & Mobilidade. Disponível em: <<https://www.portaldotransito.com.br/noticias/mobilidade-e-tecnologia/pesquisa-mostra-que-moradores-das-capitais-do-pais-gastam-em-media-2h-por-dia-no-transito/>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

STALLINGS, W. **Cryptography and Network Security Principles and Practices, Fourth Edition.** 4. ed. [s.l: s.n.].

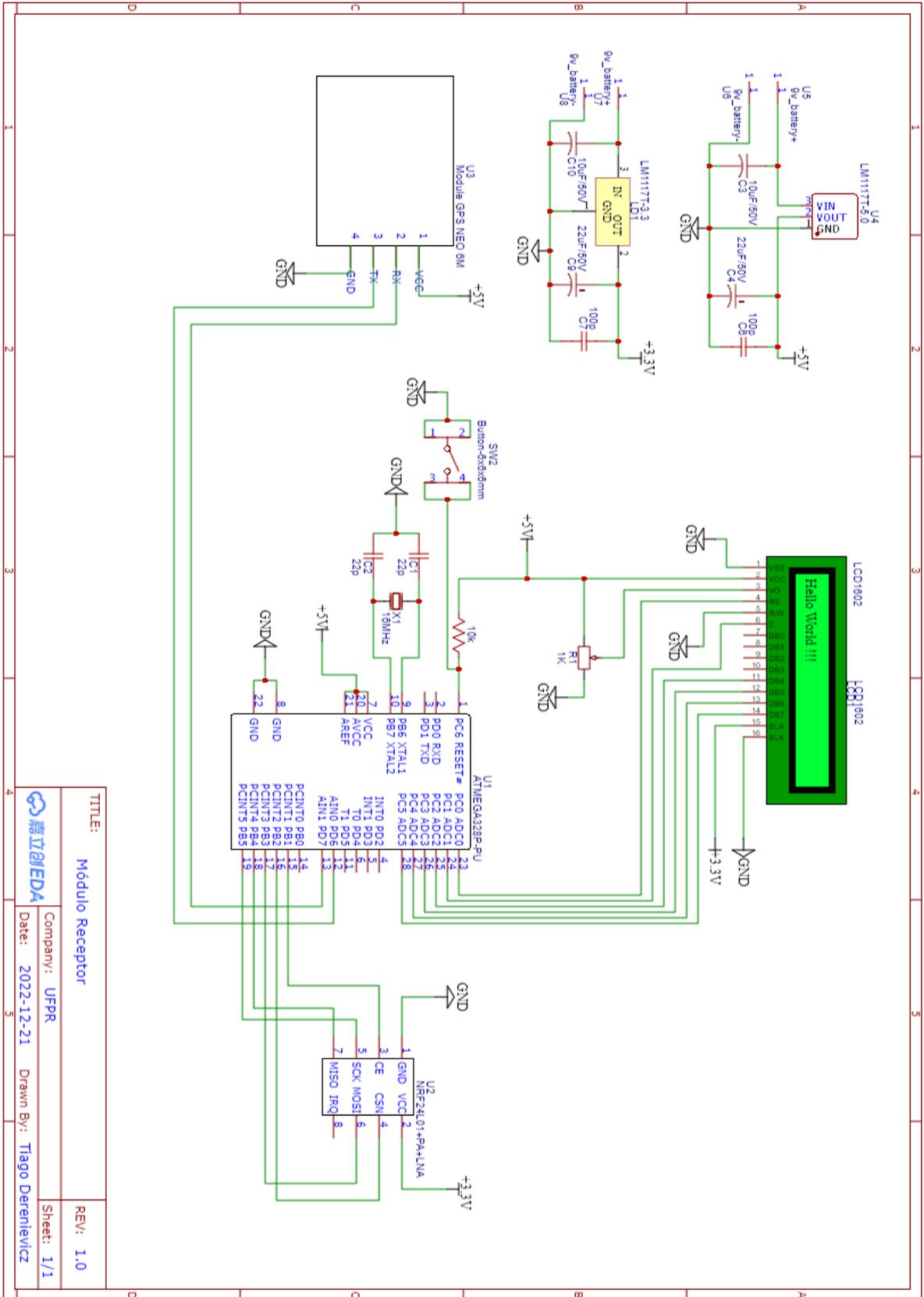
TIELERT, T. et al. The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emissions. **2010 Internet of Things, IoT 2010**, 2010.

Universidade Federal do Paraná - Centro Politécnico - Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.pt/maps/place/Universidade+Federal+do+Paran%C3%A1+-+Centro+Polit%C3%A9cnico/@-25.4502422,-49.2331921,714m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x94dce516c63d49a9:0x1cc3045eeda88271!8m2!3d-25.4502422!4d-49.2331921!16s%2Fg%2F1tdjy4rk?hl=pt-PT>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO MÓDULO TRANSMISSOR



APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO MÓDULO RECEPTOR



TITLE:	Módulo Receptor	REV:	1.0
Company:	UFPR	Sheet:	1/1
Date:	2022-12-21	Drawn By:	Tiago Dereniewicz

APÊNDICE C – CÓDIGO FONTE MÓDULO TRANSMISSOR

```
// MÓDULO TRANSMISSOR
//-----
//SEÇÃO 1: BIBLIOTECAS
//-----
#include <SPI.h> // Utilizado para comunicação SPI
//#include "printf.h" // Utilizado para diagnóstico
#include "RF24.h" // Biblioteca utilizada para configuração do módulo WI-FI
//-----

//-----
//SEÇÃO 2: OBJETOS E VARIÁVEIS
//-----
RF24 radio(9, 10); // Define pino 9 como CE e Pino 10 como CSN
uint8_t address[][6] = {"1Node", "2Node"}; // Endereço utilizado pelo par
transmissor/receptor.
//-----

//-----
//SEÇÃO 3: DADOS DE ENVIO
//-----
float payload[7] = {50,100,120,140, -25.45037, -49.23375, 20}; // Pacote de dados
a ser transmitido
//-----

//-----
// SEÇÃO 4: CONFIGURAÇÃO DA TRANSMISSÃO
//-----
void setup() {
  Serial.begin(115200); // Utilizado para diagnóstico
  while (!Serial) {
  }

  //-----Inicializa transmissor no barramento SPI-----
  if (!radio.begin()) {
    Serial.println(F("Radio não respondendo!")); // Diagnóstico
    while (1) {}
  }
  //-----

  //-----ConfiguraprotocoloESB-----
  radio.setDataRate(RF24_2MBPS); // Define a taxa de transmissão
  //radio.setPALevel(RF24_PA_LOW); // Default é RF24_PA_MAX
  radio.setAutoAck (false) // Desativa acknowledgment
  radio.setPayloadSize(sizeof(payload)); // Define tamanho do pacote a ser
transmitido
  radio.openWritingPipe(address[0]); // Transmite no endereço especificado
```

```

//-----

// Utilizado para diagnóstico
// printf_begin();
// radio.printDetails();
// radio.printPrettyDetails();

} // setup
//-----

//-----
//SEÇÃO 5: TRANSMISSÃO
//-----
void loop() {
    unsigned long start_timer = micros();           // Inicia timer
    bool report = radio.write(&payload, sizeof(payload)); // Transmite e salve
    dados transmitidos
    unsigned long end_timer = micros();             // Encerra timer

//-----Utilizado para diagnóstico-----
    if (report) {
        Serial.print(F("Transmissão ok! ")); // payload entregue
        Serial.print(F("tempo para transmitir = "));
        Serial.print(end_timer - start_timer);
        Serial.print(F("Enviado: "));
        for(int i = -1; i<7; i++){
            Serial.println(payload[i]); // Imprime payload
        }
    } else {
        Serial.println(F("Transmissão falhou"));
    }
//-----

    delay(1000); // Envia os dados a cada 1 segundo

}
} // loop
//-----

```

APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE MÓDULO RECEPTOR

```

// MÓDULO RECEPTOR
//-----
//SEÇÃO 1: BIBLIOTECAS
//-----
#include <SPI.h> // Utilizado para comunicação SPI
//#include "printf.h" // Utilizado para diagnóstico
#include "RF24.h" // Biblioteca utilizada para configuração do módulo WI-FI
#include <SoftwareSerial.h> // Biblioteca utilizada para configurar pinos seriais
#include <TinyGPS.h> // Biblioteca utilizada para leitura de posições do GPS
#include <LiquidCrystal.h> // Biblioteca utilizada para impressão de valores no
LCD
//-----

//-----
//SEÇÃO 2: OBJETOS E VARIÁVEIS
//-----
SoftwareSerial serial1(6, 7); // RX, TX utilizado pelo GPS
LiquidCrystal lcd(A0,A1,A2,A3,A4,A5); // Define pinos do LCD
TinyGPS gps1; // Função para aquisição de posições do GPS
RF24 radio(9, 10); // Define pino 9 como CE e Pino 10 como CSN
uint8_t address[][6] = {"1Node", "2Node"}; // Endereço utilizado pelo par
transmissor/receptor.
bool received = false; // controle de dados recebidos
float payload[7]; // variável para armazenar dados recibos
//-----

//-----
// SEÇÃO 3: CONFIGURAÇÃO DOS MÓDULOS
//-----
void setup() {
    serial1.begin(9600); // Inicia comunicação serial com GPS
    lcd.begin(16,2); // Inicia LCD
    Serial.begin(9600); // Utilizado para diagnóstico
    while (!Serial) {
    }
//-----Inicializa transmissor no barramento SPI-----
    if (!radio.begin()) {
        Serial.println(F("Radio não respondendo!")); // Diagnóstico
        while (1) {}
    }
//-----

    radio.openReadingPipe(1, address[1]); // Abre pipe de leitura 2Node

    // Utilizado para diagnóstico
    // printf_begin();
    // radio.printDetails();

```

```

// radio.printPrettyDetails();

} // setup
//-----

//-----
//SEÇÃO 4: RECEPTOR
//-----

void loop() {
  uint8_t pipe;
  if (radio.available(&pipe)) { // Verifica se algum dado foi
recebido
    uint8_t bytes = radio.getPayloadSize(); // Pega tamanho do dados recebidos
    radio.read(&payload, bytes); // Lê os dados e armazena na
variável payload

//----Imprime dados recebidos - Utilizado para
diagnóstico-----
    Serial.print(F("Received "));
    Serial.print(bytes); // print the size of the payload
    Serial.print(F(" bytes on pipe "));
    Serial.print(pipe); // print the pipe number
    Serial.print(F(": "));
    for(int i = -1; i<7; i++){
      Serial.println(payload[i],5); // print the payload's value
    }
//-----

    received = true;
  }
//-----

//-----
//SEÇÃO 5: CÁLCULO DE DISTÂNCIA
//-----

  if(received == true){
    bool recebido = false;
    static unsigned long delayPrint = millis();
    while (serial1.available()) {
      char cIn = serial1.read();
      recebido = (gps1.encode(cIn) || recebido); // Verifica até receber o
primeiro sinal dos satelites
    }
    if ( (recebido) && ((millis() - delayPrint) > 1000) ) { //Mostra apenas
após receber o primeiro sinal. Após o primeiro sinal, mostra a cada segundo.
      float latitude, longitude; // Define variáveis de posição do veículo

```

```

        gps1.f_get_position(&latitude, &longitude); // Armazena posições lidas do
GPS
        float distancia_entre; // Variável para o cálculo de distância
        distancia_entre = gps1.distance_between(latitude, longitude, payload[4],
payload[5]); // Calculo a distância entre os dados recebidos do GPS e
transmitidos pelo semáforo

//-----Imprime distância no LCD-----
        lcd.clear(); // Limpa LCD
        lcd.setCursor(0, 0); // Posiciona o cursor na coluna 0, linha 0;
        lcd.print("Distancia: "); // Envia o texto entre aspas para o LCD
        lcd.setCursor(11, 0); // Posiciona o cursor na coluna 11, linha 0;
        lcd.print(distancia_entre);

//-----
//-----
// SEÇÃO 6: CÁLCULO DE VELOCIDADE MÉDIA
//-----
//-----
        float velocidade_med, velocidade_min_possivel, velocidade_max_possivel;
//variáveis velocidade
        int i = 0;
        bool conjunto_vazio = true; // Conjunto de velocidades possíveis
        while(conjunto_vazio == true){
            velocidade_min_possivel = max((distancia_entre-2.5)/payload[i+1]*3.6,
5); //calcula e converte de m/s para km/h. 2.5m é a precisão horizontal do GPS
            velocidade_max_possivel = min((distancia_entre+2.5)/payload[i]*3.6,
payload[6]);
            if(velocidade_min_possivel > velocidade_max_possivel){ // Verifica se o
conjunto de velocidades é vazio
                i=i+2;
                if(i>2){
                    conjunto_vazio = false;
                }
            }
            else {
                velocidade_med = velocidade_max_possivel; // velocidade_med =
max(velocidade_min_possivel, velocidade_max_possivel);

//-----Imprimi Velocidade no
LCD-----
                lcd.setCursor(0, 1);
                lcd.print("velocidade: ");
                lcd.setCursor(12, 1);
                lcd.print(velocidade_med);
                conjunto_vazio = false;

//-----
//-----
            }

```

```
    }  
    received = false;  
  }  
}  
} // loop  
//-----  
-----
```