INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

GLEIDISON SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA EMBARCAÇÃO MOVIDA À ENERGIA SOLAR

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2017

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

GLEIDISON SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA EMBARCAÇÃO MOVIDA À ENERGIA SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Eletrônica Industrial.

Professor Orientador: Flábio Alberto Bardemaker Batista, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2017

Santos, Gleidison
Desenvolvimento de sistemas de comunicação para embarcação movida à energia solar / Gleidison Santos; orientação de Flábio Alberto Bardemaker Batista. – Florianópolis,
SC, 2017.
71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Santa Catarina,
Campus Florianópolis.
CST em Eletrônica Industrial. Departamento Acadêmico de Eletrônica.
Inclui Referências.

1. Energia solar Fotovoltaica. 2. Sistema microcontrolado. 3. Protocolo CAN.
4. Bluetooth. I. Alberto Bardemaker Batista, Flábio. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Eletrônica. III. Título.

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA EMBARCAÇÃO MOVIDA À ENERGIA SOLAR

GLEIDISON SANTOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Eletrônica Industrial e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 24 de agosto, 2017.

Banca Examinadora:

Flábio Alberto Bardemaker, Dr. Eng.
Orientador

Clóvis Antônio Petry, Dr. Eng.

Renan Augusto Starke, Dr. Eng.

Dedico este trabalho a Deus, a minha família e, em especial, a minha esposa Angélica Pires.

AGRADECIMENTOS

A todos os meus professores e colegas que me acompanharam nesta longa trajetória do curso de graduação.

A esta instituição de ensino, que não me deixou faltar nada.

Ao meu orientador, professor Flábio Alberto Bardemaker Batista, por me ajudar neste trabalho com apoio técnico e moral e à professora Lênia Pisani Gleize, por ajudar na parte da escrita deste trabalho.

A Equipe Zênite Solar, por disponibilizar sua sala de desenvolvimento e seu barco para testes.

RESUMO

Desenvolver sistemas de comunicação de uma embarcação que participa de um rali de barcos movidos à energia solar, requer cuidados com a quantidade de fios utilizados, para não aumentar o peso do barco, e com as interferências eletromagnéticas inerentes ao funcionamento deste tipo de embarcação. Atualmente a Equipe Zênite Solar, representante do Instituto Federal de Santa Catarina do campus Florianópolis no Desafio Solar Brasil (rali de barcos movidos à energia solar), não utiliza nenhum protocolo de comunicação no seu painel de controle de acionamentos das bombas de porão e do motor de propulsão, sendo necessário o uso de muitos fios. Este documento apresenta duas soluções para sistemas de comunicação, visando à compatibilidade eletromagnética e à diminuição da utilização de cabos. Ambos são sistemas microcontrolados. Um deles usa um barramento de comunicação com apenas 2 fios, implementando o protocolo CAN. O outro é baseado na comunicação sem fio, utilizando a tecnologia *Bluetooth*. Desta forma busca-se aumentar a eficiência do barco.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Sistema microcontrolado. Protocolo CAN. *Bluetooth*.

ABSTRACT

Develop communications systems for a boat which participates in a rally of boats powered by solar energy, requires care with the amount of wires used, not to increase the weight of the boat, and with the electromagnetic interference inherent in the operation of this type of vessel. Currently the Zênite Solar Team, representative of the Federal Institute of Santa Catarina of the Florianópolis campus in the Brazil Solar Challenge (rally of solar powered boats), does not use any communication protocol in its control panel of bilge pump drives and propulsion motor, being necessary the use of many wires. This document presents two communications systems solutions, aiming at electromagnetic compatibility and reducing the use of cables. Both are microcontrolling systems. One uses a 2-wire communication bus, implementing the CAN protocol. The other is based on wireless communication using *Bluetooth* technology. In this way it is tried to increase the efficiency of the boat.

Key-words: Photovoltaic solar energy. Microcontrolled system. CAN Protocol. *Bluetooth*.

SUMÁRIO

1 Introdução..... 10
1.1 Definição do problema..... 10
1.2 Justificativa..... 11
1.3 Objetivos..... 12
2. Revisão Bibliográfica..... 12
2.1 O microcontrolador Atmega328p..... 12
2.1.1 Conversor Analógico Digital – ADC..... 13
2.1.2 Modulação por Largura de Pulso – PWM..... 14
2.2 Protocolo de Comunicação CAN..... 14
2.2.1 O Circuito Integrado MCP2515..... 17
2.2.2 O Circuito Integrado MCP2551..... 18
2.3 O Sistema Bluetooth..... 19
2.3.1 O Módulo HC05..... 20
2.4 Acionamentos de Bombas de Porão com Relés..... 21
2.4.1 JQC-3F(T73)..... 21
2.5 Acionamento de Motor de Propulsão com MOSFET..... 22
2.5.1 O Circuito Integrado ir2127..... 22
2.5.2 O MOSFET IXFN420N10T..... 23
2.6 Linguagem de Programação..... 24
3. Metodologia..... 24
4. Desenvolvimento do *Hardware*..... 25
4.1 Esquemáticos dos reguladores de tensão..... 29
4.2 Esquemáticos do Atmega328p para comunicação via Protocolo CAN..... 31
4.3 Esquemático do MCP2515 e MCP2551..... 36
4.4 Esquemáticos do Atmega328p para comunicação via Bluetooth..... 36
4.5 Esquemático dos relés para acionamento das bombas de porão..... 39
4.6 Esquemático do driver ir2127..... 41
4.7 Esquemático do Circuito de Acionamento do Motor..... 43
4.8 Placas de circuitos impressos...... 44
4.8.1 Placas de circuitos impressos (Protocolo CAN)..... 44
4.8.2 Placas de circuitos impressos (Bluetooth)..... 46

5 Desenvolvimento do Software 48
5.1 Protocolo de comunicação unidirecional 48
5.2 Fluxogramas de funcionamento 49
5.2.1 Fluxograma de funcionamento da placa da proa 49
5.2.2 Fluxograma de funcionamento da placa das bombas de porão 50
5.2.3 Fluxograma de funcionamento da placa de controle do motor de propulsão 51
5.2.4 Fluxograma de funcionamento da placa de controle do motor de propulsão com comunicação Bluetooth 53
5.2.5 Teste de envio do frame de dados 55
5.2.6 Modo PWM com fase corrigida 56
6 Resultados Finais 57
6.1 Mudanças do Software para o sistema de comunicação via Bluetooth 61
6.2 Motor de propulsão e formas de onda 62
6.3 Gabinete de proteção e teste do sistema de comunicação via Bluetooth. 64
6.4 Peso dos sistemas e custos 65
7 Conclusões finais 68
REFERÊNCIAS 69

1 Introdução

O desenvolvimento de um painel de controle para o acionamento do motor de propulsão e das bombas de porão de uma embarcação movida à energia solar requer um sistema de envio de dados eletrônicos responsáveis por tais acionamentos. Esta transmissão de dados pode ser feita através da utilização de fios ou não.

Este trabalho de conclusão de curso visa o estudo e a implementação de dois sistemas de comunicação para acionamento do motor de propulsão e das bombas de porão da embarcação da equipe Zênite Solar. Sendo um sistema de comunicação constituído por fios para envio dos dados e o outro sem a utilização de fios.

O sistema de comunicação com fios é composto por três placas eletrônicas, todas com microcontrolador integrado. A placa da proa (parte da frente do barco) é responsável por receber os comandos do piloto da embarcação, através de botões e potenciômetro, e enviá-los através do protocolo CAN para os outros dois circuitos. Uma destas placas, localizadas na popa (parte traseira do barco) é responsável pelo acionamento do motor de propulsão e a outra pelo acionamento das bombas de porão.

O sistema de comunicação sem fio é também composto por três placas, porém apenas duas possuem o microcontrolador. As funções destas são as mesmas do sistema com fios, a diferença é que a comunicação entre estas é realizada via *Bluetooth*. Apenas uma placa na popa é responsável por receber os dados para controle do motor de propulsão e de acionamento das bombas de porão.

O desenvolvimento deste trabalho servirá de base para futuras implementações de sistemas de comunicação, seja para acionamento de motores ou para aquisição de dados, visando à redução da utilização de fios e, consequentemente, o peso da embarcação.

1.1 Definição do problema

O Desafio Solar é uma competição de embarcações movidas à energia solar que acontece todos os anos no litoral do estado do Rio de Janeiro. Várias instituições de ensino possuem equipes para participar desta competição. O Instituto Federal de Santa Catarina campus Florianópolis é representado pela equipe Zênite Solar.

Durante o desafio as equipes realizam percursos pré-definidos pela organização da competição, ao término desta, a equipe que possuir o menor tempo acumulado é campeã do Desafio Solar Brasil. Para concorrer ao título de campeã é necessário boa estratégia e bom desempenho tecnológico, o que exige muito estudo por parte dos integrantes das equipes.

A equipe Zênite vem aprimorando, a cada ano, a aplicação de tecnologias nas áreas da eletrônica e da mecânica. Na área da eletrônica, um dos pontos a ser melhorado é o envio dos sinais elétricos de comando do piloto, que são gerados a partir de um painel eletrônico na proa do barco e transmitidos através de fios até a popa para controlarem o motor de propulsão e as bombas de porão.

Estes fios possuem massa e volumes indesejados, oxidam e geram gastos financeiros para a equipe, além de contribuírem para propagação de ruídos elétricos gerados pelo acionamento do motor de propulsão. Diante destes fatos, surge o problema de pesquisa deste trabalho: é possível desenvolver um sistema eletrônico de comunicação entre o piloto da embarcação, o motor de propulsão e as bombas de porão com menor quantidade de fios e menos susceptível às interferências eletromagnéticas? É possível, em uma segunda etapa do trabalho, estabelecer a comunicação eletrônica entre piloto, motor de propulsão e bombas de porão sem a utilização de fios? A partir destes questionamentos é realizado este trabalho de conclusão de curso.

1.2 Justificativa

A comunicação entre dispositivos eletrônicos é de extrema importância para o avanço da tecnologia. O aperfeiçoamento da comunicação eletrônica está impactando positivamente quesitos como: taxa de transmissão, segurança no envio e recepção de dados e na economia da implementação de projetos. Tais benefícios são citados no trabalho sobre o protocolo CAN publicado pela Universidade do Porto, (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto):

> O protocolo CAN foi desenvolvido por Robert Bosh em 1986 [...] sua especificação base anunciava elevada taxa de transmissão, grande imunidade a interferências elétricas e capacidade de detectar erros [...] um dos benefícios do CAN é suprimir a necessidade de sistemas complexos de fios substituindo-os por um simples cabo. É também considerado uma solução para implementar comunicação em rede de uma forma simples, barata e robusta, nomeadamente ao ruído eletromagnético. [...]

Observa-se, no barco da equipe Zênite, que a comunicação eletrônica entre piloto, bombas de porão e o motor de propulsão é feita através de fios, sendo dois fios para o envio de cada sinal elétrico. Aproximadamente 28 metros de cabos são usados, ocupando espaço, aumentando o peso da embarcação e o custo de projeto.

Além da possibilidade de envio de várias informações de forma segura, barata, por poucos fios e, num segundo momento do trabalho, ausentando-se da utilização de fios, o desenvolvimento do sistema eletrônico de comunicação agilizará o processo de montagem estrutural do barco para a participação das etapas da competição intitulada Desafio Solar Brasil tornando-os mais competitivos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral é desenvolver um painel eletrônico de comunicação para controle do motor de propulsão e bombas de porão do barco movido a energia solar.

1.3.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral serão desenvolvidas as seguintes atividades:

- Identificar as necessidades de controle entre o piloto, o motor de propulsão e as bombas de porão.
- Projetar os circuitos e programa computacional para o sistema eletrônico microcontrolado de comunicação entre o piloto, o motor de propulsão e as bombas de porão, conectados por fio.
- Projetar os circuitos e programa computacional para o sistema eletrônico microcontrolado de comunicação entre o piloto, o motor de propulsão e as bombas de porão com conexão sem fio.
- Montar e testar o sistema eletrônico de comunicação entre o piloto, o motor de propulsão e as bombas de porão para ambos os sistemas.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a pesquisa sobre o microcontrolador escolhido, os protocolos de comunicação utilizados, circuitos integrados necessários para intermediar o envio de sinais para acionamento das bombas de porão e motor de propulsão e, por fim, aborda-se a linguagem utilizada para o desenvolvimento do *software* de comunicação.

2.1 O microcontrolador Atmega328p

A evolução da tecnologia vem demandando cada vez mais o desenvolvimento de componentes eletrônicos capazes de realizar muitos processamentos simultâneos, possibilitando a realização de várias funções por um único dispositivo, é o caso do microcontrolador. Segundo Lima (2010, p.17):

> As melhorias tecnológicas demandam cada vez mais dispositivos eletrônicos, assim, a cada dia são criados componentes eletrônicos mais versáteis e poderosos. Nesta categoria, os microprocessadores, aos quais os microcontroladores pertencem, têm alcançado grande desenvolvimento.

> Sua facilidade de uso em amplas faixas de aplicação permite o projeto relativamente rápido e fácil de novos equipamentos.

De uma forma mais ampla e detalhada, Lima e Villaça (2012, p.9) declaram que:

> Um microcontrolador é o um sistema microprocessado com várias funcionalidades (periféricos) disponíveis em um único chip. [...] A grande vantagem de se colocar várias funcionalidades em um único circuito integrado é a possibilidade de desenvolvimento rápido de sistemas eletrônicos com o emprego de um pequeno número de componentes. Dentre as funcionalidades encontradas nos microcontroladores pode-se citar: gerador independente de clock (não necessita de cristal ou componentes externos); memória SRAM, EEPROM, e flash; conversores analógicos-digitais (ADCs), conversores digitais-analógicos (DACs); vários temporizadores /contadores; comparadores analógicos; saídas PWM; diferentes tipos de interface de comunicação, incluindo USB, USART, I2C, CAN,SPI, JTAG, Ethernet [...]

Diante das vantagens trazidas pelo o emprego de um microcontrolador à implementação de um projeto eletrônico, optou-se utilizar o microcontrolador Atmega328p. Este também é utilizado pela plataforma Arduino, que é uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre, utilizado neste projeto para testes de *software*. O Atmega328p permite ser programado via linguagem de programação C++ via IDE do Arduino, facilitando seu uso.

Algumas características deste microcontrolador são relacionadas abaixo:

- Baixa potência, com arquitetura RISC avançada;
- Possui 32 registradores de trabalho de propósito geral (8 bits cada);
- Operação de até 20 MIPS a 20 MHz;
- 1 kbytes de memória EEPROM;
- 2 kbytes de memória SRAM;
- 23 entradas e saídas (I/Os) programáveis;
- 6 canais PWM;
- 8 canais AD com resolução de 10 bits;
- Interface serial SPI *Master/slave*;
- Pull-up habilitáveis em todos os pinos de I/O.

2.1.1 Conversor Analógico Digital – ADC

Os conversores analógicos digitais são responsáveis por transformar sinais elétricos analógicos em sinais elétricos digitais para serem processados por um microcontrolador. Segundo Zapelini (2006, p.4): “Conversor A/D: Converte a entrada analógica em uma saída digital, cujos bits representam proporcionalmente o valor da entrada analógica.”

O ADC é utilizado neste trabalho para leitura de um potenciômetro ajustável pelo piloto do barco, a partir disto é possível controlar a geração do sinal PWM e por conseqüência a velocidade do barco.

2.1.2 Modulação por Largura de Pulso – PWM

PWM (*Pulse Width Modulation*), em português: modulação por largura de pulso é uma técnica muito utilizada para variar a transferência de potência entregue a um circuito eletrônico baseado na modulação da razão cíclica (*Duty Cycle*). De uma forma mais ampla e detalhada, Lima e Villaça (2012, p.187) declaram que:

> Baseado no valor médio de um sinal PWM, muitos dispositivos eletrônicos podem ser controlados, como por exemplo: motores, lâmpadas, LEDs, fontes chaveadas e circuitos inversores.
> Digitalmente, o valor médio de uma forma de onda é controlado pelo tempo em que o sinal fica em nível lógico alto durante um determinado tempo. No PWM, esse tempo é chamado de ciclo ativo (Duty Cycle).

Com esta técnica é possível controlar o acionamento do motor de propulsão utilizado no barco movido a energia solar da equipe Zênite.

2.2 Protocolo de Comunicação CAN

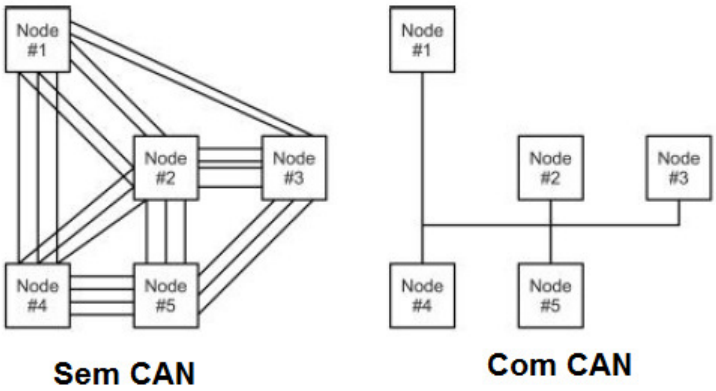
O protocolo CAN foi desenvolvido pela empresa BOSH na Alemanha em 1986, para aplicação na indústria automobilística com o objetivo de simplificar os complexos sistemas de fios em veículos.

O CAN é um protocolo de comunicação serial. Funciona baseado no conceito multi-mestre, ou seja, todos os módulos podem se tornar mestre em um determinado momento e escravo em outro, além de suas mensagens serem enviadas em regime *multicast*, isto é, uma mensagem pode ser enviada simultaneamente para um conjunto de receptores. Segundo Voss (2014, p.6):

> CAN é um sistema de rede de dois fios, half duplex de alta velocidade, que é muito superior a tecnologias seriais convencionais, como o RS232 no que diz respeito à funcionalidade e confiabilidade. [...] A maior vantagem do CAN (Controller Area Network) reside na quantidade reduzida de fiação combinado com uma prevenção engenhosa de colisão de mensagens (o que significa que nenhum dado será perdido durante a transmissão da mensagem).

A figura 1 mostra uma comparação entre um sistema que não usa o sistema CAN com um sistema que utiliza o protocolo CAN.

FIGURA 1: Comparação entre sistemas.

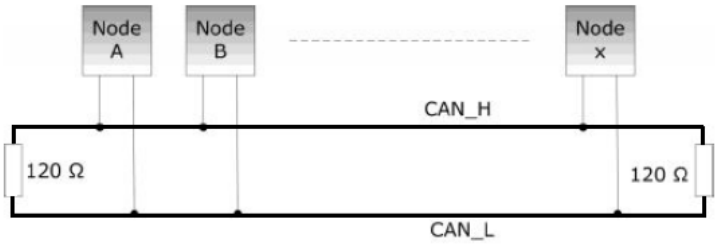


Fonte: *Controller Area Network Prototyping with Arduino.*

O par de fios trançados é o meio físico comumente utilizado para transmissão das mensagens via protocolo CAN. O barramento CAN pode ser implementado de três formas, dependentes diretamente do número de fios utilizados. Existem redes baseadas em 2 e 4 fios. As redes com 2 e 4 fios trabalham com os sinais de dados CAN_H (CAN *High*) e CAN_L (CAN *Low*). No barramento com 4 fios além dos sinais de dados, um fio com VCC e outro com GND vindos do banco de baterias fazem parte. É possível também implementá-lo com apenas um fio.

Os fios do barramento CAN devem ser trançados e não blindados. Os dados enviados através do barramento devem ser interpretados pela análise da diferença de potencial entre as linhas CAN_H e CAN_L. Com este conceito de par trançado diferencial há uma forte atenuação dos efeitos de interferências eletromagnéticas, uma vez que qualquer perturbação em um dos fios é sentido no outro causando flutuação nos dois sinais de mesma intensidade e sentido. A figura 2 mostra como as linhas CAN_H e CAN_L se conectam.

FIGURA 2: Barramento CAN.

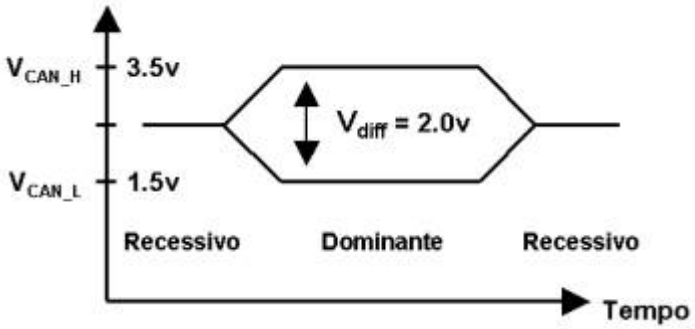


Fonte: *Controller Area Network Prototyping with Arduino.*

Toda rede CAN possui 2 terminais, que são resistores com valores entre 120 Ω e 124 Ω conectados para garantir a reflexão dos sinais elétricos no barramento.

Na rede CAN os dados são representados por bits dominantes e bits recessivos, criados em função da diferença de tensão presente no barramento. A figura 3 representa os níveis de tensão em uma rede CAN.

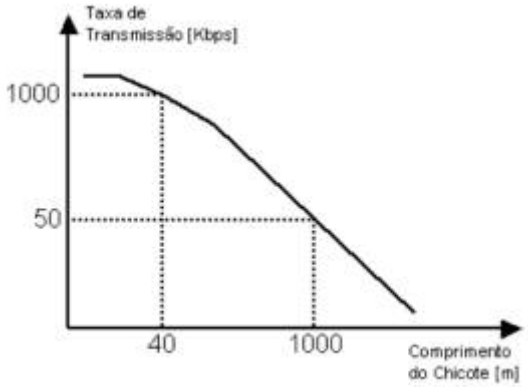
FIGURA 3: Bits dominantes e recessivos na rede CAN.



Fonte: http://dicas.webautomotivo.com.br/rede-can-o-que-e-e-como-funciona.

A velocidade de transmissão de dados é inversamente proporcional ao comprimento do barramento. A taxa de 1 Mbps é para um barramento de até 40 metros de comprimento. A figura 4 mostra esta relação.

FIGURA 4: Relação taxa de transmissão versus comprimento do barramento.



Fonte: http://dicas.webautomotivo.com.br/rede-can-o-que-e-e-como-funciona.

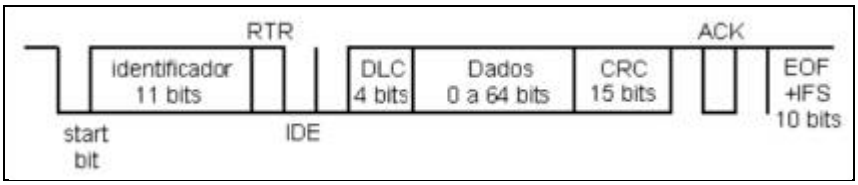
Existem duas especificações de formato de mensagens no protocolo CAN: CAN 2.0A e CAN 2.0B, que se diferenciam pelo tamanho de seus identificadores. A especificação 2.0A possui 11 bits de identificador da mensagem, enquanto a especificação 2.0B possui 29 bits. Com isto, pode-se ter até 2048 mensagens utilizando o formato 2.0A e até 537 milhões de mensagens utilizando o formato 2.0B. Segundo o trabalho sobre o protocolo CAN publicado pela Universidade do Porto, (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto):

> Nas redes CAN não existe o endereçamento dos destinatários no sentido convencional, em vez disso são transmitidas mensagens que possuem um determinado identificador. Assim, um emissor envia uma mensagem a todos os nós CAN e cada um por seu lado decide, com base no identificador

recebido, se deve ou não processar a mensagem. O identificador determina também a prioridade intrínseca da mensagem, ao competir com outras pelo acesso ao barramento.

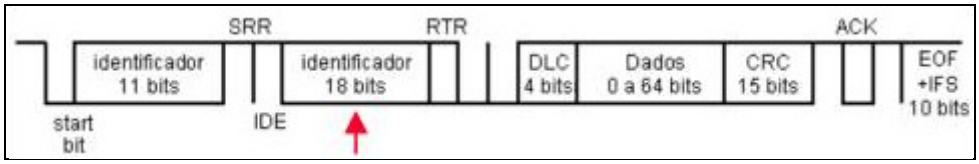
As figuras 5 e 6 mostram os dois formatos de frames possíveis da rede CAN.

FIGURA 5: frame CAN 2.0A.



Fonte: http://www.alexag.com.br/CAN_Bus_Parte_2.html.

FIGURA 6: frame CAN 2.0A.



Fonte: http://www.alexag.com.br/CAN_Bus_Parte_2.html.

Onde *start bit* é o bit dominante que serve para marcar o início de uma mensagem e é usado para sincronizar todos os nós. RTR é o bit *remote transmission request* (RTR), que é dominante quando a informação é solicitada de outro ponto. ACK (*acknowledgment error check*), sempre que um nó receptor sobrescreve este bit recessivo, indica que a mensagem recebida veio sem erros. IDE é um bit identificador de extensão, que quando dominante significa que o identificador CAN standard sem extensão está sendo transmitido. SRR é bit *substitute remote request* substitui o bit RTR do padrão 2.0A.

Segundo Guimarães (sem data): os fundamentos do CAN são especificados por duas normas: a **ISO11898** e a **ISO11519-2**. A ISO11898 determina as características de uma rede trabalhando com alta velocidade de transmissão de dados (de 125 Kbps a 1 Mbps). Já a ISO11519-2, determina as características de uma rede trabalhando com baixa velocidade (de 10 Kbps a 125 Kbps).

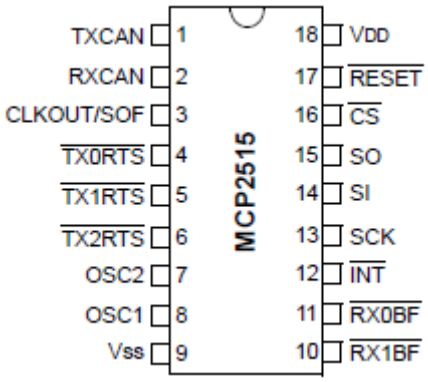
2.2.1 O Circuito Integrado MCP2515

O microcontrolador atmega328p não possui a interface de comunicação CAN integrado ao chip, por isso foi escolhido o controlador MCP2515, que por via interface serial periférica (SPI) se comunica com o microcontrolador para implementação deste protocolo de comunicação.

O MCP2515 desenvolvido pela Microchip Technology é um controlador autônomo que implementa as especificações CAN (*Controller Area Network*), versão 2.0B (Mensagens com

identificador de 29 bits). A figura 7 mostra os pinos deste chip no formato PTH (*Pin Through Hole*).

FIGURA 7: Pinos do controlador CAN MCP2515.

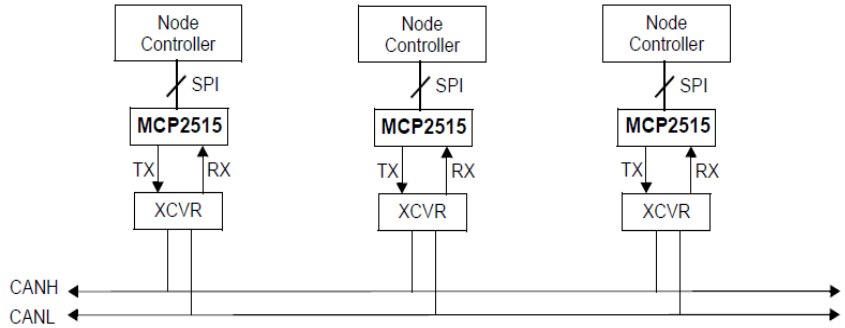


Fonte: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21801d.pdf.

Este circuito integrado foi desenvolvido para simplificar aplicações que requerem interface com o barramento CAN.

A figura 8 mostra como é implementado o controlador CAN no sistema.

FIGURA 8: Exemplo de implementação do sistema.



Fonte: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21801d.pdf (2005).

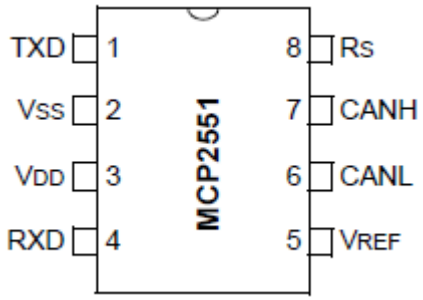
Na figura 8, o "*Node Controller*" representa o microcontrolador Atmel328p e o "*XCVR*" representa o *transceiver* MCP2551. CANH (CAN_*HIGH*) e CANL (CAN_*LOW*) são os fios que compõe o barramento CAN.

2.2.2 O Circuito Integrado MCP2551

O MCP2551 é um transceptor de alta velocidade, tolerante a falhas que serve como interface entre o controlador do protocolo CAN com o barramento físico. Este é um dispositivo de recepção e transmissão diferencial responsável por adequar os níveis de tensão no barramento para estabelecer comunicação entre as unidades da rede CAN.

Este CI suporta velocidade de até 1 Mbps, implementa os requisitos da camada física padrão ISO-11898. Possui alta imunidade a ruídos devido à implementação do barramento diferencial, fornece um buffer entre o controlador CAN e o CAN *bus*. (MICROCHIP, 2007, tradução do autor). A figura 9 mostra os pinos deste chip no formato PTH.

FIGURA 9: Pinos do *transceiver* CAN MCP2515.



Fonte: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667f.pdf (2010).

A ligação entre MCP2551 e o controlador CAN é feita através dos pinos TXD e RXD e a conexão com o barramento se faz pelos pinos CANH e CANL.

2.3 O Sistema *Bluetooth*

Na segunda etapa deste trabalho é proposto realizar o acionamento do motor de propulsão e das bombas de porão por comunicação sem fio, para isto é utilizado o padrão *Bluetooth*, que por ser uma tecnologia barata e fácil de ser implementada foi escolhida para ser usado neste projeto. Esta tecnologia permite comunicação de curto alcance entre dispositivos eletrônicos através de conexões de rádio *ad hoc* (conexão que não precisa de um nó central entre dois ou mais aparelhos). O sistema *Bluetooth* utiliza a banda de frequência ISM (*Inustrial, Scientific and Medical band*) de 2,4G Hz (2,4 GHz até 2,4835 GHz) com a técnica de transmissão FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) em português: Espalhamento espectral por saltos em frequências. Esta técnica é responsável por converter a representação binária dos dados em sinais de rádio adequados para a transmissão em diferentes frequências, ou seja, uma seqüência de bits é transmitida em uma determinada frequência por um determinado tempo, ao término deste tempo a frequência muda para a transmissão de uma nova sequência de bits e assim por diante. Esta variação de frequência pseudo-aleatória é conhecida apenas entre os integrantes da mesma rede PAN (*Personal Area Networks* – Redes de Área Pessoal) ou *piconet* (rede formada por até oito dispositivos, onde um destes deve assumir a função de mestre e os demais de escravos). Segundo Silva (2009, p.27):

> Uma comunicação *Bluetooth* pode ser entendida a partir do conceito de piconet, que consiste em dois ou mais dispositivos ocupando um mesmo canal físico, ou seja, eles estão sincronizados em um único *clock* e FHSS. O *clock* padrão da piconet corresponde ao *clock* de um dos dispositivos pertencentes a ela, denominado mestre. A FHSS é derivada do endereço do dispositivo mestre e seu *clock*. Os demais dispositivos estão sincronizados sob o *clock* do dispositivo mestre e são conhecidos como escravos.

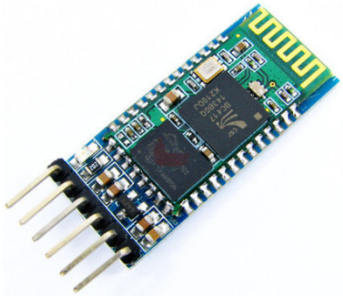
Com estes saltos em frequências conhecidos é possível minimizar interferências entre o dispositivo Bluetooth e outros equipamentos.

A comunicação via *Bluetooth* permite o uso do protocolo RFCOMM (*Radio Frequency Communications*), que emula a comunicação serial padrão (USART), logo a comunicação entre os dispositivos é realizada como se fossem conectados por um cabo dedicado à comunicação RS232. (Lima e Villaça, 2012, p. 373).

2.3.1 O Módulo HC05

Existem módulos que realizam a comunicação *Bluetooth* com o protocolo RFCOMM exclusivamente, facilitando a implementação de projetos que necessitam trocar informações sem a utilização de fios. A figura 10 mostra o módulo Bluetooth HC05 escolhido para ser utilizado neste projeto.

FIGURA 10: Módulo *Bluetooth* HC05.



Fonte: https://goo.gl/4bxQUG.

Este módulo suporta os modos mestre (*master*) e escravo (*slave*), tem alcance de comunicação de até 10 metros, pertence à classe 2, possui taxa de transmissão de 3 Mbps e pesa 9,6 gramas. A tabela 1 mostra a diferença de alcance entre as três classes existentes para os módulos Bluetooth:

TABELA 1: Alcance dos módulos Bluetooth.

Classes	Potência	Alcance
Classe 1	100 mW (20 dBm)	Até 100 metros

Classe 2	2,5 mW (4 dBm)	Até 10 metros
Classe 3	1 mW (0 dBm)	Aproximadamente 1 metro

2.4 Acionamentos de Bombas de Porão com Relés

As bombas de porão são responsáveis por retirar a água que entra na embarcação através de ondas, chuva ou até mesmo fissuras no casco. Estas bombas possuem uma chave de nível de água para o acionamento automático quando a água do porão atinge certa altura. Para a competição Desafio Solar Brasil, além do acionamento automático, é exigido que o piloto acione as bombas de porão independentemente do nível de água contida no interior do barco. Para isso é necessário a elaboração de um circuito eletrônico, que ligado em paralelo com a chave de nível pode ligar as bombas de porão a partir da solicitação do piloto. A tipologia do circuito escolhido para este projeto necessita da utilização de transistores e relés.

2.4.1 JQC-3F(T73)

Os relés são interruptores eletromecânicos utilizados para acionar cargas de alta tensão e/ou alta corrente a partir de circuitos de baixa potencia. Os relés possuem uma bobina interna, que quando percorrida por uma corrente elétrica gera um campo eletromagnético atraindo um contato metálico, que abre ou fecha. Segundo Bohr (2006, p.1), o funcionamento de um relé se dá da seguinte forma:

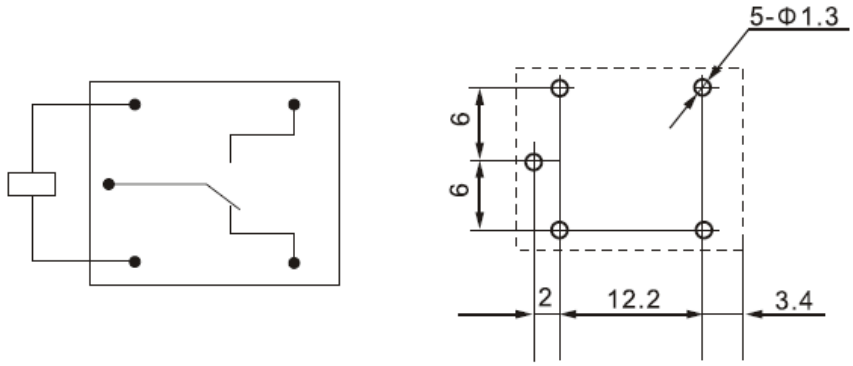
> Quando os contatos da bobina do relé são percorridos por uma corrente elétrica ele atrai o contato metálico e abre ou fecha o contato, conforme o modelo do relé utilizado. Os relés que ligam circuitos quando percorridos por corrente elétrica são chamados de NA ou normalmente abertos, enquanto que os que desligam circuitos quando percorridos por corrente são denominados por NF ou normalmente fechados. Há ainda aqueles que alternam entre um e outro de modo que um fique ligado enquanto o outro fica desligado, e vice-versa e por isso são chamados de comutadores.

Para o acionamento das bombas de porão do barco optou-se utilizar um relé na configuração NA (Normalmente Aberto), ou seja, as bombas estão desligadas quando o sistema inicia. O modelo escolhido para este acionamento foi o JQC-3F(T73), este possui as seguintes características elétricas:

- Tensão elétrica de alimentação da bobina: 3 a 24 V;
- Tensão elétrica máxima nos terminais NA e NF: 250 V;
- Corrente elétrica máxima nos terminais NA e NF: 10 A.

A figura 11 mostra as características mecânicas e dimensionais deste relé:

FIGURA 11: Características do relé utilizado para acionamento das bombas de porão.



Fonte: http://www.sunshinele.com/htm/pcb-relay.htm (imagem editada pelo autor).

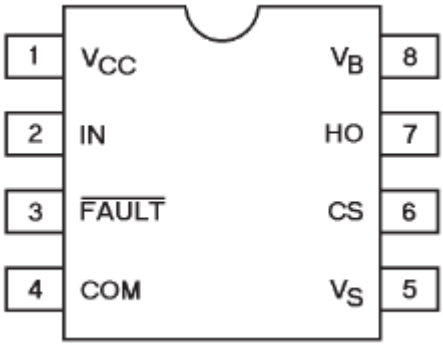
2.5 Acionamento de Motor de Propulsão com MOSFET

Para o acionamento do motor de corrente contínua de propulsão do barco é utilizado um transistor MOSFET de potência capazes de suportar correntes elétricas elevadas (aproximadamente 6,4 A a vazio e aproximadamente 100 A quando impulsiona o barco no mar). Este sistema de potência é acionado a partir de um sinal PWM gerado pelo microcontrolador. Como o Atmega328p não fornece tensão e corrente suficientes (apenas 40m A e 5 V nos pinos de saída) para o acionamento dos MOSFET é incorporado ao sistema um *Driver* de acionamento.

2.5.1 O Circuito Integrado ir2127

O ir2127 é um *Driver* de acionamento de MOSFETs de potência com rápido chaveamento, sua entrada lógica é compatível com saídas padrão CMOS ou LSTTL, até 3,3 V. A figura 12 mostra os pinos deste CI, que é utilizado neste projeto.

FIGURA 12: Pinos do ir2127.



Fonte: http://www.infineon.com/dgdl/ir2127.pdf

A tabela 2 mostra os pinos do ir2127 e suas recomendações de uso.

TABELA 2: Recomendações de uso do ir2127.

Symbol	Definition		Min.	Max.	Units
V_B	High Side Floating Supply Voltage	(IR2127/IR2128)	V_S + 12	V_S + 20	V
		(IR21271)	V_S + 9	V_S + 20	
V_S	High Side Floating Offset Voltage		Note 1	600	
V_{HO}	High Side Floating Output Voltage		V_S	V_B	
V_{CC}	Logic Supply Voltage		10	20	
V_{IN}	Logic Input Voltage		0	V_{CC}	
V_{FLT}	$\overline{\text{FAULT}}$ Output Voltage		0	V_{CC}	
V_{CS}	Current Sense Signal Voltage		V_S	V_S + 5	
T_A	Ambient Temperature		-40	125	°C

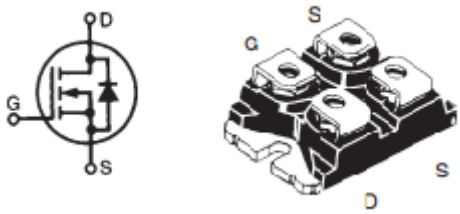
Note 1: Logic operational for V_S of -5 to +600V. Logic state held for V_S of -5V to $-V_{BS}$. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Fonte: http://www.infineon.com/dgdl/ir2127.pdf

2.5.2 O MOSFET IXFN420N10T

Para o acionamento do motor de propulsão do barco é usado um transistor MOSFET de potência capaz de suportar alta corrente elétrica (Id), que é controlada a partir da tensão Vgs. Para este projeto desenvolvido pela equipe Zênite é utilizado o MOSFET IXFN420N10T, cujo símbolo e imagem são mostrados na figura 13.

FIGURA 13: Mosfet de potencia IXFN420N10T (símbolo à esquerda).



Fonte: http://ixapps.ixys.com/DataSheet/DS100199A(IXFN420N10T).pdf (imagem editada pelo autor)

Onde G é referente ao *Gate*, D é o *Drain* e S é o *Source*.

Suas principais características elétricas são apresentadas na tabela 3 (IXYS CORPORATION, 2015).

TABELA 3: Principais características elétricas do IXFN420N10T .

Símbolos	Valores	Unidade
Vds	100	V
Id25	420	A

Rds(on)	2,3m	Ω
trr	140n	s
Vgs	+-20	V

Fonte: IXYS CORPORATION, 2015.

2.6 Linguagem de Programação

Para o funcionamento do microcontrolador Atmega328p é necessário que o mesmo seja programado para a execução dos processos lógicos desejáveis. Este componente foi desenvolvido para ser programado em linguagem *Assembly* ou C. Para este projeto foi escolhido usar a linguagem de programação C++, facilitando a implementação da lógica de funcionamento do sistema de comunicação eletrônica entre o piloto, o motor de propulsão e as bombas de porão. Segundo Lima e Villaça (20012, p.67) a linguagem C possui algumas vantagens em relação ao *Assembly*:

> Redução do tempo de desenvolvimento. Como o C é uma linguagem estruturada, fica relativamente fácil criar estruturas lógicas e escrever o código. Existe uma infinidade de bibliotecas com funções disponíveis. [...]
> Como os códigos são de fácil escrita, o reuso dos códigos é facilitado, principalmente pela criação de funções próprias.

3. Metodologia

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso, segundo sua finalidade, é o de desenvolvimento experimental. Quanto aos objetivos, esta pesquisa classifica-se como exploratória. Para Gil (2010, p.27), desenvolvimento experimental é:

> Trabalho sistemático, que utiliza conhecimentos derivados da pesquisa ou experiência prática com vistas à produção de novos materiais, equipamentos, políticas e comportamentos, ou melhorias de novos sistemas e serviços.

Segundo Vânia Maria do Nascimento Duarte, no seu artigo publicado no site Monografias Brasil Escola, a pesquisa exploratória consiste em permitir maior familiaridade entre o pesquisador e o tema pesquisado. Por ser uma pesquisa bastante específica, pode-se afirmar que esta assume a forma de um estudo de caso, sempre com base em outras fontes, como é o caso da pesquisa bibliográfica e das entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado.

Tendo em vista estes conceitos, é proposta, inicialmente, a análise das necessidades de controle entre o piloto, o motor de propulsão e as bombas de porão do barco. Com a execução desta etapa propõe-se a elaboração dos circuitos eletrônicos e de *softwares* para o

envio de sinais elétricos responsáveis pelos acionamentos do motor de propulsão e bombas de porão por solicitação do piloto.

Primeiramente esta comunicação é realizada através de fios, buscando que esta seja menos sensível às interferências ou ruídos elétricos. Em um segundo momento, a comunicação será feita sem a utilização de fios (*wireless*). Por último, são realizados os testes em bancada e no barco com a utilização de equipamentos de medição para obtenção de dados, com o objetivo de apresentar os resultados deste trabalho.

4. Desenvolvimento do *Hardware*

Para desenvolver os circuitos eletrônicos (*hardware*) utilizados nos sistemas de comunicação de um barco movido à energia solar, foi realizado um levantamento dos requisitos de projeto, um diagrama de blocos geral, além da pesquisa para definição dos circuitos e componentes a serem utilizados.

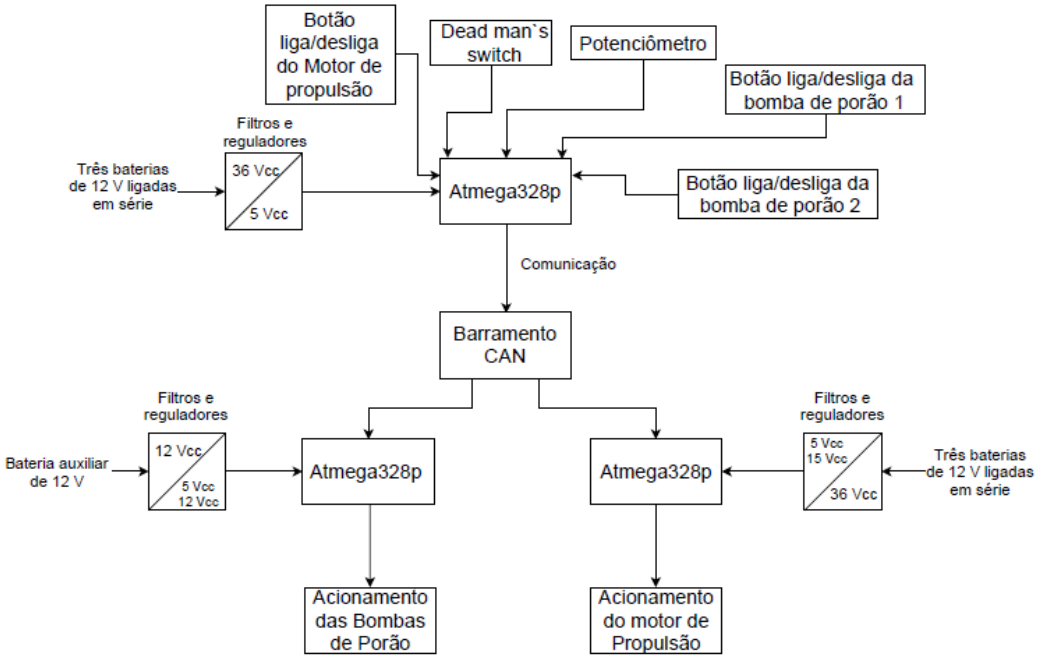
Os requisitos e especificações do projeto foram levantados em conjunto com integrantes da equipe Zênite Solar. Definiu-se que os sistemas de comunicação do barco movido à energia solar deve seguir os seguintes critérios:

- O sistema deve ser microcontrolado, utilizando-se o Atmega328p.
- Deve haver dois botões liga/desliga para acionamento das duas bombas de porão independentemente.
- As bombas de porão serão acionadas com a ativação de relés.
- Uma bateria auxiliar de 12 V é utilizada para o acionamento das bombas de porão.
- O motor de propulsão também possuirá um botão liga/desliga.
- O controle da razão cíclica para controle de velocidade do motor será realizado a partir da leitura de um potenciômetro de 2 kΩ.
- O sistema deve possuir uma chave de segurança, que desativa o motor de propulsão em caso de queda do piloto na água. Esta chave é conhecida por *Dead Man`s Switch*.
- Três baterias de 12 V são ligadas em série para acionamento do motor de propulsão.
- O envio de dados por fios, para acionamento das bombas de porão e para o motor de propulsão, é realizado através do protocolo CAN.

- Por fim, na segunda etapa deste trabalho, o envio de dados sem fios (*wireless*), para acionamento das bombas de porão e para o motor de propulsão, é realizado via Bluetooth.

Com base nos requisitos de projeto citados acima, foram esboçados dois diagramas de blocos simplificados do sistema de controle das bombas de porão e do motor de propulsão, sendo o diagrama da figura 14 referente ao sistema de comunicação via fios (Barramento CAN) e o da figura 15 referente ao sistema sem fios (*Bluetooth*).

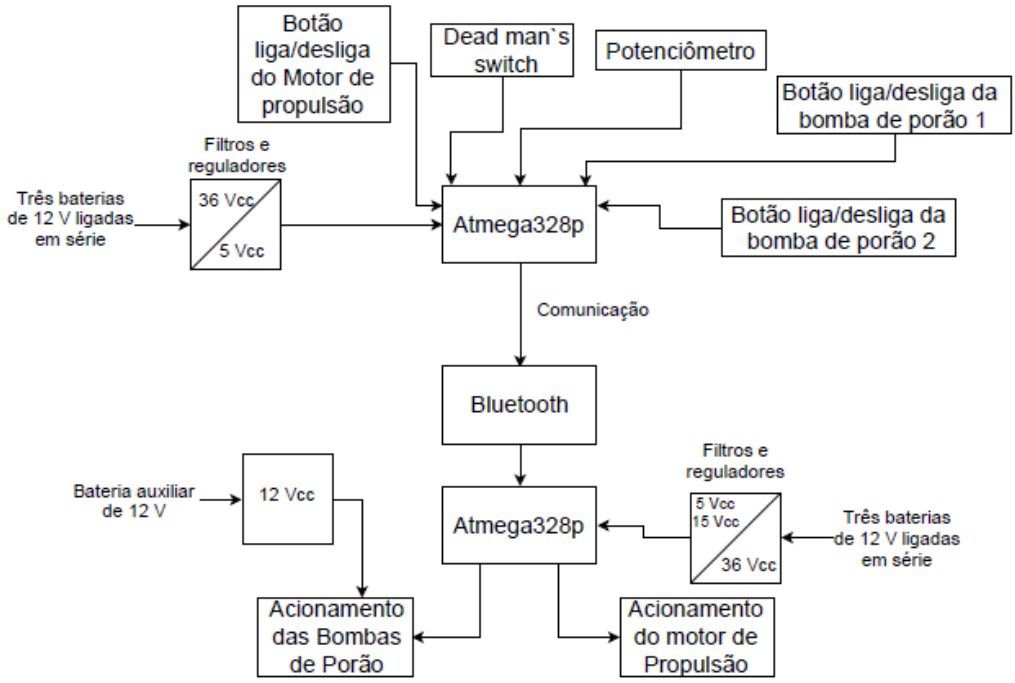
FIGURA 14: Diagrama de blocos simplificado do painel de comunicação com fios (Protocolo CAN).



Fonte: Autor.

A figura 15 ilustra um diagrama do sistema para o painel de comunicação para acionamento das bombas de porão e do motor de propulsão via sinal de radiofrequência (Bluetooth).

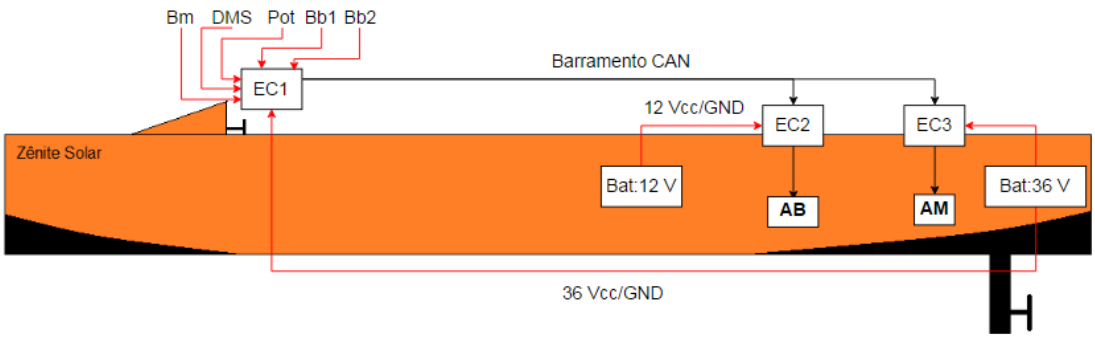
FIGURA 15: Diagrama de blocos simplificado do painel de comunicação sem fios (*Bluetooth*).



Fonte: Autor.

A partir dos requisitos de projeto e dos diagramas de blocos é possível fazer uma aproximação de como o sistema de comunicação com fios (Protocolo CAN) será distribuído no casco do barco, a figura 16 ilustra esta distribuição:

FIGURA 16: Disposição do sistema de comunicação via protocolo CAN.



Fonte: Autor.

Onde:

EC1-Estação CAN 1: Esta é a placa da proa, responsável por fazer a leitura dos comandos do piloto e enviá-los para o barramento CAN. Sua tensão de alimentação é proveniente do banco de baterias principal (três baterias de 12 V em série). Nesta placa é

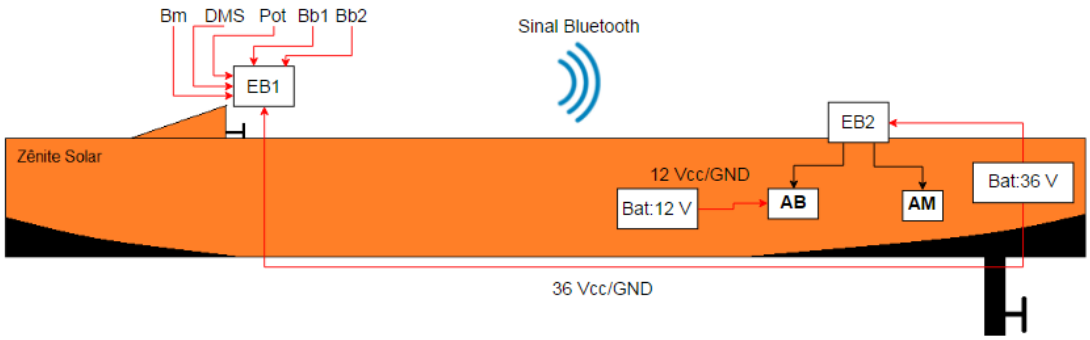
conectado o botão liga/desliga do motor de propulsão (Bm), o *Dead Man`s Switch* (DMS), o potenciômetro de 2 kΩ (Pot) e os botões de acionamento das bombas de porão (Bb1, Bb2).

EC2-Estação CAN 2: Esta placa é localizada na popa, sua função é receber os dados via barramento CAN relacionados ao acionamento das bombas de porão. A tensão de alimentação é proveniente da bateria auxiliar de 12 V. AB é o acionamento das bobas de porão.

EC3-Estação CAN 3: Também localizada na popa do barco, esta placa é responsável por receber os dados provenientes do barramento CAN referentes ao acionamento do motor de propulsão, sua tensão de alimentação é fornecida pelo banco de baterias principal. AM é o acionamento do motor de propulsão.

A figura 17 ilustra a disposição do sistema de comunicação sem fio (*Bluetooth*) no barco.

FIGURA 17: Disposição do sistema de comunicação via *Bluetooth*.



Fonte: Autor.

Onde:

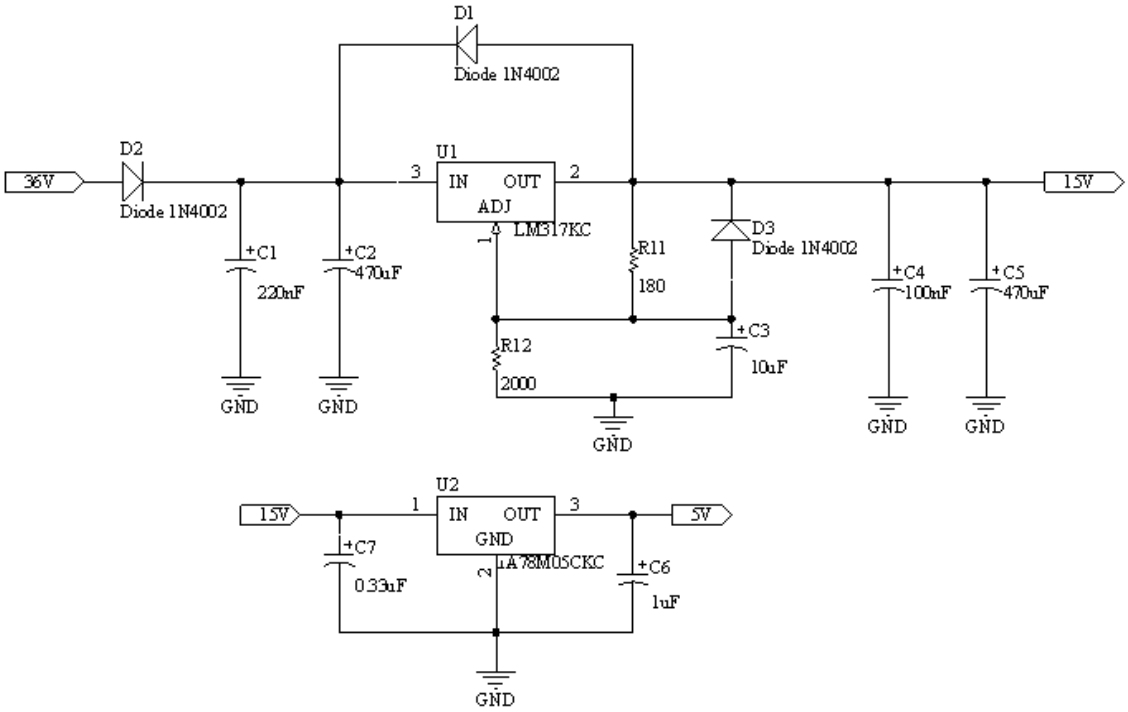
EB1-Estação Bluetooth 1: Esta é a placa da proa, responsável por fazer a leitura dos comandos do piloto e enviá-los através do sinal Bluetooth. Sua tensão de alimentação é proveniente do banco de baterias principal (três baterias de 12 V em série). Nesta placa é conectado o botão liga/desliga do motor de propulsão (Bm), o *Dead Man`s Switch* (DMS), o potenciômetro de 2 kΩ (Pot) e os botões de acionamento das bombas de porão (Bb1, Bb2). É importante citar que este circuito é alimentado com 36 V, pois tensões baixas são mais sensíveis a ruídos elétricos, o que poderia prejudicar o funcionamento do sistema.

EB2-Estação Bluetooth 2: Localizada na popa do barco, esta placa é responsável por receber os dados provenientes do sinal Bluetooth referentes ao acionamento do motor de propulsão e das bombas de porão, sua tensão de alimentação é fornecida pelo banco de baterias principal. Esta placa transmite, através de fios, os sinais para uma placa secundária onde estão os relés para acionamento das bombas de porão, por isso AB (acionamento de bombas) é ligada a bateria auxiliar de 12 V. AM é o acionamento do motor de propulsão.

4.1 Esquemáticos dos reguladores de tensão

A tensão de alimentação da placa da proa e da popa, tanto para o sistema de comunicação via protocolo CAN quanto para o sistema de comunicação via *Bluetooth*, é fornecida pelo banco de baterias principal, que disponibiliza, aproximadamente, 36 V. Para o funcionamento do microcontrolador (Atmega328p), do controlador CAN (MCP2515), do *transceiver* (MCP2551) e do módulo Bluetooth (HC05) é necessária uma tensão de 5 V, por isso são usados reguladores lineares de tensão, cuja configuração é mostrado na figura 18.

FIGURA 18: Configuração dos reguladores de tensão das placas da proa para o sistema de comunicação CAN e Bluetooth.



Fonte: Autor.

Para regular a tensão de alimentação, na placa da proa, o sistema conta com dois estágios de regulação, onde no primeiro se usa o CI LM317, que foi configurado para ter entrada de 36 V e saída de 15 V. No segundo estágio, o CI LM7805 regula a tensão de 15 V para 5 V. Com base no estudo da folha de dados (Texas Instruments, 2016) do regulador LM317 é calculado o valor do resistor R12 responsável por ajustar a tensão de saída desejada.

Com a equação 1 é calculado o valor de resistor R12 , sendo R11 definido com valor de 180 Ω. I_{adj} = 50 µA (corrente de ajuste), V_{ref} = 1,25 V (tensão sobre R_{11}) e V_o = 15 V (tensão de saída).

$$V_o = V_{ref}\ (1 + \frac{R_{12}}{R_{11}}) + I_{adj} * R_{12} \quad (1)$$

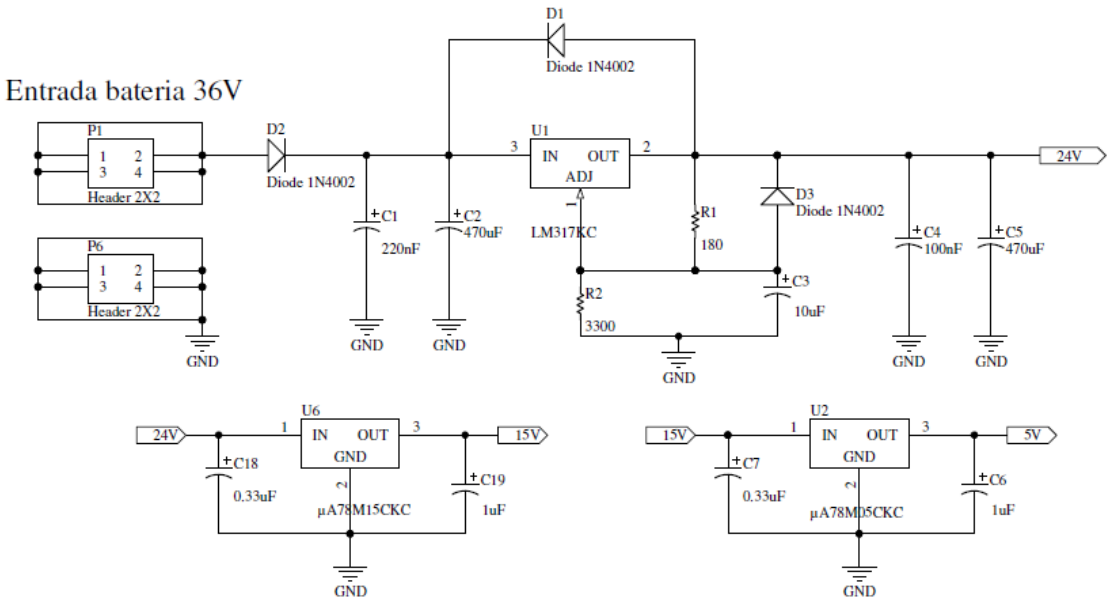
$$15 = 1.25\ (1 + \frac{R_{12}}{180}) + 50x10^{-6} * R_{12}$$

$$R_{12} = 1{,}966x10^{3}\ \Omega.$$

Este valor de resistência não é encontrado comercialmente, por isso foi escolhido um valor ôhmico de 2 $k\Omega$. Os capacitores C_1 , C_2 , C_4 e C_5 atuam como estabilizadores das tensões de entrada e saída. O capacitor C_3 é recomendado para rejeição de *ripple* de saída. O diodo D_2 é usado para garantir sentido único de corrente elétrica. A baixa impedância do diodo D_1 é utilizada para descarga elétrica dos capacitores C_4 e C_5 garantido que a descarga não seja sobre a saída do regulador, já o D_3 garante a descarga do capacitor C_3. Os capacitores ligados ao LM7805 são recomendados pelo fabricante (Texas Instruments, 2003).

Para regular a tensão de alimentação, na placa da popa, o sistema conta com um estágio de regulação a mais em relação à placa da proa. Isto é feito para dividir a dissipação de potencia entre os reguladores, evitando sobreaquecimento. A figura 19 mostra esta configuração:

FIGURA 19: Configuração dos reguladores de tensão das placas da popa para o sistema de comunicação CAN e *Bluetooth*.



Fonte: Autor.

O regulador LM317 foi configurado para ter uma tensão de saída no valor de V_o = 24 V, o sistema foi acrescido do CI LM7815, que regula a tensão de 24 V para 15 V e por último o

regulador LM7805 regula de $15\ V$ para $5\ V$. A EQUAÇÃO 1 é novamente utilizada para cálculo de resistor de ajuste da tensão de saída, agora representado como R_2.

$$V_o = V_{ref}\ (1 + \frac{R_2}{R_1}) + I_{adj} * R_2 \quad (1)$$

$$24 = 1.25\ (1 + \frac{R_2}{180}) + 50\mu * R_2$$

$$R_2 = 3{,}25x10^3\ \Omega.$$

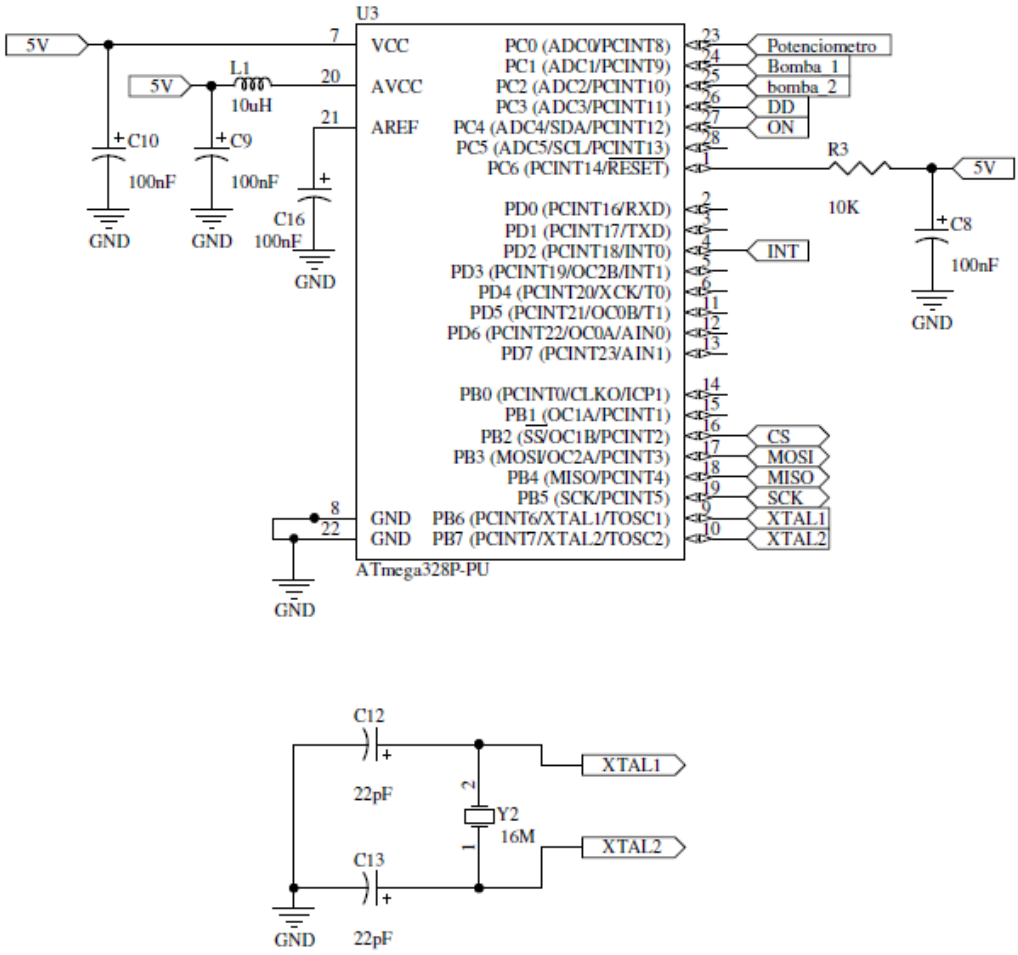
Como este valor de resistência não é comercial foi escolhido o valor de $3{,}3k\ \Omega$. Em relação aos capacitores ligados ao regulador LM7815, este são recomendados pelo fabricante (Fairchild Semiconductor, 2012).

No sistema de comunicação via protocolo CAN há uma placa para o acionamento das bombas de porão, esta placa é conectada à bateria auxiliar de $12\ V$. Como o circuito lógico precisa ser alimentado com uma tensão de $5\ V$, bastou somente utilizar um regulador LM7805. A corrente de acionamento das bombas de porão não passa por este regulador, caso contrário este não suportaria, pois as bombas quando acionadas podem drenar, aproximadamente $4\ A$, sendo a capacidade de corrente deste regulador de $1{,}5\ A$.

4.2 Esquemáticos do Atmega328p para comunicação via Protocolo CAN

O esquemático do microcontrolador, utilizado na placa da proa para o sistema de comunicação com fios utilizando o protocolo CAN, é apresentado na figura 20:

FIGURA 20: Esquemático do Atmega328p da placa da proa.



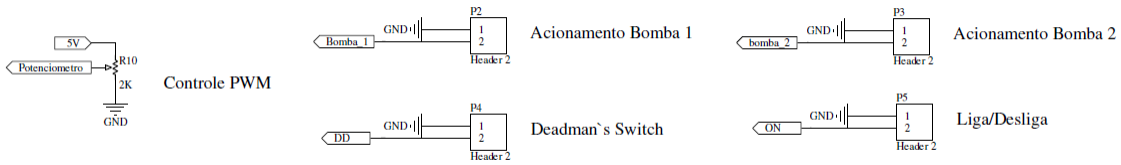
Fonte: Autor.

Este microcontrolador é responsável por ler os comandos de acionamento determinados pelo piloto do barco, sendo o pino 23 a entrada do potenciômetro, o pino 24 e 25 as entradas dos botões para os acionamentos das bombas de porão 1 e 2 respectivamente, o pino 26 é a entrada da chave de segurança (*Dead man`s switch*) e, por último, o pino 27 é a entrada do botão de acionamento do motor de propulsão. Os pinos 16 ao pino 19 são utilizados pela Interface Serial Periférica (SPI) para comunicação com o controlador CAN MCP2515, onde o pino 16 é o *Slave Select* (SS), cuja função é habilitar ou desabilitar determinado periférico (escravo). O pino 17 (MOSI), *Master Out Slave In*, é usado para envio de dados do mestre para o escravo, já o pino 18 (MISO), *Master In Slave Out*, é usado para envio de dados do escravo para o mestre. Por último, o pino 19 (SCK), *Serial Clock*, é o sinal de *clock* gerado pelo mestre para sincronização de transmissão dos dados. O pino 7 (VCC) é ligado ao barramento de 5 V fornecidos pelo regulador LM7805, junto a este pino há um capacitor de desacoplamento C_{10} de 100 nF. O pino 20 (AVCC) é também ligado ao barramento de 5 V, por este pino é fornecida tensão aos conversores analógico/digital do microcontrolador. É ligado a

este pino um filtro passa baixa, composto pelo indutor L_1 de $10\,\mu H$ e pelo capacitor C_9 de $100\,nF$. O pino 21 (AREF) é a referência do ADC. O pino 1 (Reset) é ligado à tensão de 5 V. Os pinos $9\ e\ 10$ devem ser ligados ao oscilador externo formado pelo Cristal de 16 MHz e pelos capacitores C_{12} e C_{13}, ambos de $22\,pF$. Por último, o pino 4 (INT0) recebe sinal da interrupção vindo do controlador CAN, MCP2515.

A figura 21 mostra as entradas dos comandos do piloto. São utilizados conectores de duas vias para a conexão dos botões de liga/desliga do motor de propulsão, das bombas de porão, da chave de segurança (*Dead Man`s switch*) e um conector de três vias para o potenciômetro. Estes botões quando acionados impõem nível baixo aos pinos de entrada do microcontrolador, estes pinos tiveram seus resistores de *pull-up* (sempre nível alto) ativados via programação.

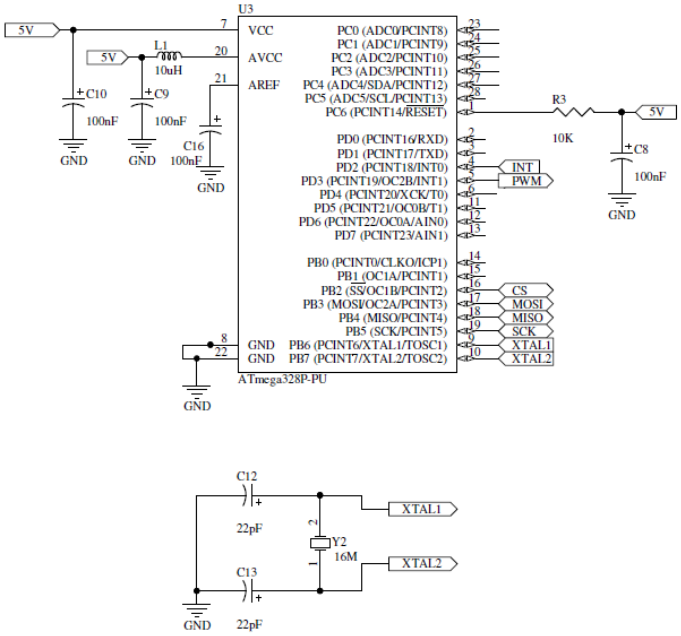
FIGURA 21: esquemático das entradas dos comandos do piloto.



Fonte: Autor.

A figura 22 mostra o esquemático do Atmega328p da placa da popa para o sistema de comunicação com fio via protocolo CAN.

FIGURA 22: Esquemático do Atmega328p da placa da popa.

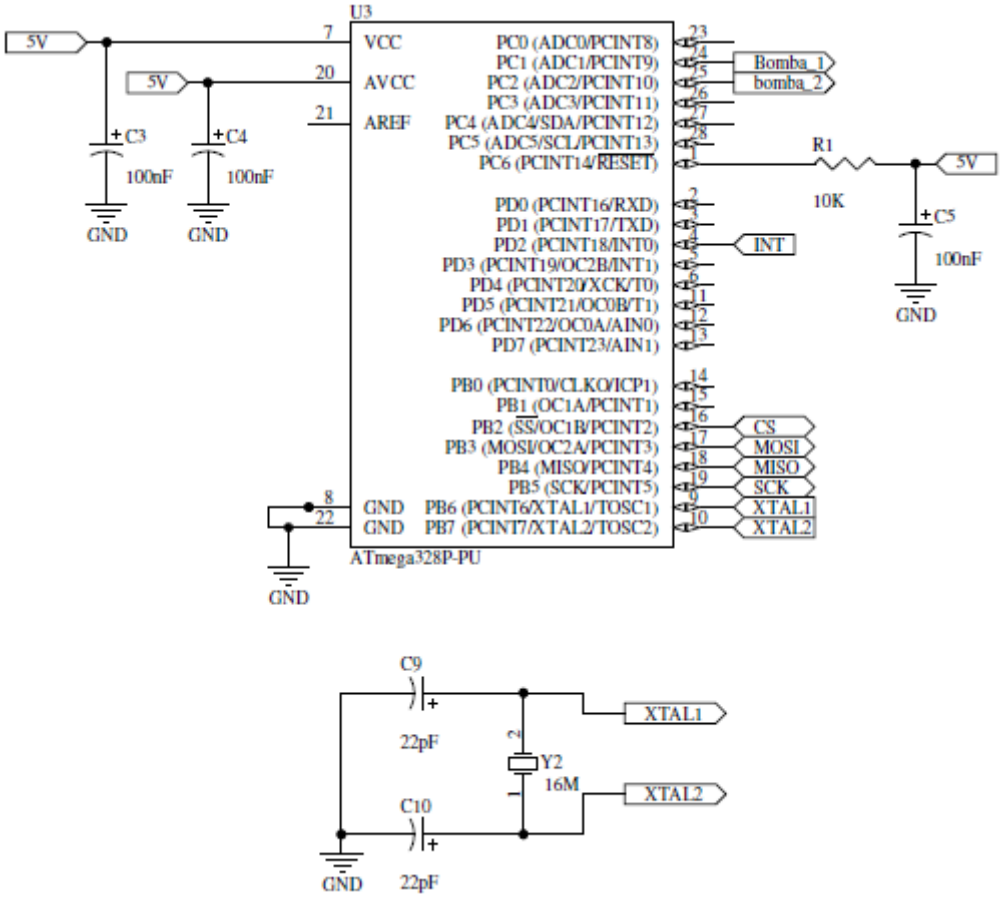


Fonte: Autor.

As conexões do microcontrolador da placa da popa, para o acionamento do motor de propulsão, são as mesmas em relação ao Atmega328p da placa da proa, porém não possui mais as entradas de comando do piloto (botões de acionamento das bombas de porão e motor de propulsão, *Dead Man`s Switch* e potenciômetro), possui um pino de saída do sinal PWM (pino 5).

A figura 23 mostra o esquemático do Atmega328p da placa de acionamento das bombas de porão para o sistema de comunicação com fio via protocolo CAN.

FIGURA 23: Esquemático do Atmega328p da placa para acionamento das bombas.



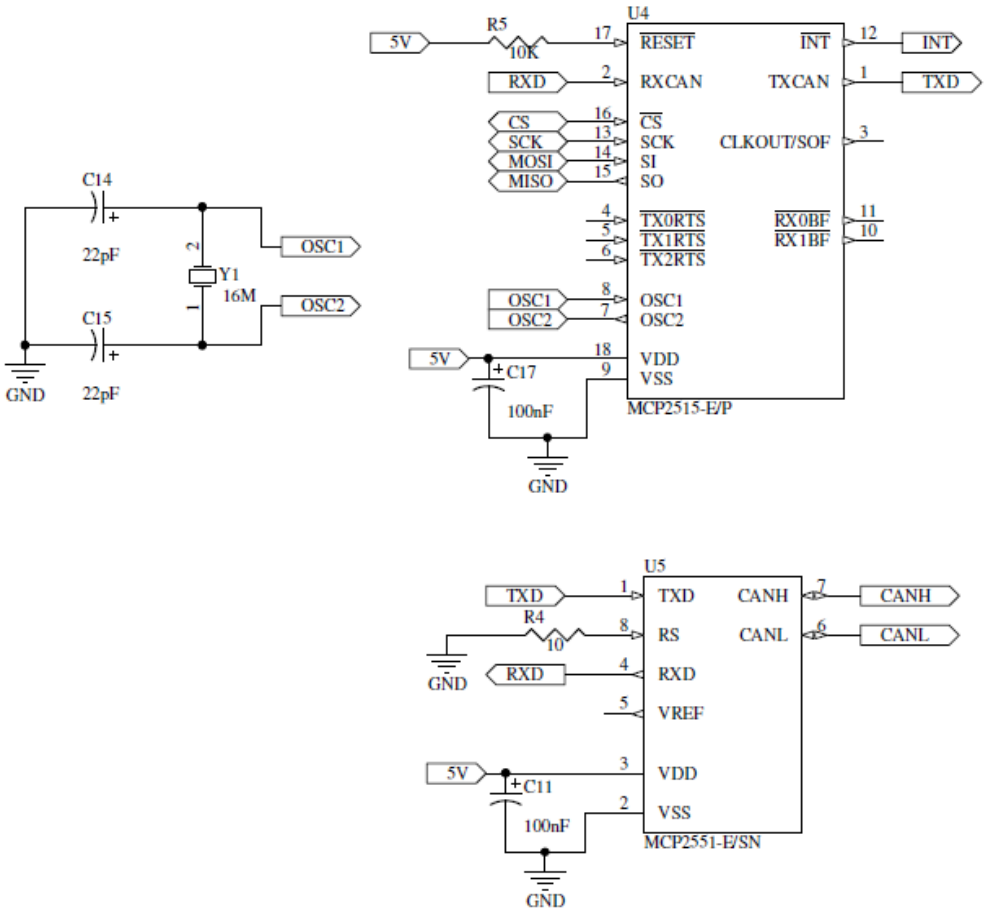
Fonte: Autor.

No esquemático do microcontrolador da placa de acionamento das bombas de porão via protocolo CAN os pinos 24 e 25 são as saídas dos sinais para acionar os relés e consequentemente as bombas. A tensão que alimenta esta placa vem da bateria auxiliar de 12 V. Os relés de acionamento das bombas fazem parte placa.

4.3 Esquemático do MCP2515 e MCP2551

Para viabilizar a comunicação entre os microcontroladores Atmega328p via Protocolo CAN foi inserido ao projeto o controlador MCP2515 e o *transceiver* MCP2551. Todas as placas do sistema de comunicação com fios possuem estes CIs conectados como mostrado no esquemático da figura 24:

FIGURA 24: Esquemático MCP2515 e MCP2551.



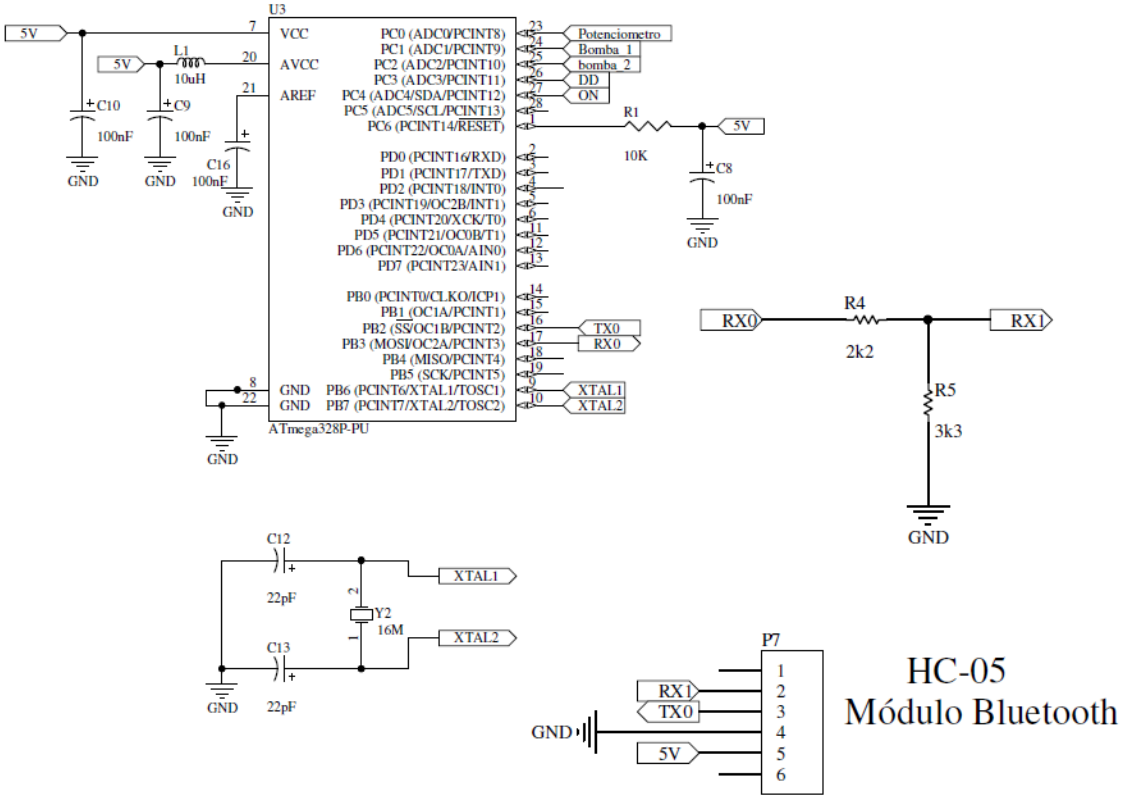
Fonte: Autor.

O MCP2515 se comunica com o Atmega328p via SPI através dos pinos 13 ao 16. Os pinos 1 e 2 (TXCAN e RXCAN) são ligados ao MCP2551, que é o transceptor responsável por adequar as tensões para transmissão via barramento CAN. Este barramento é ligado aos pinos 6 e 7 do transceptor através de um conector de duas vias.

4.4 Esquemáticos do Atmega328p para comunicação via *Bluetooth*

O esquemático do microcontrolador, utilizado na placa da proa para o sistema de comunicação sem fios via *Bluetooth*, é apresentado na figura 25:

FIGURA 25: Esquemático da placa da proa com comunicação Bluetooth.



Fonte: Autor.

Os pinos 23 ao 27 são utilizados para leitura dos comandos do piloto da embarcação, sendo o pino 23 a entrada do potenciômetro, o pino 24 e 25 as entradas dos botões para os acionamentos das bombas de porão 1 e 2 respectivamente, o pino 26 é a entrada da chave de segurança (Dead man`s switch) e, por último, o pino 27 é a entrada do botão de acionamento do motor de propulsão.

O microcontrolador Atmega328p se comunica via serial (USART, *Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver/Transmitter*) com o módulo *Bluetooth* (HC05), através dos pinos 16 $(TX0)$ e $17(RX0)$. O nível do sinal de comunicação serial deste módulo é de 3,3 V, por isso é utilizado um divisor de tensão entre o TX do microcontrolador e o RX do módulo, reduzindo o nível lógico de 5 V para aproximadamente 3 V. Admitindo um valor de resistor de $3{,}3k\,\Omega\,(R5)$ ligado ao GND, basta aplicar a equação 2 para achar o valor ôhmico do resistor $R4$.

$$V_{out} = \frac{R5}{R4+R5} * V_{in} \qquad (2)$$

Onde, V_{out}=$3V$(tensão de saída) e V_{in}=$5V$(tensão de entrada).

Aplicando-se os valores na EQUAÇÃO 2 tem-se que:

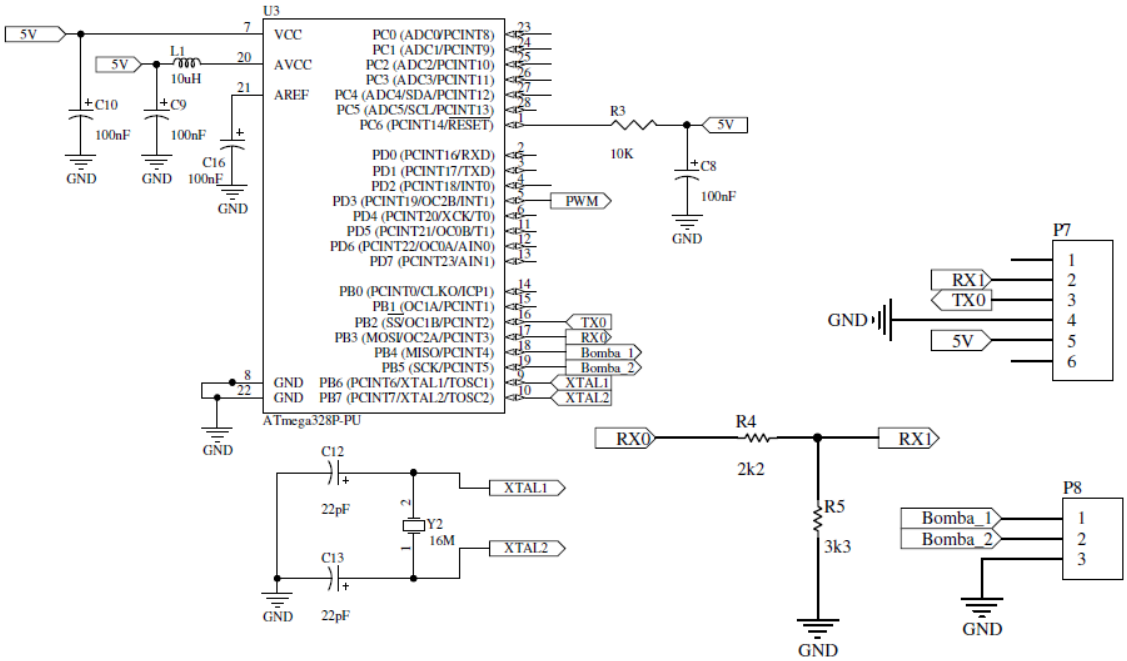
$$3 = \frac{3{,}3x10^3}{R4+3{,}3x10^3} * 5$$

$$R4 = 2{,}2x10^3\ \Omega$$

Na FIGURA 23 o elemento $P7$ é uma barra de soquete fêmea com 6 vias, utilizada para encaixar o módulo *Bluetooth*. Além dos pinos RX e TX, é por esta barra que é conectado VCC (5 V) e GND ao HC05 . Para a conexão dos botões, potenciômetro e *do Dead Man`s Switch* também são utilizados conectores.

O esquemático do Atmega328p da placa da popa, para o sistema de comunicação sem fio (Bluetooth), é mostrado na figura 26:

FIGURA 26: Esquemático da placa da popa com comunicação *Bluetooth*.



Fonte: Autor.

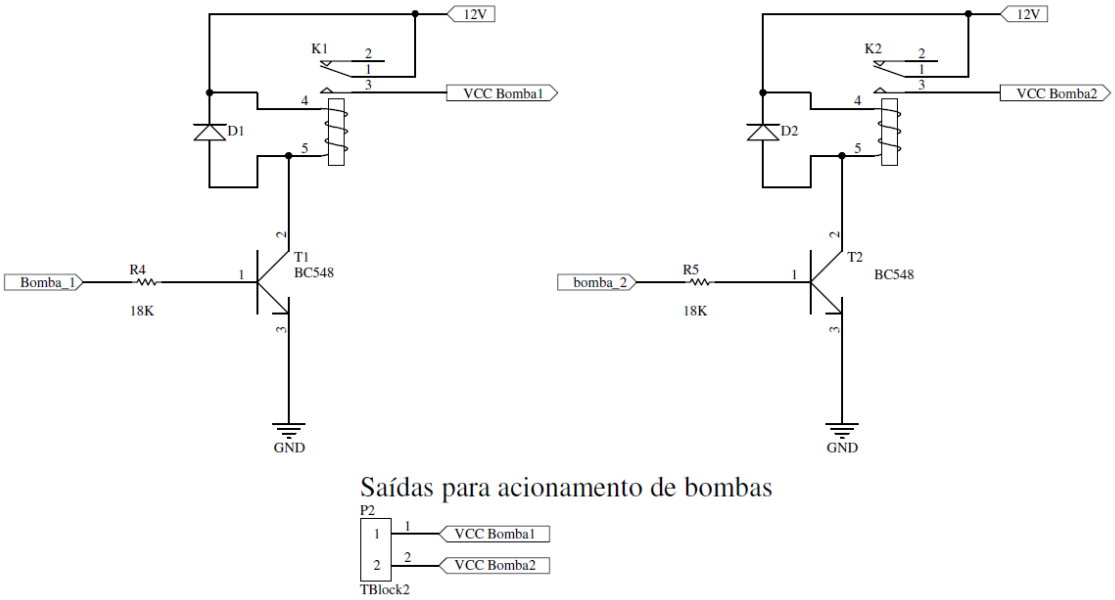
Na figura 26 o elemento $P7$ é o conector do módulo HC05 e o elemento $P8$ é um conector de três vias para conexão da placa com os relés de acionamento das bombas de porão. Os sinais para o acionamento das bombas vêm dos pinos 18 e 19 do microcontrolador, e para o acionamento do motor de propulsão o sinal PWM vem do pino 5. Para este sistema de comunicação via *Bluetooth* é utilizado apenas dois Atmega328p, ambos alimentados com tensão proveniente do banco de baterias principal. Apenas uma placa de acionamento com os

relés é ligada à bateria auxiliar de 12 V, como os sinais de acionamentos dos relés vem da placa com o Atmega328p, é necessário que suas referencias (GND) sejam conectadas, por isso o conector P8 possui uma via conectada ao GND.

4.5 Esquemático dos relés para acionamento das bombas de porão

Para ambos os sistemas de comunicação, com ou sem fio, o esquemático dos relés de acionamento das bombas de porão é o mesmo, como mostra a figura 27.

Figura 27: Esquemático do relé JQC-3F(T73).



Fonte: Autor.

As bases dos transistores BC548 recebem os sinais elétricos vindos dos pinos 24 e 25 do microcontrolador do sistema de comunicação via Protocolo CAN e dos pinos 18 e 19 do microcontrolador do sistema de comunicação via *Bluetooth* para acionar as bombas de porão. Entre as saídas do Atmega328p e as bases dos transistores há um resistor ($R4\ e\ R5$), que sua função é limitar a corrente de base e consequentemente protegerem os pinos de saída do microcontrolador, que suporta até $40\ m$A. Para calculo da corrente de base é utilizada a equação 3:

$$Ib = \frac{Ic}{hfe} \tag{3}$$

Onde Ib é a corrente de base, Ic é a corrente de coletor, hfe é a fator de ganho do transistor.

Sabendo-se que a resistência interna da bobina do relé é de $400\,\Omega$ e que a tensão fornecida pela bateria auxiliar é de $12\,V$, calcula-se a corrente de coletor.

$$Ic = \frac{12}{400} = 30x10^{-3}\,A$$

Sendo o valor do hfe do transistor BC548 igual a 110 calcula-se a corrente de base para posteriormente calcular o resistor de base ($R4\ e\ R5$).

$$Ib = \frac{30m}{110} = 272{,}7x10^{-6}A$$

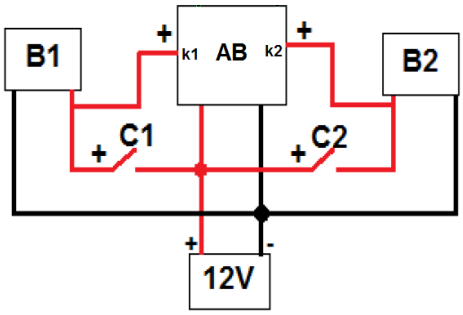
O valor da tensão de saída do pino do microcontrolodor é de $5\,V$ e sabendo-se o valor da corrente de base calcula-se o valor ôhmico para os resistores $R4\ e\ R5$ apresentados na FIGURA 25.

$$R4, R5 = \frac{5}{272{,}7\mu} = 18{,}33x10^{3}\Omega$$

Com a impossibilidade de encontrar este valor de resistor no comércio é utilizado o valor de $18\ k\Omega$, gerando uma corrente de $277{,}7\ \mu A$.

Na figura 27 o elemento $P2$ é um conector de duas vias utilizado para ligar VCC (12 V) às bombas de porão quando o relé é acionado. Estas bombas são ligadas ao GND da bateria diretamente e possuem uma chave de nível, que fecha o circuito quando o nível de água dentro do barco atinge certa altura. Os relés são ligados em paralelo á essa chave de nível como mostra a figura 28:

FIGURA 28: visão geral de acionamento das bombas de porão.



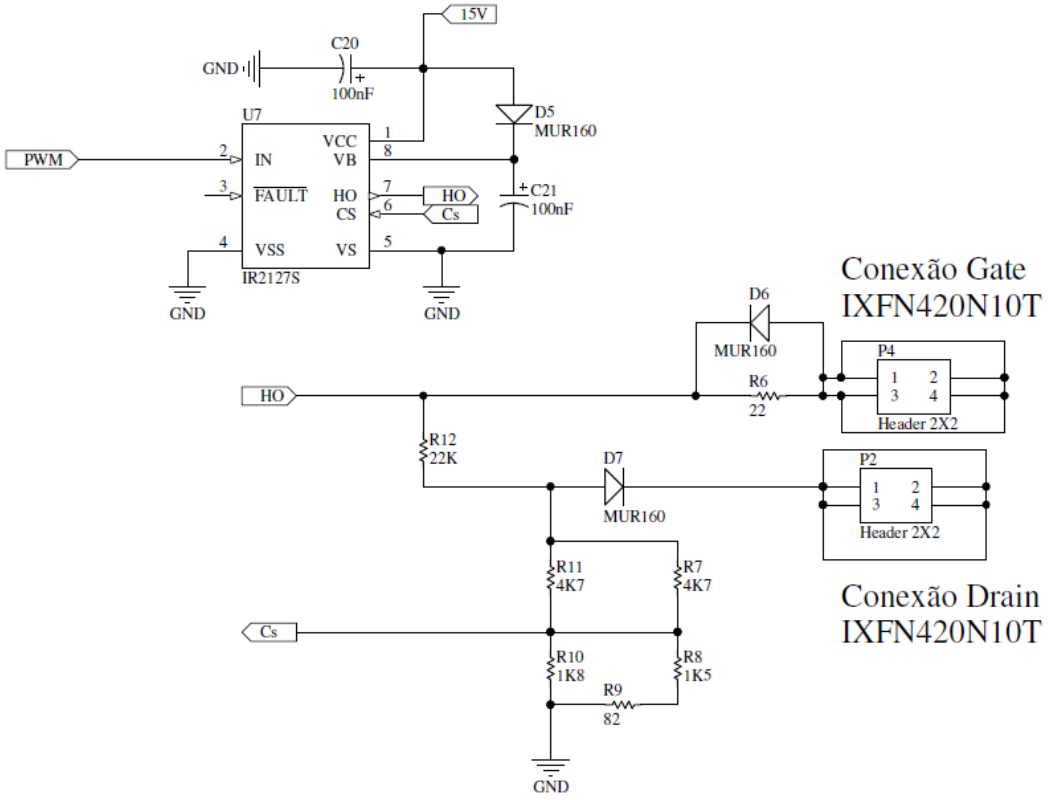
Fonte: Autor.

Onde $B1$ e $B2$ são as bombas de porão, $C1$ e $C2$ são as chaves de nível e AB é a placa de acionamento, ligada à bateria de $12\,V$, com os relés $k1$ e $k2$.

4.6 Esquemático do driver ir2127

O driver ir2127 é utilizado neste projeto para o acionamento do MOSFET de potência IXFN420N10T, que é acionado com tensão V_{gs} de $15\,V$ para correntes $Drain/Source$ superiores a $100\,A$. A figura 29 mostra este esquemático.

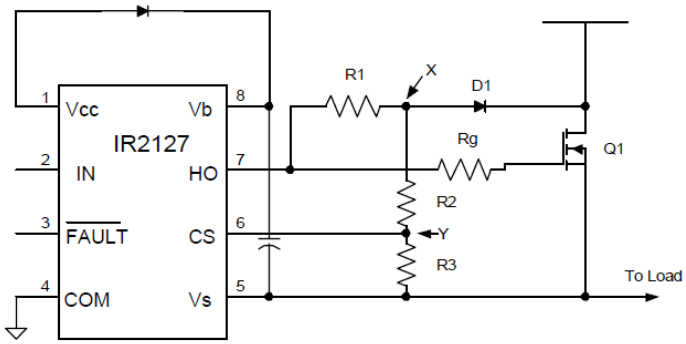
FIGURA 29: esquemático do driver ir2127.



Fonte: Autor.

No circuito da figura 29 o pino HO (*High side gate drive output*) do CI ir2127 é conectado ao *gate* do MOSFET de potência, que é acionado com um sinal PWM de nível lógico de $15\,V$. A razão cíclica deste sinal é controla pelo sinal PWM de nível lógico de $5\,V$ gerado pelo Atmega328p e conduzido ao pino IN (*Logic input for gate driver output (HO), in phase with HO*) do *driver*. O pino CS (*Current sense input to current sense comparator*) é responsável por limitar a corrente Id no MOSFET de potência, evitando que o mesmo seja danificado. Para o limitador de corrente ser acionado é necessário aplicar uma tensão de $250\,mV$ no pino CS por um intervalo de tempo superior a $750\,ns$. A corrente Id máxima foi definida no valor de $130\,A$, com estas informações é possível calcular os resistores que compõem o divisor de tensão que é ligado ao pino CS. A figura 30 ajuda na análise do circuito para cálculo dos resistores do divisor de tensão.

FIGURA 30: Análise do circuito para cálculo dos resistores do divisor de tensão.



Fonte: http://www.infineon.com/dgdl/an-1014.pdf

Na figura acima o resistor R2 é referente aos resistores R7 e R11 da figura 29. O resistor R3 é referente aos resistores R8, R9 e R10 da figura 29. O ponto Y deve ter tensão de 250 mV para o limitador de corrente Id ser acionado. Com estas informações e com a Equação 4, equação 5 e Equação 6 é possível calcular os resistores R2 e R3.

$$\mathrm{Vds} = \mathrm{Idmáx} \,.\, \mathrm{Rds_{on}} \qquad (4)$$

Onde Vds é a Tensão $drain/source$ do Mosfet de potência representado por Q1, $\mathrm{Idmáx}$ é a Corrente de dreno máxima de $130\ A$ e $\mathrm{Rds_{on}}$ é a resistência interna do MOSFET (IXFN420N10T) de $2{,}3\ m\Omega$ para correntes (Id) superiores a $25\ \mathrm{A}$.

Substituindo pelos valores citados tem-se:

$$\mathrm{Vds} = 130 * 2{,}3x10^{-3}$$

$$\mathrm{Vds} = 0{,}299\ \mathrm{V}$$

Com o valor de Vds pode-se usar a Equação 5:

$$\mathrm{Vx} = \mathrm{Vds} + \mathrm{Vd1} \qquad (5)$$

Onde Vx é a tensão no ponto X da figura 30, $\mathrm{Vd1}$ é a tensão sobre diodo D1 (D7 na FIGURA 27) de $0{,}65\ V$.

Substituindo pelos valores citados tem-se:

$$\mathrm{Vx} = 0{,}299 + 0{,}65$$

$$\mathrm{Vx} = 0{,}949\ \mathrm{V}$$

Com este valor encontrado e sabendo-se o valor de $\mathrm{Vy} = 250\ \mathrm{mV}$, pode-se encontrar o valor de $\mathrm{R3}$ na Equação 6:

$$\mathrm{Vy} = \mathrm{Vx} \,.\, \frac{\mathrm{R3}}{\mathrm{R3+R2}} \qquad (6)$$

Onde $\mathrm{R2}$ equivale a $2350\ \Omega$ (paralelo de dois resistores de $4700\ \Omega$) e Vy é a tensão no pino CS.

Substituindo pelos valores citados tem-se:

$$250\text{x}10^{-3} = 0{,}949 \,.\, \frac{\text{R3}}{\text{R3} + 2350}$$

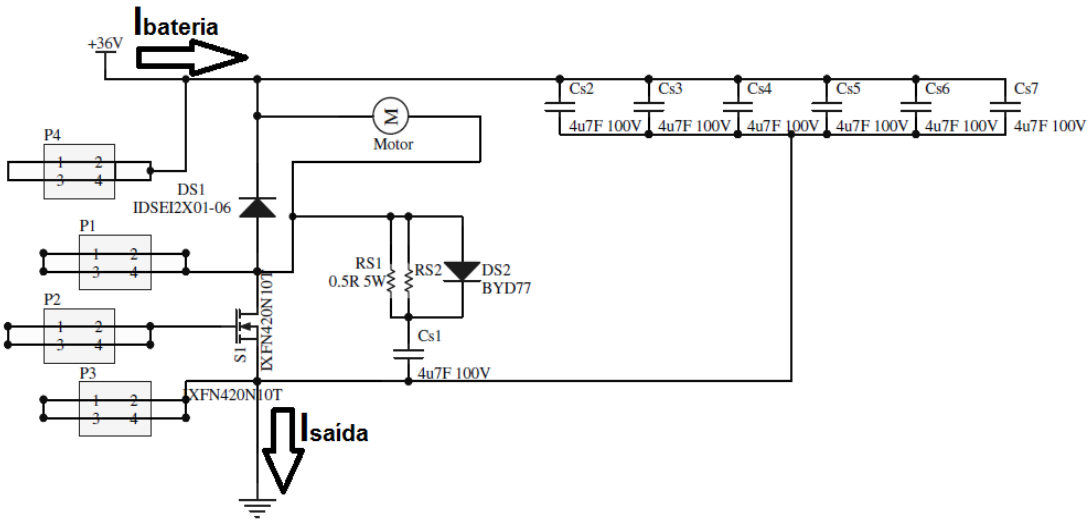
$$\text{R3} = 840\ \Omega$$

O resistor R3 equivale ao paralelo dos resistores R10 com a soma de R8 e R9 da figura 29, dando valor de $842\ \Omega$. O resistor R1 da figura 30 (R12 da figura 29) é tipicamente escolhido para ser de $22\ \text{K}\Omega$ para valores de Vbs igual a $15\ V$, este valor alto garante que não exista uma corrente significativa extraída da saída HO. O resistor Rg ($R6$ da figura 29) é escolhido com valor baixo ($22\ \Omega$) para otimizar a velocidade de comutação do MOSFET e reduzir as perdas por comutação.

4.7 Esquemático do Circuito de Acionamento do Motor.

O circuito Chopper (Conversor CC-CC), que compõe o MOSFET e o diodo de potência, foi desenvolvido pela Equipe Zênite Solar, é este circuito que receberá o sinal PWM gerado pelo controlador ir2127 (através do conector P7, mostrado na figura 31) e assim controlar a velocidade do Motor a partir da variação de tensão sobre ele. A figura 31 mostra o esquemático deste circuito.

FIGURA 31: Circuito com Mosfet e Diodo de potencia para acionamento do motor.



Fonte: Equipe Zênite Solar, 2016.

Os resistores RS1, RS2, o diodo DS1 e o capacitor Cs1 compõem um circuito *snubber* (grampeador de tensão), utilizado para reduzir picos de tensão sobre o MOSFET, de correntes da ressonância entre indutâncias e capacitância parasitas de trilhas dos circuitos e fios. Segundo Schlichting (2003, p.57):

> Estes picos de tensão têm como principal desvantagem a possibilidade de danificar o semicondutor por sobretensão. Portanto é necessário inserir um *snubber* de proteção dos semicondutores. Ao limitar o pico de tensão, o *snubber* propicia a redução de EMI gerada.

Na figura 31, o conector P5 é ligado ao conector P2 do circuito apresentado na figura 29. O conector P7 é ligado ao conector P4 da figura 29. Por último o conector P8 conecta o GND ao circuito da figura 29 e o diodo IDESEI2X01-06 é um diodo de potência utilizado como diodo de roda-livre para o motor DC.

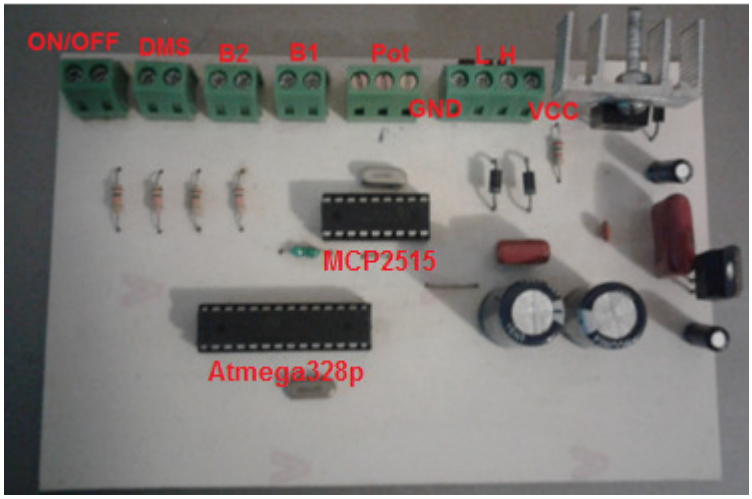
4.8 Placas de circuitos impressos.

Os layouts das placas utilizadas neste projeto foram feitos no software Altium Designer (ALTIUM, 2013). As figuras 32 à 38 mostram as placas de circuito impresso confeccionadas com placas de Fenolite, corroídas com percloreto de ferro.

4.8.1 Placas de circuitos impressos (Protocolo CAN).

A figura 32 mostra a placa de circuito impresso da proa com comunicação com fio via protocolo CAN.

FIGURA 32: Placa da proa com comunicação com fio (Protocolo CAN).

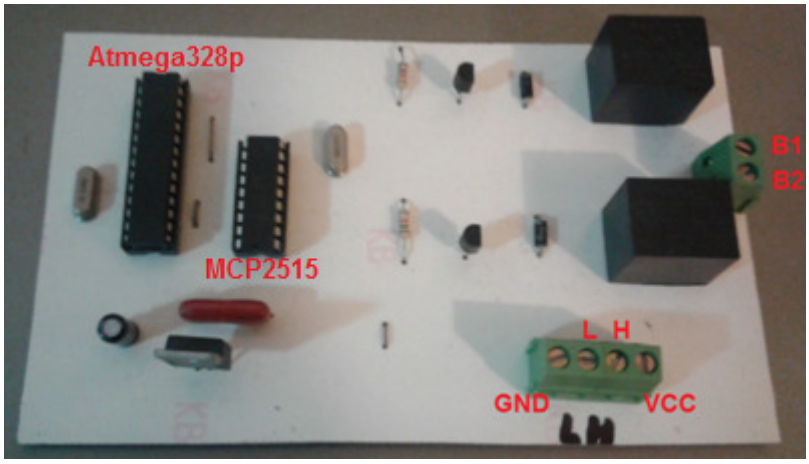


Fonte: Autor.

Os conectores da direita para esquerda da foto foram marcados com seus respectivos nomes, onde VCC (36 V), H (CAN_HIGH), L (CAN_LOW) e GND são conectados ao barramento CAN; Pot é conectado o potenciômetro de 2 kΩ; B1 e B2 são conectados aos seus botões para acionamento das bombas de porão; DMS é conectado à chave de segurança *Dead Man`s Switch* e por último, ON/OFF é conectado ao botão de ativação do motor de propulsão.

A figura 33 mostra a placa de acionamento das bombas com comunicação via protocolo CAN.

Figura 33: Placa de acionamento das bombas de porão via protocolo CAN.



Fonte: Autor.

Os conectores da direita para esquerda da foto foram marcados com seus respectivos nomes, onde B1 e B2 são ligados às bombas de porão; VCC (12 V) e GND são ligados à bateria auxiliar de 12 V; H (CAN_*HIGH*) e L (CAN_*LOW*) são conectados ao barramento CAN.

A figura 34 mostra a placa de circuito impresso desenvolvida pela Equipe Zênite Solar para o MOSFET de potência já instalada no barco. Nesta placa são conectadas as placas de controle de chaveamento, tanto com comunicação via fios (protocolo CAN), quanto sem fio (Bluetooth).

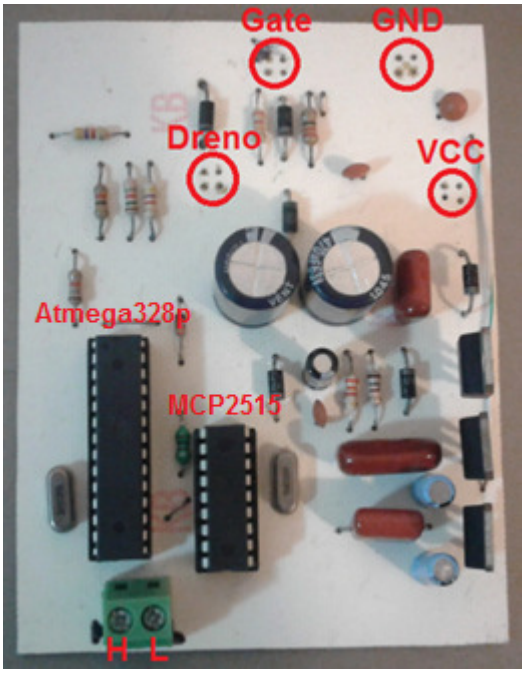
FIGURA 34: Placa de circuito impresso do mosfet de potencia.

Fonte: Equipe Zênite Solar.

A figura 34 mostra as conexões de *gate, dreno*, GND e VCC (36V) necessárias para o encaixe das placa de controle.

A Figura 35 mostra a placa de circuito impresso responsável por controlar o chaveamento do MOSFET de potência via protocolo CAN.

Figura 35: Placa de controle de chaveamento do MOSFET via protocolo CAN



Fonte: Autor.

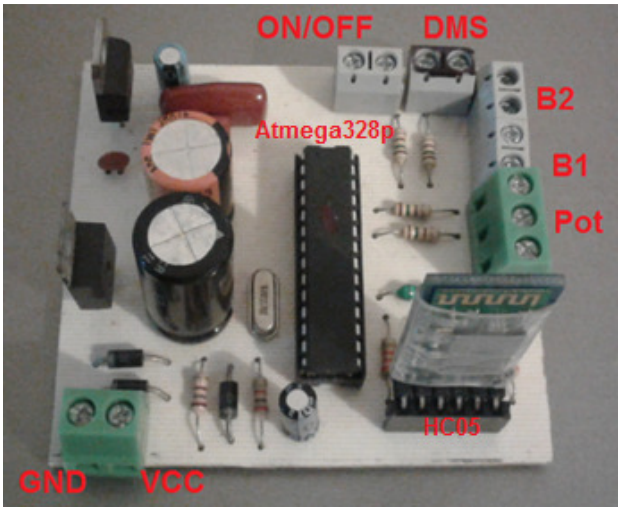
Na figura 35 é circulado os pinos de 4 vias que são encaixados nos conectores apresentados na figura 34. O conecto de duas é usado para conectar esta placa ao barramento CAN, onde H é o fio CAN_*HIGH* e L é o fio CAN_*LOW*.

Os CIs MCP2551 e ir2127 não aparecem nas imagens, pois são componentes SMDs, soldados na parte de baixo da placa de circuito impresso (*Bottom Layer*).

4.8.2 Placas de circuitos impressos (*Bluetooth*).

A figura 36 mostra a placa de circuito impresso da proa com comunicação sem fio via *Bluetooth*.

FIGURA 36: Placa da proa com comunicação sem fio (*Bluetooth*).

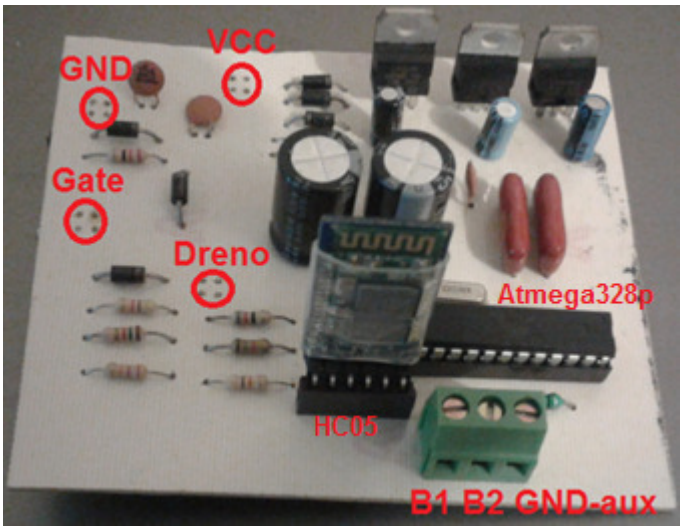


Fonte: Autor.

Os conectores da foto foram marcados com seus respectivos nomes, onde VCC (36V) e GND são conectados ao banco de baterias principal; Pot é conectado ao potenciômetro de 2 kΩ; B1 e B2 são conectados aos seus botões para acionamento das bombas de porão; DMS é conectado à chave de segurança *Dead Man`s Switch* e por último, ON/OFF é conectado ao botão de ativação do motor de propulsão.

A figura 37 mostra a placa de circuito impresso responsável por controlar o chaveamento do MOSFET de potência e os relés para acionamento das bombas de porão.

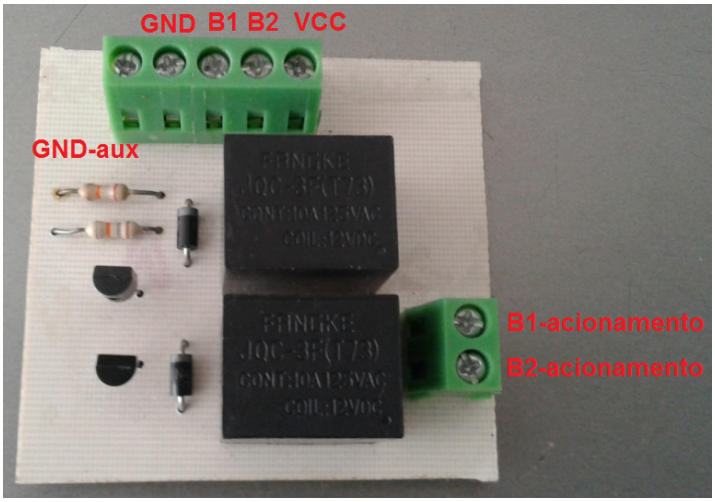
FIGURA 37: Placa da popa com comunicação *Bluetooth*.



Fonte: Autor.

Neste sistema de comunicação sem fio os controles de velocidade do motor de propulsão e o acionamento das bombas de porão são realizados por apenas um microcontrolador. Na figura 35 são apresentados seus conectores de 4 vias que se ligam com a placa do MOSFET de potência, onde VCC e GND são ligados ao banco de baterias principal; *Gate* e *Dreno* são ligados ao MOSFET de potência; B1, B2 e GND-aux são ligados à placa de relés para acionamento das bombas de porão. Esta placa de relés é conectada a bateria auxiliar de 12V. A figura 38 mostra esta placa.

FIGURA 38: Placa de relés para acionamento das bombas de porão via *Bluetooth*.



Fonte: Autor.

Os conectores VCC e GND são conectados a bateria auxiliar de 12V; GND-aux é conectado ao GND da placa de controle apresentada na Figura 35; B1 e B2 são ligados também a placa de controle e, por último, B1-acionamento e B2-acionamento são conectados às bombas de porão.

5 Desenvolvimento do *Software*

O software é o conjunto de instruções e operações lógicas que são gravados diretamente no microcontrolador, que para este projeto é o Atmega328p. Este capítulo trata das técnicas e métodos adotados para o desenvolvimento do *software* do sistema de comunicação com fios e sem fios do barco movido à energia solar da Equipe Zênite Solar.

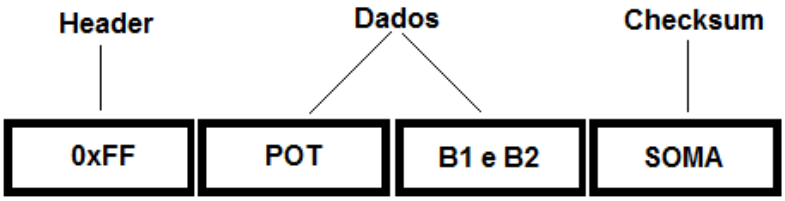
Este projeto utiliza dois programas que, resumidamente, convertem os valores de tensão de um potenciômetro através do conversor AD; monitora o estado dos botões (para acionamento das bombas de porão e do motor de propulsão) através de entradas digitais; envia os dados via protocolo CAN com taxa de transmissão (*Baudrate*) de 50k bps (Bits por segundo) ou via *Bluetooth* com *Baudrate* de 9600 bps. Estes dados irão gerar um sinal PWM para controle de velocidade de um motor DC e, ou, irão gerar sinais para acionamento das bombas de porão. A programação foi feita utilizando como ferramenta a IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do Arduino.

5.1 Protocolo de comunicação unidirecional

Um protocolo de comunicação unidirecional foi criado para ambas às formas de comunicação, com fio ou sem fio. São enviados 4 *Bytes* para compor este protocolo unidirecional, sendo o primeiro Byte um dado de identificação chamado *Header*, o seguinte é

referente aos dados para acionamento do motor de propulsão, o terceiro são os dados para acionamento das bombas de porão e, por último, o quarto *Byte* é um *checksum*. A figura 39 mostra os detalhes deste protocolo.

FIGURA 39: protocolo de comunicação unidirecional



Fonte: Autor.

O primeiro *Byte (Header)* é utilizado para informar o inicio do frame de dados; o segundo *Byte* (POT) comporta valores de 0 a 255 a partir da leitura de um potenciômetro de 2 kΩ para controle de velocidade do motor DC; o terceiro *Byte* armazena valores de 0 a 3 (a partir da leitura de dois botões) para os acionamentos das bombas de porão; o último *Byte* é referente a soma dos dados (POT, B1 e B2), que depois de serem somados são divididos por 2. O *Header* e o *checksum* são importantes para garantir a recepção correta da mensagem. A partir disto é possível implementar a lógica de programação, que ditará o funcionamento dos sistemas.

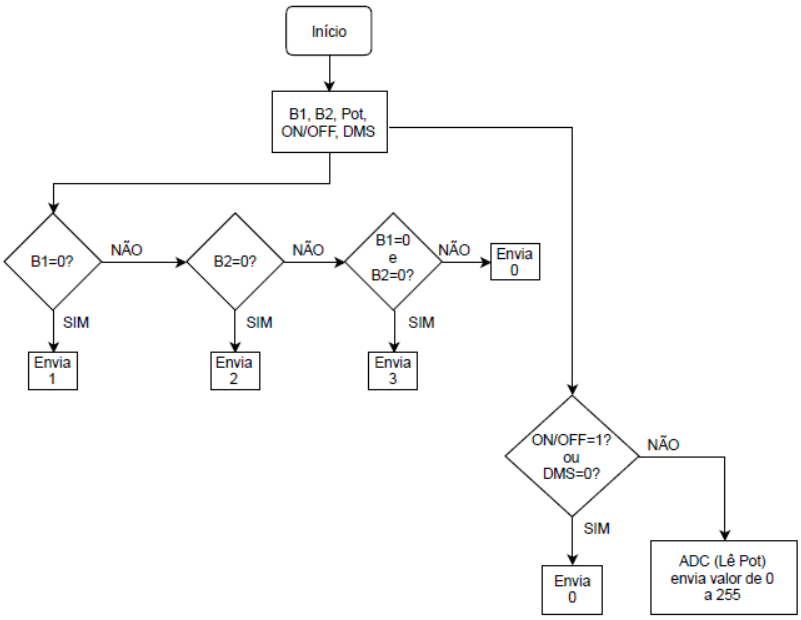
5.2 Fluxogramas de funcionamento

Com base na lista de requisitos e especificações para o painel de controle do motor de propulsão e acionamento das bombas de porão para uma embarcação movida à energia solar, com comunicação com fio e sem fio apresentados no capítulo anterior, são elaborados os fluxogramas de funcionamento para a placa da proa e para as placas da popa.

5.2.1 Fluxograma de funcionamento da placa da proa

A placa da proa é responsável pela leitura, a partir das entradas digitais, dos botões de acionamento das bombas e do motor de propulsão e também da chave de segurança (Dead Man`s Switch), além de converter para digital a variação de tensão de um potenciômetro através do conversor AD, que controla a velocidade do motor DC de propulsão. A figura 40 mostra o fluxograma de funcionamento do software desta placa.

FIGURA 40: fluxograma de funcionamento do software da placa da proa do barco.



Fonte: Autor.

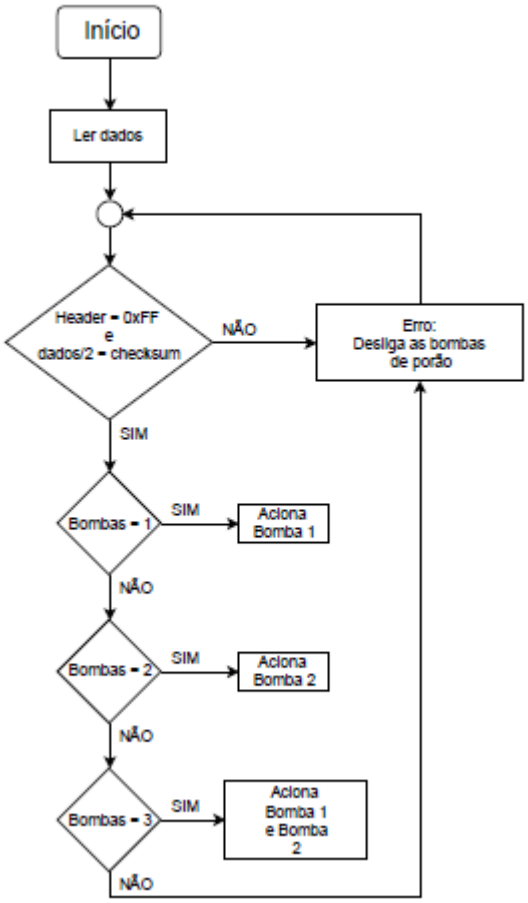
Os resistores de *pull-up* das entradas digitais referentes aos botões de ON/OFF, Bb1, Bb2 e ao DMS (*Dead man`s Switch*) são habilitados, assim, quando estas entradas são acionadas jogam seus referentes pinos de entrada no microcontrolador a nível lógico baixo (GND), somente o dispositivo de segurança *Dead Man`s Switch* funciona com a lógica invertida, ou seja, se esta chave é conectada, seu referente pino no Atmega328p é jogado para nível lógico alto (5V). Isto se deve ao fato desta chave apresentar alta impedância quando conectada e baixa impedância (curto-circuito) quando desconectada, impondo 0 V (GND). É importante notar na figura 40, que o motor de propulsão é acionado somente se chave de segurança estiver conectada e o botão ON/OFF estiver ligado.

O envio das informações, dos acionamentos do motor de propulsão e das bombas de porão, é feito via dois fios, no caso da utilização do protocolo CAN e sem fios, no caso da utilização do modo *Bluetooth*.

5.2.2 Fluxograma de funcionamento da placa das bombas de porão

A placa de acionamento das bombas é responsável por ativar os relés que ligam as bombas de porão. Apenas para o sistema de comunicação com fios há um software exclusivo para tal função, já que esta possui um microcontrolador integrado apenas para fazer a leitura do barramento CAN e acionar as bombas de acordo com as ordens do piloto do barco. A figura 41 mostra o fluxograma de funcionamento do software desta placa.

FIGURA 41: fluxograma de funcionamento da placa de acionamento das bombas de porão



Fonte: Autor.

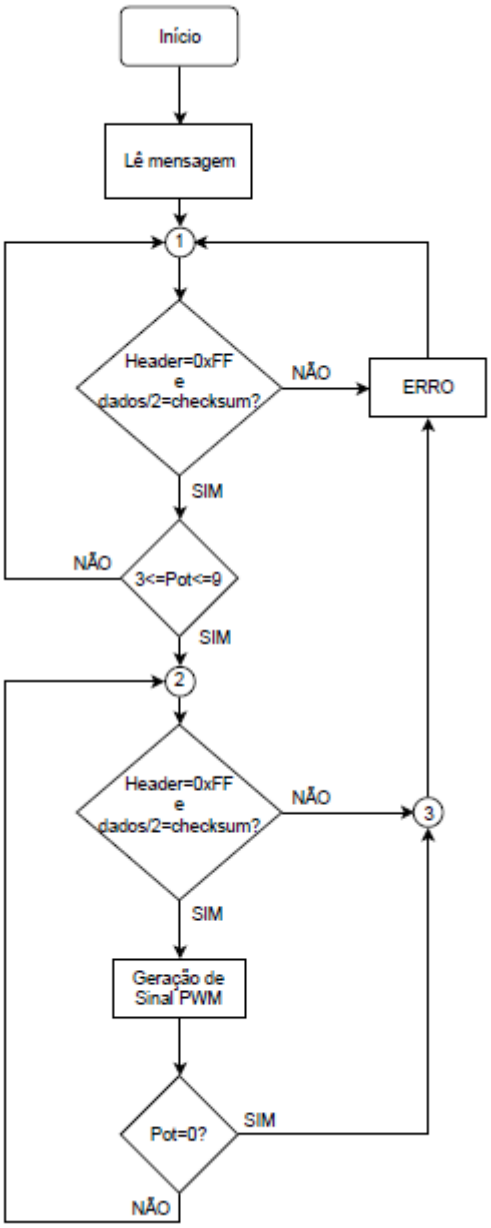
Os dados recebidos pela placa de acionamento das bombas de porão e pela placa de acionamento do motor de propulsão são exatamente os mesmos, isto é possível devido ao envio de mensagens em regime *multcast*, ou seja, recepção de mensagem por vários dispositivos simultaneamente. O programa para esta placa é responsável por identificar quais os dados são importantes para o acionamento das bombas, excluindo qualquer interpretação dos dados referentes ao acionamento do motor de propulsão. A interpretação dos dados para o acionamento dos relés se dá da seguinte forma: se o dado for igual ao número 1, é acionada a bomba 1; se o dado for igual a 2, é acionada a bomba 2; se o dado for igual a 3, são acionadas as duas bombas e ser for 0, as bombas não são acionadas.

5.2.3 Fluxograma de funcionamento da placa de controle do motor de propulsão

A placa de controle do motor de propulsão é responsável por gerar o sinal PWM que controla a tensão sobre o motor e assim controla a velocidade do barco. O software desta placa foi desenvolvido baseado em uma máquina de estados para que a seqüência de

comandos seja obedecida satisfatoriamente. A figura 42 mostra o fluxograma de funcionamento desta placa.

FIGURA 42: fluxograma de funcionamento da placa de acionamento do motor de propulsão



Fonte: Autor.

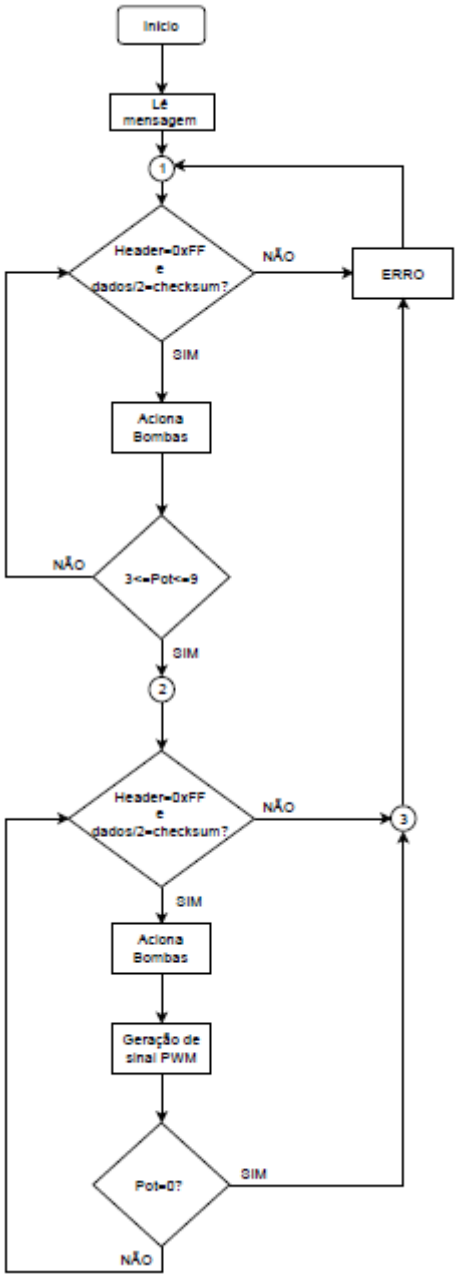
O funcionamento do programa representado no fluxograma da figura 42 é baseado em uma máquina de estados com três estados de operação. No primeiro estado há uma verificação do *Header* e do *Checksum*, após isto, é analisado o dado (Pot), que é responsável por gerar o sinal PWM, neste estado não há geração deste sinal, somente no próximo estado (estado 2). Para chegar ao estado 2 é necessário que o dado (Pot) respeite a condição de ser maior que 3 e menor que 9. No estado 2 o sinal PWM pode ser gerado, neste também há verificação do *Header* e do *Checksum* além de verificar se o dado (Pot) é igual a zero, pois caso

seja, o sistema reinicia o fluxo de funcionamento do programa, ou seja, entra no estado de ERRO e volta para o estado 1. É importante ressaltar que com o sistema de verificação do dado (Pot), o acionamento do motor de propulsão está protegido de solavancos, que podem danificar o sistema eletrônico de acionamento e o próprio motor. Por exemplo, uma situação em que o motor de propulsão esteja ligado e a chave de proteção (*Dead Man`s Switch*) seja desconectada o motor é parado. Se a chave é conectada novamente sem o potenciômetro ser zerado, o motor não ligará, pois o estado do software será o estado 1, onde não há geração do sinal PWM. Para o retorno do acionamento do motor será necessário que o piloto zere o potenciômetro para satisfazer a condição (3<=Pot<=9).

5.2.4 Fluxograma de funcionamento da placa de controle do motor de propulsão com comunicação *Bluetooth*

A placa da popa para o acionamento do motor de propulsão, com comunicação via *Bluetooth*, é responsável, também, por acionar as bombas de porão, por isso o fluxograma desta se difere do apresentado na figura 42, pois dentro dos estados de funcionamento deste software é acrescida a função de acionamento das bombas. A figura 43 mostra o fluxograma para esta placa.

FIGURA 43: fluxograma de funcionamento da placa de acionamento do motor de propulsão com comunicação *Bluetooth*

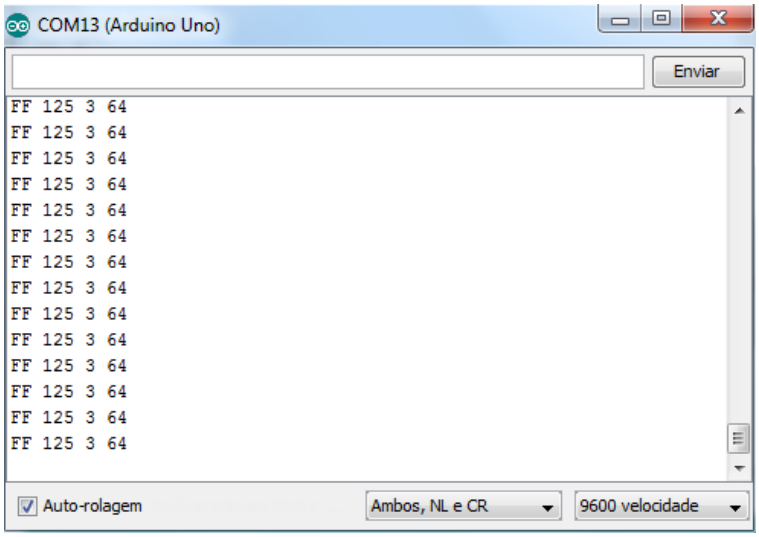


Fonte: Autor.

5.2.5 Teste de envio do frame de dados

Antes de confeccionar as placas de circuito impresso, os softwares foram testados a partir da análise dos dados enviados e recebidos, tanto via protocolo CAN quanto via Bluetooth. O terminal serial da placa Arduíno Uno é usada para a realização destes testes. A figura 44 mostra a janela do Monitor serial com *Baudrate* configurado para 9600 bps e conexão à porta COM13 da controladora USB do computador.

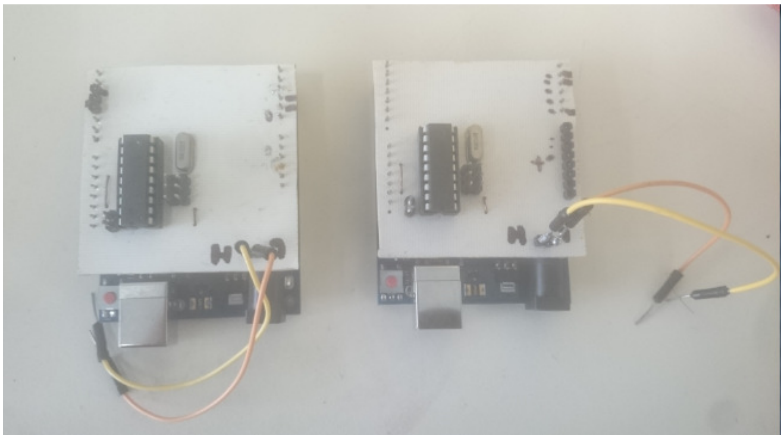
FIGURA 44: Monitor serial.



Fonte: Autor.

Para os testes dos softwares de comunicação via protocolo CAN foram feitas duas placas (*shield*) para serem conectas a placa do Arduino Uno. A figura 45 mostra estas placas eletrônicas conectadas a dois Arduinos Uno.

Figura 45: Shields para testes do protocolo CAN



Fonte: Autor.

5.2.6 Modo PWM com fase corrigida

O modo de geração do sinal PWM com fase corrigida é baseado na contagem crescente e decrescente de um contador, neste caso, o Counter2 (TCNT2-contador de 8 bits). Esta característica de dupla rampa permite maior controle do ciclo ativo do sinal PWM, por isso é adequado para controle de motores. A freqüência de operação deste sinal pode ser calculada usando a equação 7 (Atmel, 2015).

$$\mathrm{f_{pwm}} = \frac{\mathrm{f_{clk}I/O}}{\mathrm{N.510}} \qquad (7)$$

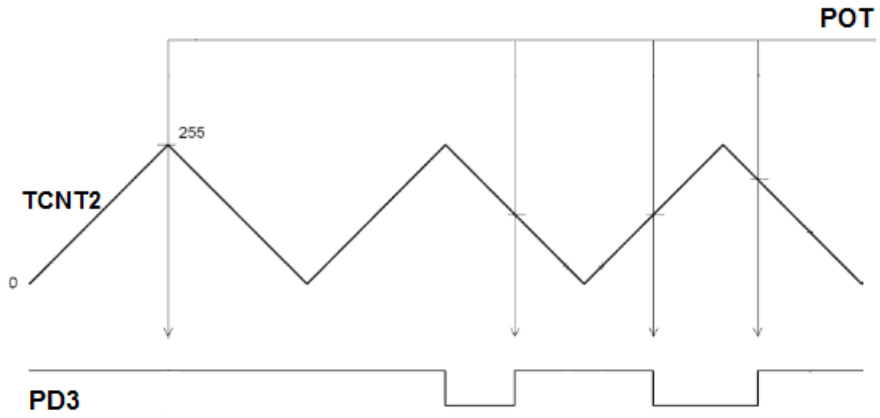
Onde $\mathrm{f_{pwm}}$ é a freqüência do sinal PWM (Hz), $f_{clf}I/O$ é a frequência do clock de operação do microcontrolador (Hz) e N é o fator de prescaler. Para este projeto a frequência de oscilação do cristal externo ligado ao Atmega328p é de $16\mathrm{M\ Hz}$ e o fator prescaler é 32. Substituindo estes valores na Equação 7 temos que:

$$\mathrm{f_{pwm}} = \frac{16\ \mathrm{MHz}}{32\ .\ 510} = 980{,}39\ \mathrm{Hz}$$

Portanto esta é a frequência utilizada no chaveamento do MOSFET de potência para controle de velocidade do motor de propulsão.

O controle do duty cycle (ciclo ativo) é feito através da comparação do valor do ADC (leitura do potenciômetro) com o contador TCNT2. A figura 46 mostra esta comparação para geração PWM com fase corrigida.

FIGURA 46: modo PWM com fase corrigida



Fonte: Autor.

O pino 5 (PD3) do Atmega328p é a saída do sinal PWM, seu ciclo ativo é controlado pela variável POT, que pode variar de 0 (zero) a 255. O nível lógico deste sinal é de 5V.

6 Resultados Finais

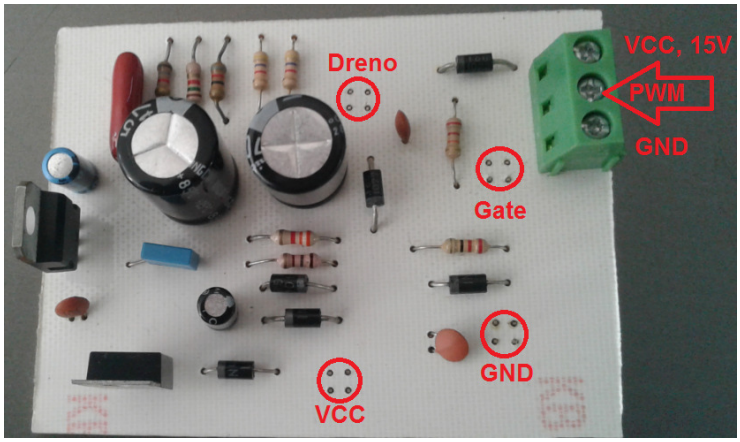
Uma das maiores preocupações no desenvolvimento de um sistema de comunicação para uma embarcação movida à energia solar é a questão da compatibilidade eletromagnética, pois o acionamento do motor de propulsão é feito com o chaveamento de um MOSFET de potência, cujo nível de tensão da comutação é alto em relação ao nível de tensão do circuito lógico de controle.

Na realização dos testes em bancada, sem o acionamento do motor de propulsão, não surgiram problemas com o funcionamento do microcontrolador, porém quando a placa desenvolvida para controle do chaveamento do MOSFET foi conectada à placa do MOSFET de potência junto com o motor de propulsão, o sistema apresentou mau funcionamento (microcontrolador deixava de funcionar). Isto se deve ao fato do chaveamento do MOSFET de potência ser considerada uma fonte de ruído, como afirma Schlichting (2003, p.37):

> Devido à sua característica de operação, na qual se tem controle de entrada em condução e bloqueio, os transistores podem apresentar emissões elevadas tanto no bloqueio quanto na entrada em condução. Os transistores possuem um espectro harmônico que geralmente é maior do que os gerados nos diodos, porque a energia associada ao bloqueio e entrada em condução nos mesmos é maior. Isto ocorre porque quase sempre se tem uma alta dv/dt durante as comutações. As altas dv/dt associadas à comutação de elevadas tensões e correntes dão ao transistor uma característica de fonte de ruído de tensão.

Para solucionar este problema de mau funcionamento foi refeito os *layouts* das placas de controle de chaveamento do MOSFET de potência. A parte do *driver* ir2127 foi separada do restante do circuito. A figura 47 mostra a placa de circuito impresso com o *driver* isolado do microcontrolador.

FIGURA 47: Placa de circuito impresso com driver ir2127 isolado.

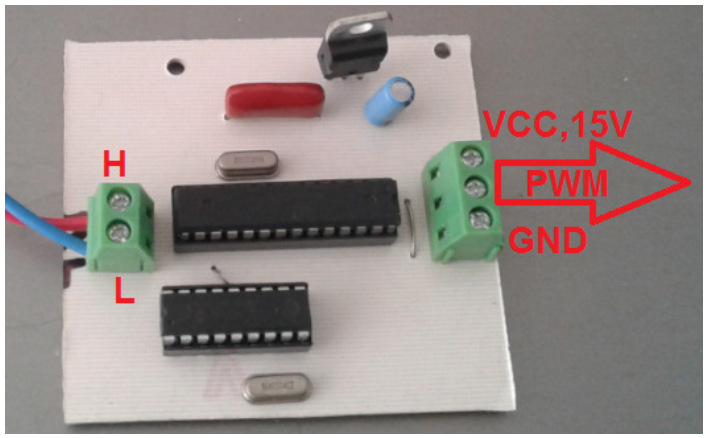


Fonte: Autor.

Esta placa continua sendo encaixada na placa apresentada na figura 36. A conexão entre o Atmega328p e o ir2127 se faz através dos conectores de três vias. Por estes se conectam o sinal PWM gerado no microcontrolador, GND e VCC (15V).

A figura 48 mostra a placa de circuito impresso com a parte lógica (Atmega328p e controlador CAN) de controle do chaveamento do MOSFET de potência isolada do driver ir2127.

FIGURA 48: Placa de circuito impresso com parte lógica de controle de chaveamento do mosfet com comunicação via protocolo CAN.

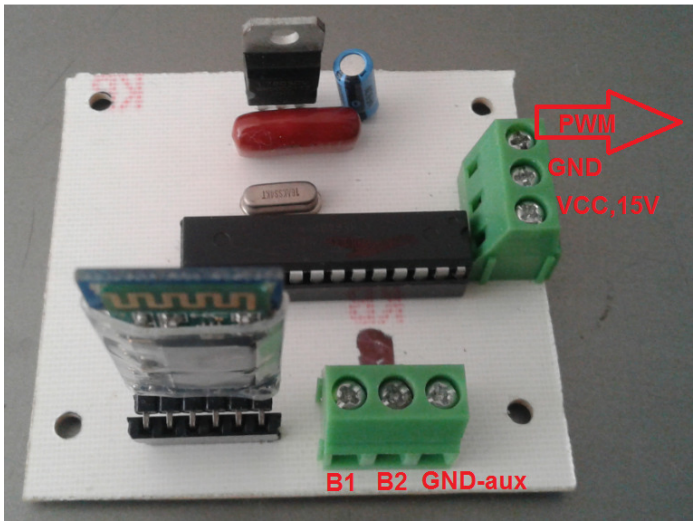


Fonte: Autor.

O Conector de duas vias (lado esquerdo da Figura 46) é conectado ao barramento CAN, onde H é o fio CAN_*HIGH* e L é o fio CAN_*LOW*. A tensão de entrada nesta placa é de 15 V, proveniente do regular LM7815 da placa apresentada na figura 47.

A figura 49 mostra a placa de circuito impresso com a parte lógica de operação de chaveamento do MOSFET com comunicação via Bluetooth.

FIGURA 49: Placa de circuito impresso com parte lógica de controle de chaveamento do MOSFET com comunicação via protocolo CAN.

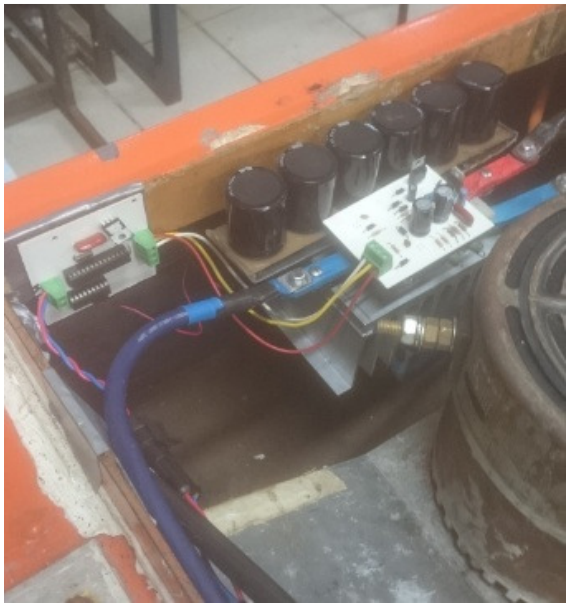


Fonte: Autor.

A placa de circuito impresso apresentado na figura 49 se conecta de forma similar à placa apresentada na figura 48, porém esta possui duas saídas para acionamento dos relés de ativação das bombas de porão, na imagem estas saídas são representadas por B1 e B2. O conector apresentado como GND-aux é referente à conexão entre o GND da bateria auxiliar de 12V com o GND do banco de baterias principal, que fornece 36V.

Com esta nova disposição dos circuitos de controle de chaveamento do MOSFET, o problema de mau funcionamento do microcontrolador foi resolvido. O sistema de comunicação com fios funcionou, tanto para o acionamento das bombas de porão quanto para o acionamento do motor de propulsão, porém o sistema de comunicação sem fios precisou ter seu *software* alterado para ter êxito nos testes. A figura 50 mostra a disposição dos circuitos de controle de chaveamento do MOSFET com comunicação via protocolo CAN.

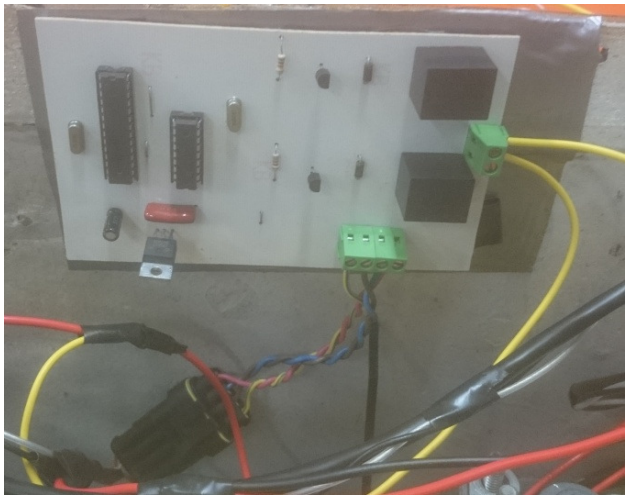
FIGURA 50: Disposição das placas de controle de chaveamento do MOSFET de potência (Protocolo CAN).



Fonte: Autor.

A figura 51 mostra a placa de acionamento das bombas de porão com comunicação via protocolo CAN.

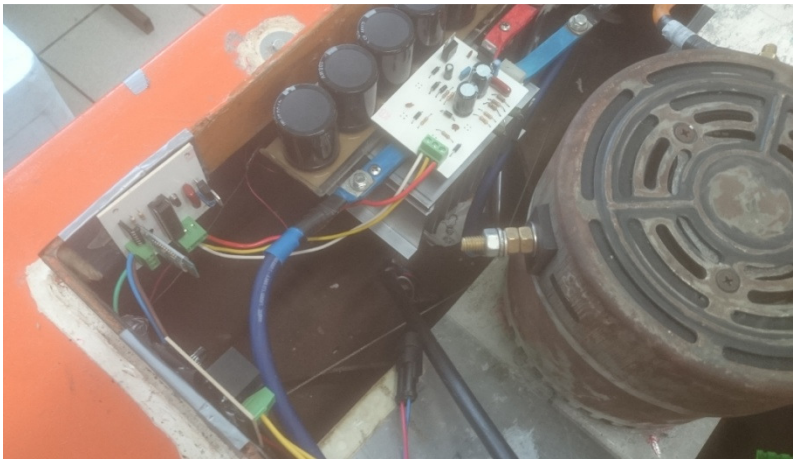
FIGURA 51: placa de acionamento das bombas de porão via protocolo CAN.



Fonte: Autor.

A figura 52 mostra como são dispostas as placas de controle de chaveamento do MOSFET de potência com comunicação via *Bluetooth*.

FIGURA 52: Disposição das placas de controle de chaveamento do MOSFET de potência (Bluetooth).



Fonte: Autor.

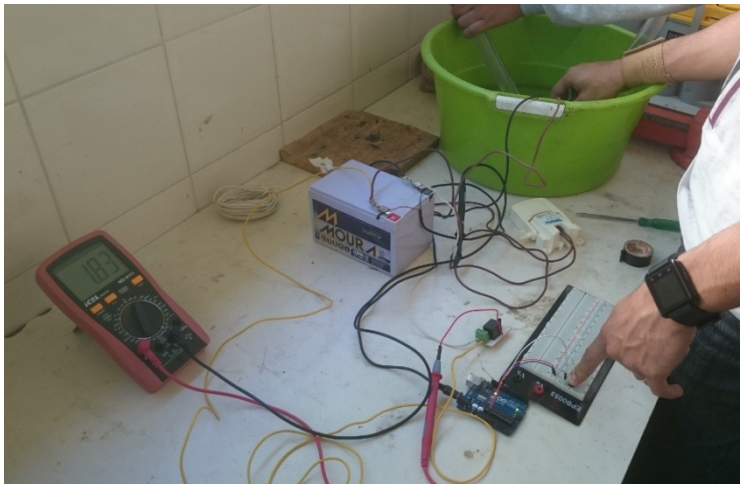
A figura 53 mostra o sistema de controle com comunicação *Bluetooth* de outro ângulo para visualização da placa de relés para acionamento das bombas de porão.

FIGURA 53: Disposição das placas de controle de chaveamento do MOSFET de potência (*Bluetooth*).

Fonte: Autor.

A figura 54 mostra testes em bancada do sistema de acionamento dos relés para validação do circuito. Para o teste, os circuitos são conectados a bateria estacionária da marca Moura de 12V. A Bomba de porão utilizada é da marca Rule 1000 Gph (mil galões por hora), a mesma usada dentro do barco.

FIGURA 54: Teste de acionamento das bombas de porão.



Fonte: Autor.

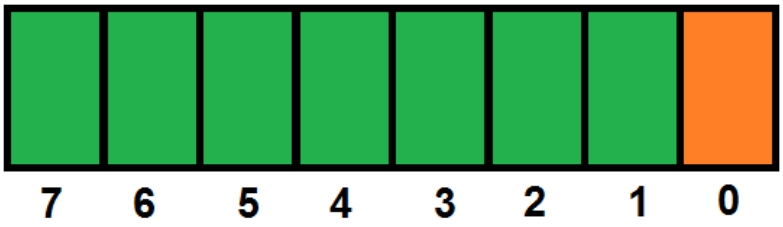
Na imagem é possível observar que a corrente elétrica necessária para o funcionamento desta bomba com circulação de água é de 1.83 A.

6.1 Mudanças do Software para o sistema de comunicação via Bluetooth.

O software desenvolvido para o projeto de comunicação via *Bluetooth* precisou ser alterado, pois devido às interferências eletromagnéticas houve perdas de pacotes de mensagens durante os testes, impossibilitando o correto funcionamento do sistema. Para resolver este problema foi reduzida a quantidade de *Bytes* de envio e recepção. De 4 *Bytes*,

passou-se a enviar apenas 1 *Byte*, contendo o suficiente para o acionamento do motor de propulsão e das bombas de porão. O protocolo unidirecional desenvolvido foi retirado, tornado o funcionamento do software mais simples. A figura 55 mostra a representação dos 8 bits de dados, enviados via *Bluetooth*, para acionamento das bombas de porão e do motor de propulsão.

FIGURA 55: *Byte* de dados para acionamento do motor de propulsão e das bombas de porão.



Fonte: Autor.

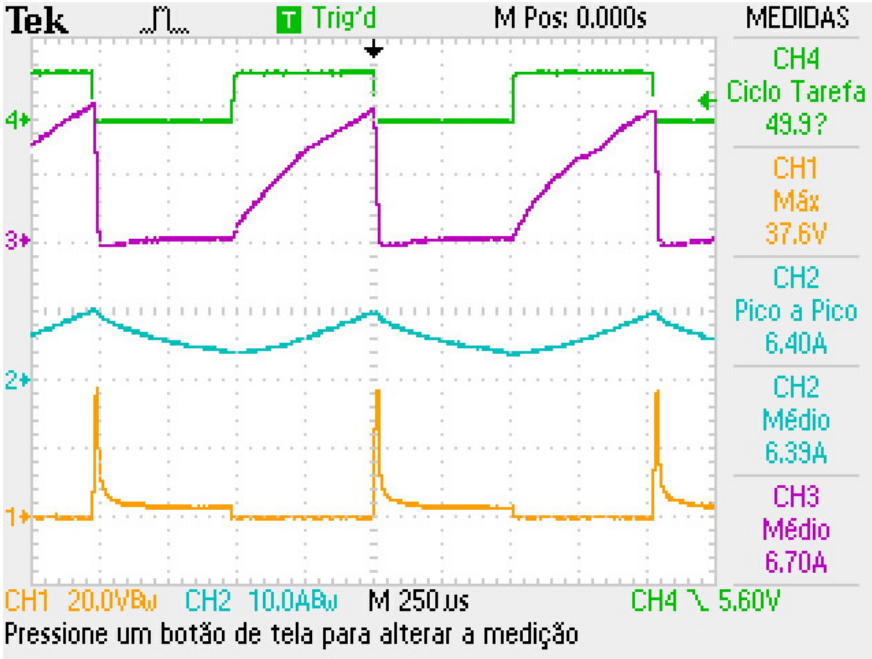
Dos oito bits disponíveis, os 7 (sete) mais significativos, representados pela cor verde, são reservados para controle do ciclo ativo do sinal PWM, permitindo 127 valores para este controle. O bit menos significativo, representado pela cor laranja, é responsável por ativar as bombas de porão. Desta forma os acionamentos das bombas acontecem simultaneamente, não mais de forma independente como no sistema de comunicação com fios (protocolo CAN). A opção de usar dois bits para acionar as bombas foi descartada em função da limitação do controle de acionamento do motor de propulsão, que de 127 valores, para controle de *Duty Cycle*, passaria a ter somente 63 valores, o que limitaria o controle de velocidade do barco.

6.2 Motor de propulsão e formas de onda

Nas imagens, que mostram a disposição das placas de controle de chaveamento do mosfet de potência no barco, é possível visualizar o motor DC, com escovas, utilizado para a propulsão do barco. Este motor é o Motenergy ME0909 com potência de 4 KW contínuos. Suporta potência de 15 KW por 30 segundos. A tensão de entrada pode variar de 12 V a 48 V DC, a corrente elétrica pode chegar a 100 A, podendo suportar até 300 A por no máximo 30 segundos. A rotação pode chegar a 3200 rpm com tensão de entrada no valor de 48 V DC (Motenergy, 2011).

Com a utilização do osciloscópio Tektronix TDS2024C de quatros canais é possível visualizar as formas das ondas de tensão e corrente do acionamento do motor de propulsão a vazio, como mostra a figura 56.

FIGURA 56: Formas de onda de tensão e corrente de acionamento do motor de potência.

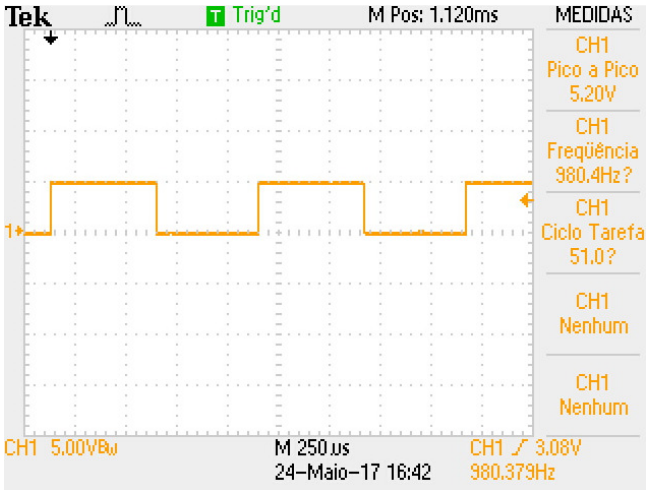


Fonte: Autor.

Na imagem capturada da tela do osciloscópio é possível visualizar a forma da onda de tensão Vds no canal 1 (um), no canal 2 (dois) é apresentada a forma de corrente medida no terminal do motor de propulsão (representada por $I_{saída}$ na figura 29), no canal 3 (três) a forma de onda é referente à corrente de saída do banco de baterias principal (representada por $I_{baterias}$ na figura 29) e, por último, o canal 4 (quatro) mostra a forma de onda da tensão Vgs. O sistema de comunicação com fios (protocolo CAN) foi utilizado para controle do motor de propulsão no momento da captura desta imagem.

A figura 57 mostra o sinal PWM, com nível lógico de 5 V e frequência de 980,4 Hz, na saída PD3 do microcontrolador.

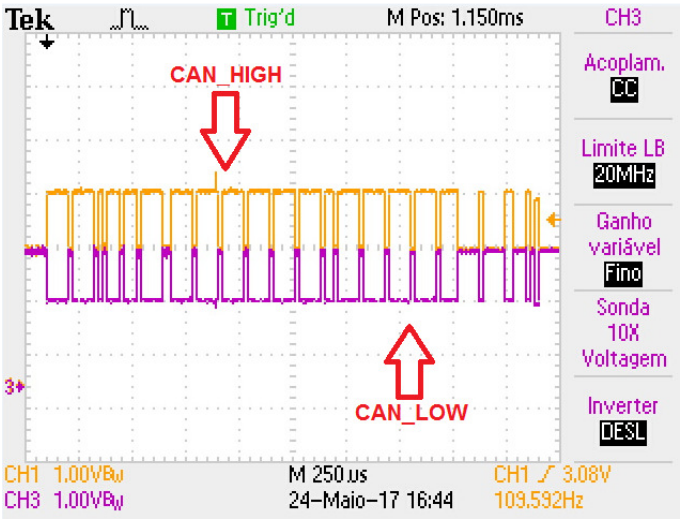
FIGURA 57: Sinal PWM na saída PD3 do Atmega328p.



Fonte: Autor.

O sinal PWM mostrado na figura 57 foi gerado a partir da interpretação dos dados lidos no barramento CAN. A figura 58 mostra os sinais CAN_*HIGH* e CAN_*LOW* proveniente deste barramento.

Figura 58: Sinal do barramento CAN.



Fonte: Autor.

O sinal CAN_*HIGH* é exatamente o oposto do sinal CAN_*LOW*, esta característica de transmissão de dados utilizando tensão diferencial confere ao protocolo CAN boa imunidade a ruídos eletromagnéticos.

6.3 Gabinete de proteção e teste do sistema de comunicação via *Bluetooth*.

A figura 59 mostra a proposta de gabinete para proteção da placa da proa, que é responsável por fazer as leituras de comando do piloto do barco. Este invólucro é utilizado para comportar a placa da proa do sistema com comunicação via protocolo CAN e, também, para comportar a placa da proa do sistema com comunicação via Bluetooth.

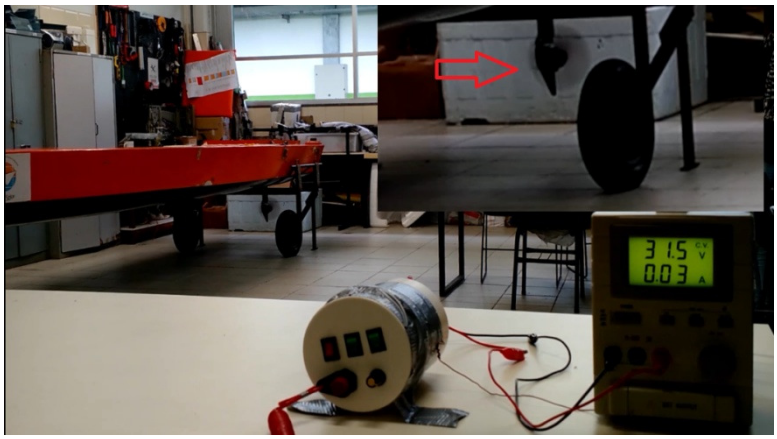
FIGURA 59: Invólucro de proteção dos circuitos da proa.

Fonte: Autor.

Este gabinete é feito com cano de 100 mm de diâmetro. Uma tampa, também de 100 mm, é utilizada para encaixe dos botões, do potenciômetro e da chave de segurança (*Dead Man`s Switch*). Esta opção de invólucro serve de modelo para futuros desenvolvimentos de gabinetes para uso no barco, pois além de ser compacto é altamente resistente à água.

A figura 60 mostra este gabinete sendo usado para testes de acionamento do motor de propulsão a das bombas de porão com sistema de comunicação via Bluetooth. Na imagem foi feita uma aproximação da parte que mostra o hélice, que é apontado por uma seta vermelha.

FIGURA 60: Teste de acionamento do motor de propulsão via *Bluetooth*.



Fonte: Autor.

Uma fonte linear com tensão ajustada em 31.5 V foi usada para conectar a placa da proa de envio de dados. Para enfatizar a eficácia do sistema de comunicação *Bluetooth* para esta aplicação, esta placa foi afastada 8 metros de distância da placa da popa. Todos os testes, tanto de acionamento das bombas de porão quanto de acionamento do motor de propulsão, transcorreram sem falhas.

6.4 Peso dos sistemas e custos

Na análise dos sistemas, além do quesito compatibilidade eletromagnética e eficiência do software para transmissão de dados, o quesito peso deve ser observado. As Tabelas 4, 5 e 6 mostram as diferenças de peso entre os sistemas de controle propostos por este trabalho com o sistema de comunicação atual utilizado pela Equipe Zênite Solar. A tabela 4 mostra o peso do sistema atual.

TABELA 4: Peso do sistema de controle do motor de propulsão e das bombas de porão atual

Sistema de transmissão de sinais elétricos de controle atual	Placas e fios	Peso (Kg)
	Placa da Proa (Piloto)	0,27
	Placa de acionamento das bombas de porão	0,19

	Placa de controle do chaveamento do mosfet de potência	0,1
	Cabo PP 3x4 mm de 5 vias	2
	Cabo PP 3x4 mm de 4 vias	0,9
	TOTAL	**3,46**

Fonte: Equipe Zênite (2017).

Os cabos utilizados para ligar a proa do barco com a popa possuem 4.8 metros de comprimento. A tabela 5 mostra o peso do sistema de controle com comunicação via protocolo CAN.

TABELA 5: Peso do sistema de controle do motor de propulsão e das bombas de porão com Protocolo CAN.

	Placas e fios	**Peso (Kg)**
Sistema de transmissão de sinais elétricos de controle com Protocolo CAN	Placa da Proa (Piloto)	0,1
	Placa de acionamento das bombas de porão	0,1
	Placa de controle do chaveamento do mosfet de potência	0,095
	Cabo PP 3x4 mm de 4 vias	0,9
	TOTAL	**1,195**

Fonte: Autor.

A tabela 6 mostra o peso do sistema de controle com comunicação via *Bluetooth*.

TABELA 6: Peso do sistema de controle do motor de propulsão e das bombas de porão com Bluetooth.

	Placas e fios	**Peso (Kg)**
Sistema de transmissão de sinais elétricos de controle com Bluetooth	Placa da Proa (Piloto)	0,095
	Placa de acionamento das bombas de porão	0,09
	Placa de controle do chaveamento do mosfet de potência	0,1
	Cabo PP 3x4 mm de 2 vias	0,4
	TOTAL	**0,685**

Fonte: Autor.

Quanto aos valores, foi feito um levantamento, nos sites Mouser e Filipeflop (especializados em vendas de componentes eletrônicos), dos valores dos circuitos integrados e do módulo *Bluetooth* para comparação dos custos de ambos os sistemas de comunicação de dados propostos por este trabalho de conclusão de curso. A TABELA 7 mostra os valores dos principais componentes usados para o sistema de comunicação com fios (protocolo CAN).

TABELA 7: valor dos CIs usados para projeto de comunicação via protocolo CAN.

Sistema de transmissão de sinais elétricos de controle via Protocolo CAN	Quantidade	Componente	Preço U$ (unidade)
	3x	Atmega328p	1,95
	3x	MCP2515	1,98
	3x	MCP2551	1,12
	4.8 metros	Cabo PP 4x3 mm	8,66
	TOTAL		**23,81**

Fonte: www.mouser.com.br/ www.mercadolivre.com.br

A tabela 8 mostra os valores dos principais componentes usados para o sistema de comunicação sem fios (*Bluetooth*).

TABELA 8: valor dos CIs usados para projeto de comunicação via *Bluetooth*.

Sistema de transmissão de sinais elétricos de controle via Bluetooth	Quantidade	Componente	Preço U$ (unidade)
	2x	Atmega328p	1,95
	2x	Módulo HC05	10,48
	4.8 metros	Cabo PP 2x3 mm	2,75
	TOTAL		**27,61**

Fonte: www.mouser.com.br/ www.mercadolivre.com.br/ www.filipeflop.com.br.

7 Conclusões finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de *hardware* e *software* para dois sistemas de controle de acionamento do motor de propulsão e das bombas de porão de um barco movido a energia solar. Ambos os sistemas foram desenvolvidos com base nas necessidades da Equipe Zênite Solar, que utilizará este estudo para implementações futuras em seu barco.

Os dois sistemas apresentaram vantagens em relação à diminuição do peso e volume de cabos usados. Houve uma redução de 65,5% do peso, na comparação do sistema atual com o sistema de controle por fios proposto este trabalho, e houve uma redução de 80,20% na comparação com o sistema que utiliza a tecnologia *Bluetooth*.

Ambos os sistemas de comunicação, propostos por este trabalho, funcionaram. Os acionamentos das bombas, do motor de propulsão, bem como o sistema de segurança composto pela chave de segurança e pela máquina de estados para evitar acionamentos abruptos do motor de propulsão, tiveram suas funções bem desempenhadas nos dois sistemas.

Na comparação entre estes dois sistemas de comunicação pode-se afirmar que o controle realizado via protocolo CAN obteve maior êxito em relação ao sistema com comunicação Bluetooth. Para funcionar de forma satisfatória, o sistema sem fios precisou ter uma diminuição dos dados transmitidos, ocasionando limitações no controle do motor de propulsão e das bombas de porão. Ao enviar os 4 *Bytes* sugeridos inicialmente, ocorria inversões e perdas de pacotes, o que gerava perdas de comunicação. Tal problema não aconteceu com o sistema de comunicação via protocolo CAN, que é um sistema consagrado na indústria automobilística por suas características de implementação simples, pois usa apenas dois fios para transmissão de dados, e robusta diante às interferências eletromagnéticas.

Hoje no barco além dos acionamentos do motor de propulsão e das bombas de porão, há o monitoramento de corrente e tensão sobre as baterias, e há a necessidade de monitoramento de temperatura e rotação do motor. Com a utilização do protocolo CAN todos estes monitoramentos e acionamentos poderão compartilhar o mesmo barramento diminuindo a quantidade de fios sujeitos às intempéries inerentes ao funcionamento de um barco, que vão desde a salinidade e trepidação às interferências eletromagnéticas.

Com os testes realizados foi possível observar que embora o protocolo CAN seja o mais indicado para utilização no barco, o sistema de comunicação via *Bluetooth* pode ser utilizado para aplicações que não o submetam à ambientes ruidosos, contribuindo assim, para redução da quantidade fios utilizados dentro do barco.

REFERÊNCIAS

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 5. Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

DUARTE, Vânia M. **Pesquisas: Exploratórias, Descritivas e Explicativas**. In:Monografias Brasil Escola. Disponível em: <http://monografias.brasilescola.uol.com.br/regras-abnt/pesquisas-exploratoria-descritiva-explicativa.htm>. Acesso em: 09 mar. 2017.

ZAPELINI, W.B. **Conversores Digital-Analógicos e Analógico-Digital**. 2006. 68 f. Apostila, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. **Protocolo de Comunicações CAN**. Disponível em: <https://web.fe.up.pt/~ee99058/projecto/pdf/Can.pdf >. Acesso em: 14 mar. 2017.

LIMA, C. B. D. **TÉCNICAS DE PROJETOS ELETRÔNICOS COM OS MICROCONTROLADORES AVR**. ed. Florianópolis: dos Autores, 2010.

LIMA, C. B. D. VILLAÇA, M. V. M. **AVR E Arduino**: Técnicas de projeto. 2ª Edição. ed. Florianópolis: dos Autores, 2012.

VOSS, W. **Controller Area Network Prototyping With Arduino**. Greenfild: Copperhill Technologies Corporation, 2014.

GUIMARÃES, A. A. **Can Bus:** Barramento Controller Area Network, sem data. Disponível em: <http://www.alexag.com.br/CAN_Bus_Parte_2.html>. Acesso em: 25 jun. 2017.

BOHR. **Controle de Relés**, 2006. Disponível em: <http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_rele.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2017.

SILVA, D. F. **Sistema de comunicação Bluetooth utilizando microcontrolador**. 2009. 74 f. Tese (Graduação em Engenharia da Computação)-Escola Politécnica de Pernambuco, Recife. Disponível em: <http://tcc.ecomp.poli.br/20092/TCC_final_Davidson.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2017.

SCHLICHTING, L. C. **Contribuição ao estudo da compatibilidade eletromagnética aplicada aos conversores estáticos.** 2003. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85109/194127.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2017.

ATMEL. **ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P**, 2015. Disponível em: <http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2017.

MOTENERGY. **ME0909 Brush-Type DC Motor**, 2011. Disponível em: <http://www.motenergy.com/me0909.html>. Acesso em: 20 jun. 2017.