

Anderson Manoel de Azevedo Pereira

Desenvolvimento de um Módulo de Comunicação via Rede Elétrica - PLC

Campina Grande, Brasil

10 de junho de 2021

Anderson Manoel de Azevedo Pereira

Desenvolvimento de um Módulo de Comunicação via Rede Elétrica - PLC

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Orientador: Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior, Ph.D.

Campina Grande, Brasil

10 de junho de 2021

Anderson Manoel de Azevedo Pereira

Desenvolvimento de um Módulo de Comunicação via Rede Elétrica - PLC

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: / /

**Gutemberg Gonçalves dos Santos
Júnior, Ph.D.**
Orientador

Danilo Freire de Souza Santos, D.Sc.
Convidado

Campina Grande, Brasil
10 de junho de 2021

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Maria do Socorro Azevedo Pereira e Manoel Belarmino Pereira

Resumo

A ideia de comunicação por meio da rede elétrica tem um longo histórico de desenvolvimento. Porém, mesmo possuindo características interessantes, esta tecnologia conhecida como *Power Line Communication* (PLC), é pouco explorada no cenário nacional, principalmente no âmbito residencial, ao qual passa por constantes avanços relacionado à Internet das Coisas, do inglês Internet of Things (IoT). Desta forma, é proposto neste trabalho um módulo de *hardware* completamente funcional, voltado para o desenvolvimento de aplicações para *IoT*, com capacidade de comunicação pela rede elétrica e possibilidade de interface com vários padrões de comunicação disponíveis, tais como *I²C*, *SPI*, *UART* e, até mesmo, *USB*. Para tanto, este módulo conta com um modem *ST7538Q*, atuando em *Narrowband* e com taxa de transmissão de 4800bps, além de um microcontrolador responsável por controlar a utilização do modem *PLC* e de gerenciar a comunicação entre módulos.

Palavras-chaves: Power-line Communication, PLC, modem, IoT.

Abstract

The idea of communication through the power grid has a long history of development. However, despite having interesting features, this technology known as Power-line Communication (PLC), is not well explored on the national scene, especially in home applications, which is undergoing constant advances related to the Internet of Things (IoT). Thus, it is proposed in this work a fully functional hardware module, aimed at the development of applications for IoT, with the ability to communicate over the power grid and to interface with several available communication standards, such as I²C, SPI, UART and USB. For this purpose, this module has a ST7538Q modem, operating in Narrowband and with a transmission rate of 4800bps, in addition to a microcontroller responsible for controlling the use of the PLC modem and managing communication between modules.

Key-words: Power-line Communication; PLC; modem; IoT.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por me guiar em todos os momentos dela.

Aos meus pais, Maria do Socorro Azevedo Pereira e Manoel Belarmino Pereira, e a minha irmã, Débora Caroline de Azevedo Pereira. Agradeço ainda a todos os familiares e amigos que me incentivaram e apoiaram durante toda a trajetória vivenciada no curso de graduação em Engenharia Elétrica.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial a Adolfo Fernandes Herbster, Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior e Marcos Ricardo Alcântara Morais, pela convivência, ensinamentos e oportunidades concedidas. Agradeço ainda aos funcionários do Departamento de Engenharia, em especial a Adail Ferreira da Silva Paz e Tchaikovsky Oliveira, pelo suporte e atenção desde o primeiro contato com o curso de graduação.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de modulação FSK para dados binários	5
Figura 2 – Modulador FSK para dados binários	6
Figura 3 – Demodulador BFSK coerente	7
Figura 4 – Bloco de transmissão para ST7538Q	8
Figura 5 – Exemplo de <i>Front-End Interface</i> para ST7538Q	9
Figura 6 – Bloco de recepção para ST7538Q	9
Figura 7 – Diagrama de blocos do hardware desenvolvido	11
Figura 8 – Circuito de alimentação CA-CC 9V utilizado	12
Figura 9 – Circuito de alimentação CC-CC 3.3V utilizado	13
Figura 10 – Circuito utilizado na transmissão do sinal do PLC para rede elétrica	13
Figura 11 – Filtro passa-faixas passivo ideal	14
Figura 12 – Diagrama de Bode para Equação 3.2	14
Figura 13 – Filtro passa-faixas ativo utilizado na recepção do sinal	15
Figura 14 – Filtro passa-faixas ativo ideal representado pela Equação 3.3	16
Figura 15 – Diagrama de Bode para Equação 3.3	16
Figura 16 – Feedback de tensão e controle de corrente	17
Figura 17 – Curva de controle de saída <i>vs</i> Rcl (R1)	18
Figura 18 – Circuito simulado de transmissão em 72kHz	19
Figura 19 – FFT para simulação do circuito da Figura 18	19
Figura 20 – Circuito simulado de recepção em 72kHz	20
Figura 21 – FFT para simulação do circuito da Figura 20	20
Figura 22 – Renderização da PCB desenvolvida	21
Figura 23 – Módulo de hardware completo	21
Figura 24 – Conexões necessárias para utilização da interface USB	22
Figura 25 – Reconhecimento do dispositivo USB em sistemas Linux	23
Figura 26 – Lógica para envio de pacotes via PLC	24
Figura 27 – Lógica para recepção de pacotes via PLC	24
Figura 28 – Aplicação com monitoramento energético	25
Figura 29 – Dados recebidos pela interface serial	25

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Organização do trabalho	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.0.1	Canal de Comunicação	3
2.1	Funcionalidades básicas de um Modem PLC	4
2.1.1	Modulação FSK	5
2.1.2	Demodulação FSK	6
2.1.3	Transmissão de dados com modem <i>ST7538Q</i>	8
2.1.4	Recepção de dados com modem <i>ST7538Q</i>	9
3	PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	11
3.1	Alimentações	11
3.2	<i>Front-End Interface</i>	13
3.3	Recepção de sinais	14
3.4	Controle de intensidade de tensão e corrente de saída	16
3.5	Simulações de Hardware	18
3.6	Placa de circuito impresso desenvolvida	19
4	APLICAÇÃO E RESULTADOS	22
4.1	Interface USB	22
4.2	Utilização do FreeRTOS	23
4.3	Monitoramento Energético Pela Rede Elétrica	25
5	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS	27
	ANEXO A – ESQUEMÁTICO ELETRÔNICO	28
	ANEXO B – DIMENSÕES FÍSICAS	32

1 Introdução

Power line Communication é uma tecnologia de comunicação com fio que utiliza a própria instalação da rede elétrica como canal de comunicação. Dentre diversas aplicações, tal tecnologia se apresenta consolidada em padrões de comunicação dedicados ao monitoramento energético, como G3-PLC, PRIME e SunSpec (MUDRIIEVSKYI, 2014).

Dessa forma, serviços ou dispositivos que contam com tal tecnologia se tornaram competitivos com outras tecnologias, tais como *wireless*, principalmente pelo fato de se utilizar da vasta infraestrutura de rede elétrica já existente. Tal característica proporciona benefícios como irrelevância a obstáculos, quando comparados a alguns sistemas de rádio-frequência, possibilidade de transmissão em longas distâncias, entre outros (MELIT et al., 2012).

Apesar de possuir características interessantes, esta tecnologia é pouco explorada no cenário nacional, principalmente em ambientes residenciais, os quais sofrem avanços constantes relacionados a automação residencial e na utilização de dispositivos *IoT*. Dessa forma, torna-se interessante aplicações com PLC, possibilitando a comunicação entre vários dispositivos utilizando-se apenas da rede elétrica, complementando a rede de comunicação local e desconsiderando problemas relacionados a sinais *wireless* e suas disposições no ambiente residencial.

1.1 Objetivos

Este trabalho busca trazer um módulo em hardware capaz de transmitir e receber informações via rede elétrica, dispondo de algumas interfaces de comunicação básicas, canais com possibilidade de leituras analógicas, assim como entradas e saídas digitais, a fim de colaborar com o desenvolvimento de aplicações com *IoT* e as várias outras aplicações possíveis no âmbito residencial.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho é dividido em quatro partes, iniciando-se pela fundamentação teórica, no [Capítulo 2](#), onde são discutidos aspectos sobre a tecnologia PLC, a rede elétrica como canal de comunicação, a modulação FSK e o modem PLC utilizado. Em seguida, no [Capítulo 3](#), é discutido o protótipo desenvolvido em termos de hardware, os blocos funcionais e interface entre o modem PLC e a rede elétrica. Adiante, no [Capítulo 4](#), é discutido uma possível aplicação do hardware desenvolvido, realizando uma interface UART-USB

por meio da rede elétrica. Por fim, no [Capítulo 5](#), são discutidos os resultados obtidos e a indicação de trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

A ideia de comunicação por meio da rede elétrica tem um longo histórico de desenvolvimento. Tradicionalmente, tal tecnologia vem sendo utilizada em aplicações voltadas à *smart grid*¹, como também a distribuição de redes de internet e serviços de cunho residencial. É possível dividir a tecnologia PLC em dois grandes grupos, a depender da frequência de trabalho, definidos como *narrowband* e *broadband*. Para sistemas definidos como *narrowband*, a faixa de frequência ao qual o PLC opera se apresenta entre $9kHz$ e $500kHz$, enquanto que sistemas definidos como *broadband* operam em uma faixa de frequência entre $2MHz$ e $80MHz$. A [Tabela 1](#) apresenta características gerais de cada um dos grupos citados.

Tabela 1 – Características para comunicações *Narrowband* e *Broadband*

Características	<i>Narrowband</i>	<i>Broadband</i>
Frequências de Trabalho	9kHz a 500kHz	2MHz a 80MHz
Taxas de Transmissão	<200kbps	>1Mbps
Modulações	<i>FSK, S-FSK, BPSK, SS, OFDM</i>	<i>OFDM</i>
Aplicações	Automação, Energias Renováveis, Equipamentos de medição, Iluminação urbana, <i>Smart Grid</i>	Internet, HDTV, Áudio

Apesar de um longo histórico de desenvolvimento, a padronização tardia da utilização da tecnologia em ambos os grupos *narrowband* e *broadband* causou um grande número de padrões de comunicação diferentes, especialmente para as tecnologias que utilizam o primeiro grupo. Atualmente, aplicações *narrowband* contam com duas padronizações públicas definidas como *Power Line Intelligent Meter Evolution*² (PRIME) e *PLC-G3*³, suportadas pelos padrões *ITU G.Hnem* e *IEEE P1901.2* ([MUDRIIEVSKYI, 2014](#)).

2.0.1 Canal de Comunicação

Como já exposto, o canal de comunicação utilizado pela tecnologia *PLC* é a própria infraestrutura de distribuição de energia elétrica já existente. Porém, este meio contém

¹ Smart grids, ou “redes inteligentes”, são os sistemas de distribuição e de transmissão de energia elétrica que foram dotados de recursos de Tecnologia da Informação.

² <<https://www.prime-alliance.org>>

³ <<https://www.g3-plc.com>>

algumas limitações que impactam diretamente no desempenho da comunicação entre os vários possíveis dispositivos. Dentre elas, pode-se citar o ruído presente na linha de distribuição, a atenuação elevada, assim como variação das características elétricas do meio.

Dessa forma, torna-se interessante identificar características do meio de comunicação capazes de influenciar na transmissão de informações. Uma primeira característica é a descontinuidade da impedância característica do canal, causando várias reflexões do sinal transmitido, além de diferentes atrasos no tempo de transmissão do sinal. Tais reflexões colaboram para a dispersão no tempo do sinal transmitido, impactando em aplicações que possam vir a utilizar TDMA (*Time Division Multiple Access*) pela existência de várias cópias em diferentes instantes de tempo do sinal transmitido (YIGIT et al., 2014).

Para se modelar o comportamento da transmissão e suas respectivas reflexões, é utilizado o "modelo de eco", ou *echo model*, descrito pela Equação 2.1. Este modelo representa a superposição dos diferentes sinais partindo de N locais que, neste caso, são os sinais refletidos pelas diferentes impedâncias presentes na rede elétrica, além do sinal original. Dessa forma, ρ_i é um fator complexo único característico para cada atraso de tempo τ_i .

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i \times e^{-j2\pi\tau_i} \quad (2.1)$$

O modelo descrito pela Equação 2.1 permite uma reprodução realística do comportamento da transmissão de dados pela rede elétrica. Porém, a fim de se obter um comportamento ainda mais aproximado, foram realizadas modificações no modelo de eco citado, como proposto por (Gotz et al., 2004), adicionando mais um fator de atenuação dependente da frequência, disposto pela Equação 2.2. Dessa forma, os parâmetros a_0 , a_1 e k são eventualmente modelados a depender da frequência de trabalho.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0+a_1f^k) \cdot d_i} \cdot e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (2.2)$$

As demais variáveis d_i , g_i e v_p representam, respectivamente, a distância entre o receptor e os locais de emissão e reflexões dos sinais, um fator de ponderação para cada emissão e reflexão e a velocidade característica de propagação.

2.1 Funcionalidades básicas de um Modem PLC

O modem PLC é o objeto principal para funcionalidade de tal tecnologia, atuando na transmissão e na recepção de dados. Durante a transmissão, o modem PLC modula o sinal em função dos dados a serem enviados, obedecendo um padrão de modulação predefinido, tais como os demonstrados pela Tabela 1. Durante a recepção de dados, o

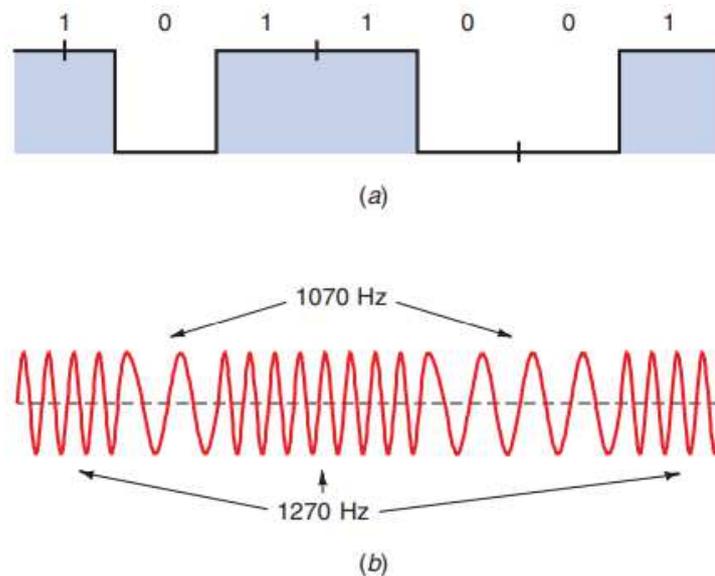
modem *PLC* atua demodulando o sinal recebido pela rede elétrica, dispondo estes dados em alguma interface de comunicação, tais como *SPI*, *I²C* ou *UART*. Neste trabalho, serão abordadas as funcionalidades referentes ao modem *PLC ST7538Q* utilizado.

2.1.1 Modulação FSK

Uma modulação consiste, brevemente, na variação de determinada característica de um sinal elétrico, denominado portadora, em função de um determinado estímulo. Os quatro principais tipos de modulação são *Frequency-Shift Keying* (FSK), *Phase-Shift Keying* (PSK), *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), e *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM). A modulação FSK é simples e objetiva, voltada para aplicações com baixas taxas de dados (< 500kbps) e indicado para aplicações susceptíveis a ruído (JR., 2016).

Em sistemas binários, a modulação FSK atua utilizando duas frequências distintas, cada uma representando os símbolos binários '0' e '1'. Tal utilização pode ser chamada ainda de modulação BFSK, ou *Binary Frequency-Shift Keying*. A Figura 1 demonstra como a portadora é modulada, em (b), em função do sinal modulante, em (a).

Figura 1 – Exemplo de modulação FSK para dados binários

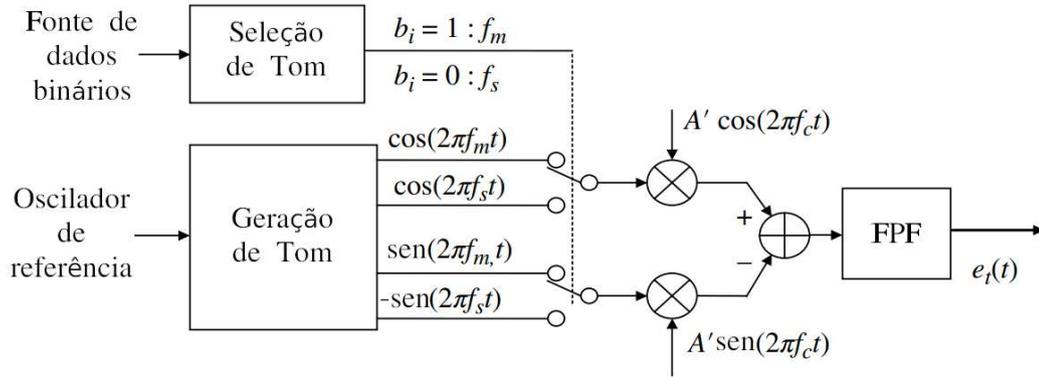


Fonte: (JR., 2016)

Tomando como exemplo um modulador FSK que satisfaça as condições de modulação apresentadas no diagrama da Figura 1, é apresentado no diagrama da Figura 2 a estrutura constitutiva básica de um modulador FSK convencional, com sinal modulante binário (MIDDLESTEAD, 2017).

O sinal resultante obtido $e_t(t)$, após as etapas de mixagem e filtragem por um Filtro Passa-Faixa (FPF), consiste em uma senoide com frequência variável em $\Delta\omega_i$, como

Figura 2 – Modulador FSK para dados binários



Fonte: Adaptado de (MIDDLESTEAD, 2017)

demonstrado pela Equação 2.3. A variação de frequência é definida pela Equação 2.4.

$$e_t(t) = A \cos((\omega_c + \Delta\omega_i) t) \quad (2.3)$$

$$\Delta\omega_i = \begin{cases} +\omega_s, & \text{se } b_i = 0 \\ -\omega_m, & \text{se } b_i = 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.1.2 Demodulação FSK

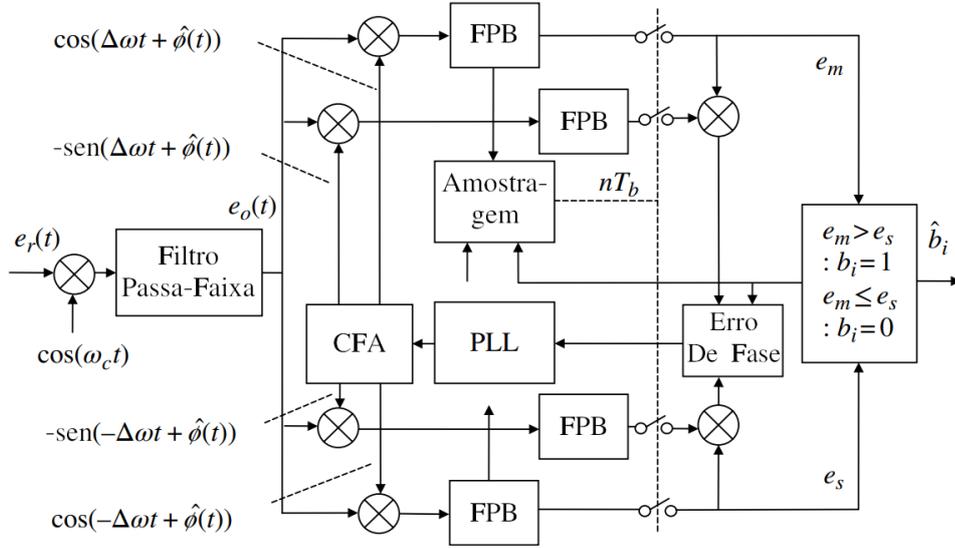
Uma vez a informação transmitida esteja contida num sinal portadora, seguindo o princípio de modulação tratado anteriormente pela subseção 2.1.1, é necessário demodular esta portadora, no destino da transmissão, com a finalidade de recuperar a informação transmitida. Este processo de demodulação é realizado por meio de um bloco demodulador BFSK, com implementação funcional descrito pela Figura 3.

Para utilização do demodulador funcional BFSK representado pela Figura 3, é necessário saber as características de frequência de portadora e os respectivos desvios de frequência para cada símbolo binário, sendo W_c a frequência angular da portadora e $\Delta\omega$ a frequência angular simétrica de desvio da portadora para os símbolos binários. Dessa forma, pode-se descrever o sinal de entrada $e_r(t)$ como na Equação 2.5, no qual, se faz presente um ruído, representado por $n(t)$, e um desvio de fase $\phi(t)$, caracterizado pela assincronia dos sinais de referência entre modulador e demodulador.

$$e_r(t) = A \cos((\omega_c + \Delta\omega) t + \phi(t)) + n(t) \quad (2.5)$$

Após a mixagem do sinal de entrada $e_r(t)$ com o sinal cossenoidal de referência com frequência angular idêntica à da portadora W_c , em condições ideais, e com auxílio de

Figura 3 – Demodulador BFSK coerente



Fonte: Adaptado de (MIDDLESTEAD, 2017)

um filtro passa-faixa configurado com banda de passagem que comporte a variação de frequência $\Delta\omega$, todas as componentes de alta frequência são removidas, resultando no sinal $e_o(t)$, descrito pela Equação 2.6. Neste estágio, estão presentes, no sinal $e_o(t)$, as frequências de desvio $\Delta\omega$, além das componentes do ruído presentes na banda de passagem do filtro elétrico.

$$e_o(t) = \frac{A}{2} \cos(\Delta\omega t + \phi(t)) + n_o(t) \quad (2.6)$$

Com o sinal devidamente tratado, este passará por várias etapas de mixagem e filtragem, com sinal de referência dinamicamente ajustado contra erros de fase pelos blocos *Erro de Fase*, *PLL* e *Conversor de Fase em Amplitude (CFA)*. Dessa forma, o bloco *Amostragem*, com auxílio do *PLL*, realiza a amostragem dos sinais $e_m(t)$ e $e_s(t)$. Ao fim destes processos, são obtidos os sinais $e_m(t)$, descrito pela Equação 2.7, e $e_s(t)$, descrito pela Equação 2.8.

$$\tilde{e}_m(t) = \begin{cases} \frac{A}{4} e^{j\phi_\varepsilon(t)} + N_m(t) & : \text{quando } b_i = 1 \\ N_m(t) & : \text{quando } b_i = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

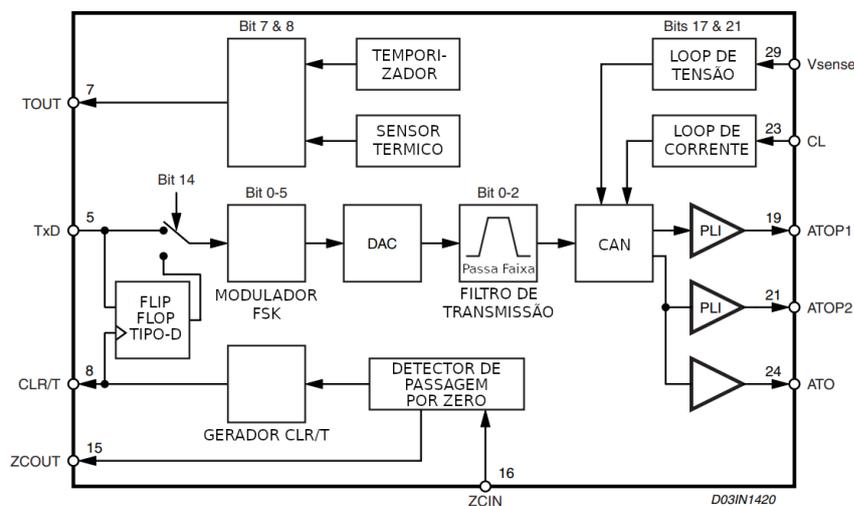
$$\tilde{e}_s(t) = \begin{cases} \frac{A}{4} e^{j\phi_\varepsilon(t)} + N_s(t) & : \text{quando } b_i = 0 \\ N_s(t) & : \text{quando } b_i = 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

Note que $\phi_\varepsilon(t) = \phi(t) - \hat{\phi}(t)$, que, devido ao bloco de correção de fase, pode ser negligenciado. Neste ponto, é necessário uma comparação direta entre os tons $e_m(t)$ e $e_s(t)$ a fim de se obter um valor binário na saída do demodulador.

2.1.3 Transmissão de dados com modem *ST7538Q*

Como visto na [subseção 2.1.1](#), os moduladores presentes em modems *PLC* são os responsáveis por transformar um determinado sinal de portadora, possibilitando a comunicação por meio deste sinal modulado. Neste contexto, faz-se necessário uma interface entre o modem e a rede elétrica para se efetivar a transmissão de informações. Tal interface denomina-se *power-line interface*, ou *PLI*, composta por amplificadores de potência capazes de injetar o sinal modulado na rede elétrica, como visto na [Figura 4](#).

Figura 4 – Bloco de transmissão para *ST7538Q*



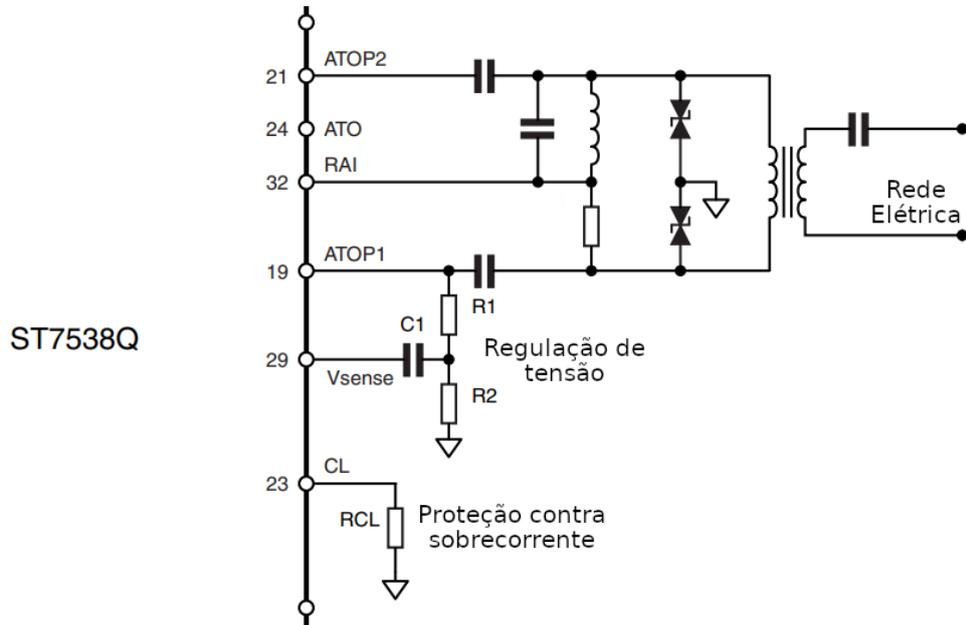
Fonte: Adaptado de ([STMICROELECTRONICS, 2006](#), P. 26)

Desse modo, a *PLI* recebe o sinal gerado pelo modulador FSK, com amplitude ajustável pelo bloco *Controle Automático de Nível (CAN)*. Este é um amplificador de ganho variável destinado ao controle de tensão e limitação de corrente elétrica fornecidos pela *PLI*, auxiliado pelos blocos *LOOP DE TENSÃO* e *LOOP DE CORRENTE*, que determinam, respectivamente, os níveis máximos de tensão e corrente.

Resta, dessa forma, a interface entre a *PLI* e a rede elétrica. Esta, denominada como *Front-End Interface*, ou *FEI*, possui importante papel na segurança para os usuários e confiabilidade na transmissão de dados. É na *FEI* que estão presentes os componentes eletrônicos responsáveis pela *isolação galvânica*⁴ entre a rede elétrica e os demais componentes envolvidos na aplicação com o modem *PLC*, além dos responsáveis por compor os filtros elétricos necessários e proteções contra surtos de tensão. A [Figura 5](#) apresenta uma *Front-End Interface* básica.

⁴ Isolação galvânica é um princípio de isolamento de seções funcionais de sistemas elétricos para evitar o fluxo de corrente, não existindo caminhos de condução metálicos.

Figura 5 – Exemplo de *Front-End Interface* para ST7538Q

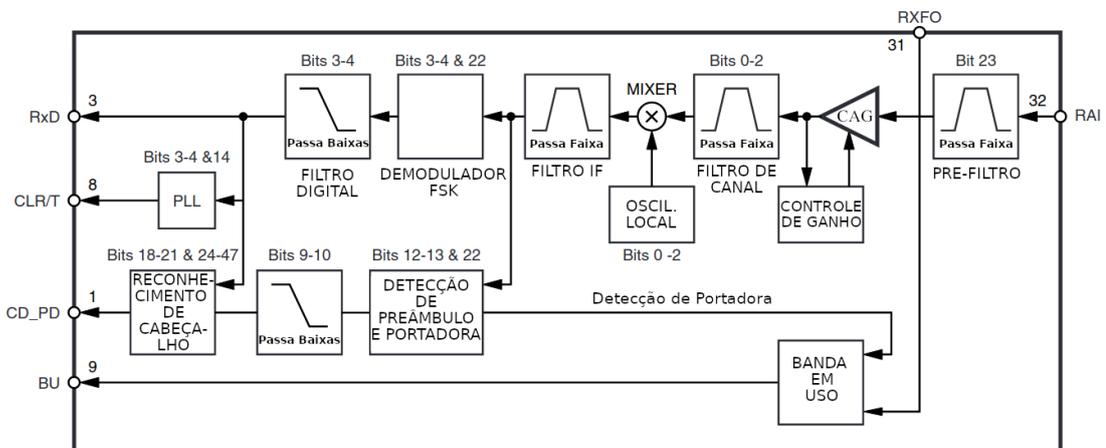


Fonte: Adaptado de (STMICROELECTRONICS, 2006, P. 41)

2.1.4 Recepção de dados com modem ST7538Q

Já para o modo de recepção de dados, o modem PLC *ST7538Q* conta com vários blocos funcionais, como visto no diagrama da *Figura 6*. Como é possível observar para o caso da *Front-End Interface* disposta na *Figura 5*, durante a recepção, o sinal recebido passa por um primeiro filtro elétrico passivo, composto por componentes resistivos, capacitivos e indutivos, onde o sinal resultante chega à linha *Receiver Analog Input*, ou *RAI*, do modem PLC.

Figura 6 – Bloco de recepção para ST7538Q



Fonte: Adaptado de (STMICROELECTRONICS, 2006, P. 25)

Além da possibilidade de utilização de filtros elétricos externos ao modem PLC, o

próprio modem PLC conta também com uma etapa de filtragem interna, com banda de passagem fixa de 62kHz. Em seguida, visando uma alta relação sinal-ruído, este modem conta com um bloco de ganho automático, ou *Controle Automático de Ganho (CAG)*, de ampla faixa dinâmica, adaptando automaticamente a amplitude do sinal recebido para ser utilizado pelas demais etapas. Ainda é disposto um segundo filtro elétrico do tipo passa-faixas, após o bloco *CAG*, com banda de passagem de 14kHz e com centro definido de acordo com o canal de comunicação selecionado.

Após mais algumas etapas de filtragem e mixagem, o sinal recebido chega ao demodulador FSK, responsável por converter o sinal recebido em uma *stream* de bits, dispostos pela linha *RxD* após uma última filtragem digital. O mesmo sinal presente na linha *RxD* também é utilizado para recuperação do sinal de *clock*, por meio da utilização de um PLL, disposto pela linha *CLR/T*. Vale salientar que a funcionalidade do PLL pode ser afetada com uma sequência de 15 ou mais símbolos (bits) iguais e simultâneos, saindo da faixa de travamento, afetando a recepção da informação.

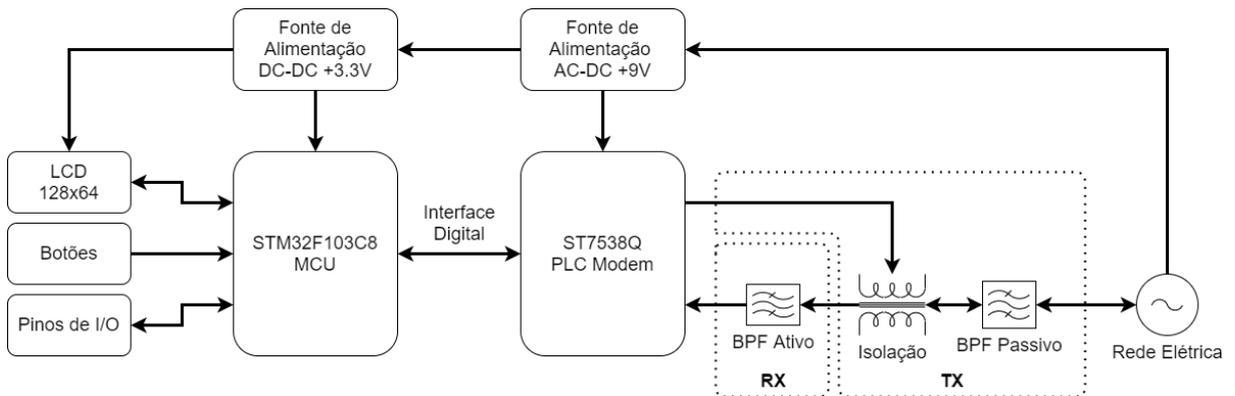
As funcionalidades de detecção de recepção e reconhecimento de cabeçalhos também estão presentes no bloco de recepção de dados. Para a detecção de recepção de sinal, é possível optar pela detecção de preâmbulo ou a detecção de portadora. Para a opção de preâmbulo, o modem PLC notificará o microcontrolador, por meio da linha *CD_PD*, quando ocorrer a detecção consecutiva de quatro símbolos, nos quais podem ser uma das sequências binárias "1010" ou "0101". A linha *CD_PD* manterá notificando o microcontrolador enquanto houver detecção de portadora e o PLL (citado no parágrafo anterior) estiver na faixa de travamento.

Já para a opção de detecção de portadora, o processo é bem mais simples. A linha *CD_PD* notificará o microcontrolador quando existir um sinal na linha *RAI* com uma componente harmônica próxima à frequência da portadora. A sensibilidade do sinal para que a notificação seja realizada é de aproximadamente $0,5mV_{rms}$. Para ambos os casos, com detecção de preâmbulo ou de portadora, a notificação pela linha *CD_PD* se dá forçando o valor desta para nível lógico baixo. Ao fim da notificação, a linha *CD_PD* retorna para o nível lógico alto. (STMICROELECTRONICS, 2006, P. 24)

3 Protótipo Desenvolvido

Nesta seção serão tratadas as informações pertinentes ao desenvolvimento de hardware para o protótipo desenvolvido. Na Figura 7 é apresentado, parcialmente, um diagrama de blocos contendo os subsistemas principais presentes no projeto.

Figura 7 – Diagrama de blocos do hardware desenvolvido



Fonte: Autoria Própria

Para tanto, é utilizado um modem PLC ST7538Q, da STMicroelectronics, responsável pela modulação e demodulação dos dados, além da recepção e transmissão destes. Este componente opera com modulação FSK, mapeando os bits zeros e uns em frequências distintas, a depender da frequência central e da taxa de transmissão, que pode variar entre 600 e 4800 bits por segundo.

Além disso, este modem é totalmente controlável via interface *SPI*, utilizada pelo microcontrolador STM32F103C8 para sua devida configuração, gerenciamento e envio/recepção de dados para o modem PLC. Este microcontrolador também é responsável por gerenciar as várias interfaces de comunicação disponíveis no protótipo de hardware, tais como *I²C*, *UART* e *USB*, além de controlar periféricos como *display* LCD, botões, pinos de I/O e demais funcionalidades básicas presentes no protótipo.

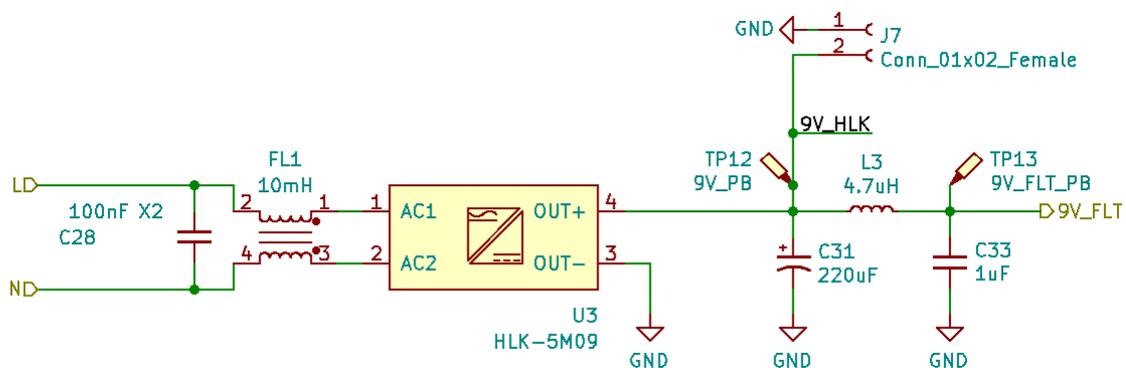
3.1 Alimentações

Neste protótipo estão presentes duas fontes de alimentação com tensões de trabalho distintas. A primeira, com tensão de 9V, é responsável por alimentar os estágios de transmissão e alimentação do modem *PLC*. Já a segunda, com tensão de 3,3V, é responsável por alimentar a parte lógica, como o microcontrolador *STM32F*, além dos demais periféricos atrelados a este.

A fonte de tensão 9V é um conversor tipo CA-CC HLK-10M09, convertendo diretamente a tensão da rede elétrica (100-240VCA) em 9VDC com uma corrente máxima de 1,1A, suficiente para alimentar o modem PLC e o conversor CC-CC 3,3V responsável por alimentar o microcontrolador e periféricos. É exposto na [seção 3.4](#) a corrente máxima esperada de 280mA para o modem PLC durante o modo de transmissão, restando ainda cerca de 800mA para serem utilizados pelo restante do sistema.

Atrelado ao conversor CA-CC, há um filtro LC com finalidade de filtrar ruídos de alta frequência intrínsecos às fontes chaveadas. Neste circuito, ainda há a possibilidade de alimentação externa, utilizando o conector J7, com possibilidade utilização de tensões entre 7,5VCC e 12,5VCC, respeitando o dimensionamento realizado pela [Equação 3.5](#).

Figura 8 – Circuito de alimentação CA-CC 9V utilizado



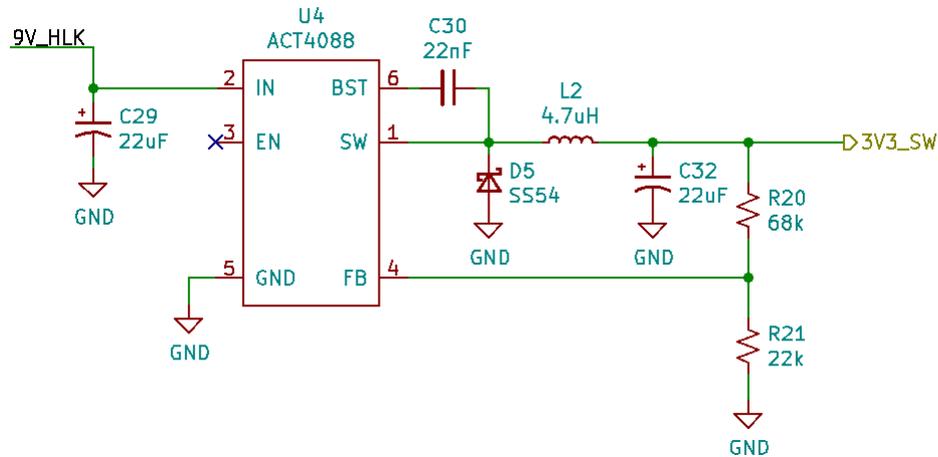
Fonte: Autoria Própria

Já com relação a fonte de alimentação com tensão de 3,3V, foi utilizado um conversor CC-CC abaixador *ACT4088*, como observado na [Figura 9](#). Este conversor é capaz de fornecer uma corrente de até 1,5A, com cerca de 92% de eficiência ([QORVO, 2019, P. 1](#)). Este conversor ainda possui recursos como: proteção contra curto-circuito, proteção contra aquecimento, proteção contra sobre-corrente, entre outros.

Para garantir uma tensão fixa em 3,3V, faz-se necessário calcular os valores dos resistores de *feedback*, como descrito pela [Equação 3.1](#). Dessa forma, para $V_{out} = 3,3V$, os valores escolhidos para $R20$ e $R21$ foram, respectivamente, 68kΩ e 22kΩ. O valor de $R20$ foi escolhido de acordo com as especificações do fabricante, especificando um valor maior que 50kΩ, garantindo uma compensação de tensão estável ([QORVO, 2019, P. 6](#)).

$$R21 = \frac{R20}{\left(\frac{V_{out}}{0.81V} - 1\right)} \quad (3.1)$$

Figura 9 – Circuito de alimentação CC-CC 3.3V utilizado

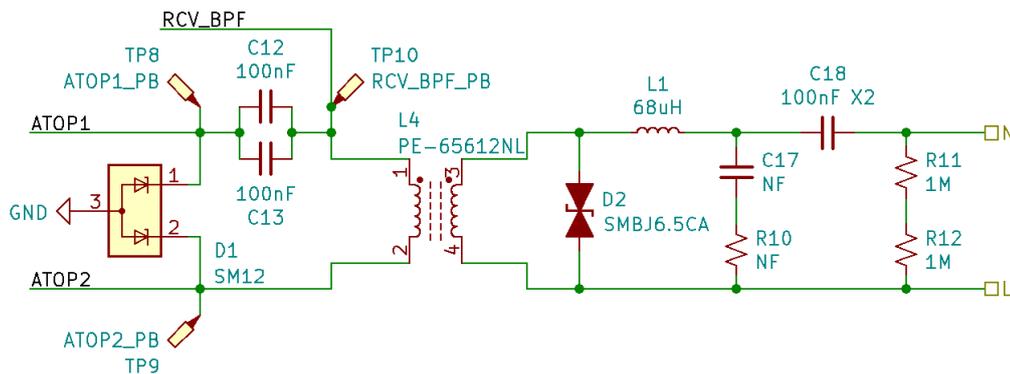


Fonte: Autoria Própria

3.2 Front-End Interface

Para a interface entre o modem PLC e a rede elétrica, foi utilizado o circuito apresentado pela Figura 10. Este circuito é composto por um filtro passa-faixas passivo, responsável simultaneamente por acoplar o sinal transmitido pelo PLC à rede elétrica e oferecer uma isolação galvânica entre esta e o circuito de baixa tensão por meio da utilização de um transformador de sinais isolado.

Figura 10 – Circuito utilizado na transmissão do sinal do PLC para rede elétrica

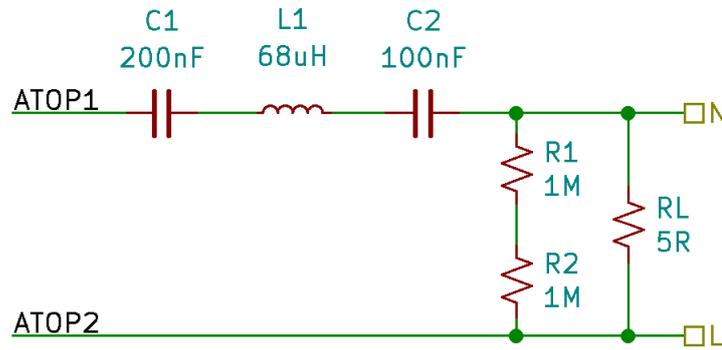


Fonte: Autoria Própria

Afim de facilitar a abordagem com relação ao filtro de saída, este é apresentado de forma simplificada pelo diagrama da Figura 11, considerando o transformador de sinais ideal, além de desconsiderar todos os elementos de proteção.

Com tais simplificações, é exposto a função de transferência para este filtro, descrito pela Equação 3.2. Em posse desta, é possível analisar sua resposta em frequência, para diferentes impedâncias da rede elétrica. Para tanto, foram realizadas simulações com $L1 = 68\mu H$, $C1 = 200nF$, $C2 = 100nF$ e impedâncias da rede elétrica variando entre

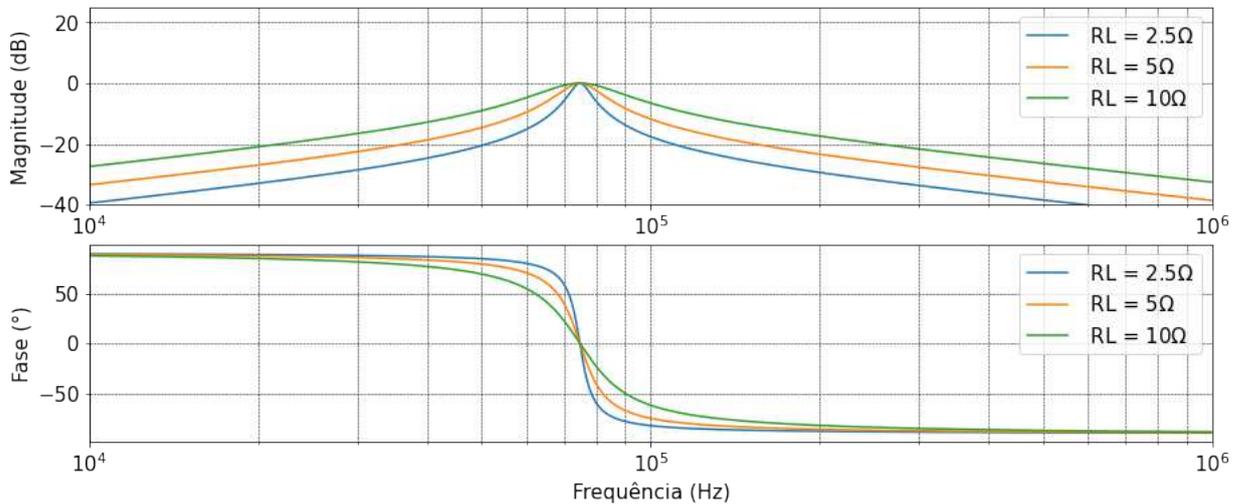
Figura 11 – Filtro passa-faixas passivo ideal



Fonte: Autoria Própria

2,5Ω e 10Ω, como demonstrado pelo Diagrama de Bode exposto pela [Figura 15](#). Tais simulações demonstram uma banda de passagem que varia entre 5,8kHz e 22,5kHz, a depender da impedância da rede elétrica, e frequência central em 74kHz.

$$H(S) = \frac{R_L}{L_1} \times \frac{S}{S^2 + \frac{R_L}{L_1} \times S + \frac{C_1 + C_2}{C_1 \times C_2 \times L_1}} \quad (3.2)$$

Figura 12 – Diagrama de Bode para [Equação 3.2](#)

Fonte: Autoria Própria

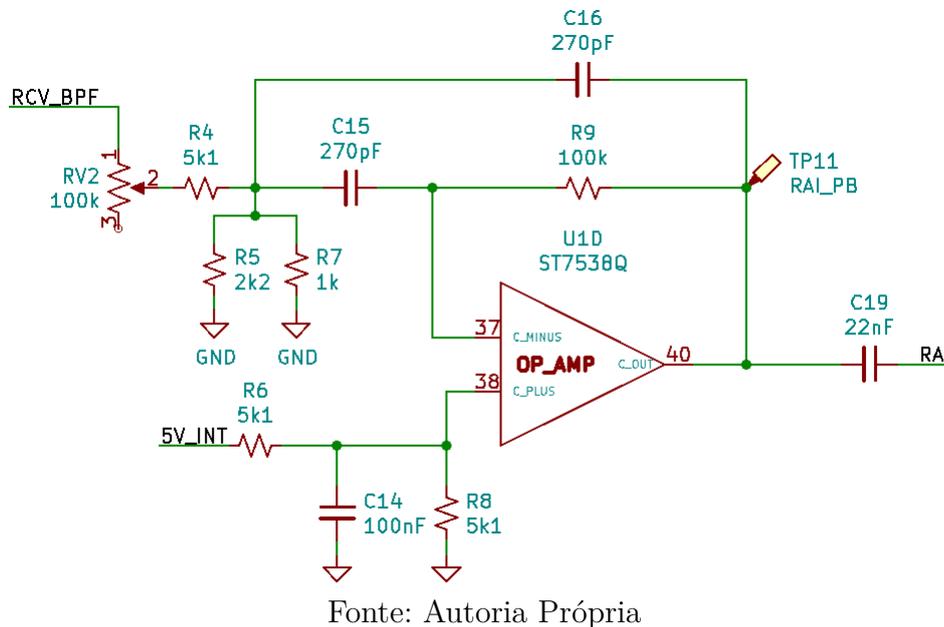
3.3 Recepção de sinais

Durante a recepção de sinal provido da rede elétrica, o filtro passa-faixas presente no *Front-End Interface* é desconsiderado devido a elevada impedância do modem PLC durante esta etapa. Além disso, é caracterizado um filtro passa-altas devido a indutância própria do enrolamento do transformador de sinais em em série com $L1$ e $C18$, como visto

na Figura 10. Esta característica é essencial para atenuar o nível de tensão presente na rede elétrica, na frequência de 50/60Hz.

Em se tratando de recepção de sinais da rede elétrica, este é condicionado pelo circuito presente na Figura 13. Tal circuito exerce a função de um filtro passa-faixas ativo de ganho controlável, sintonizado em aproximadamente 72kHz. Este filtro recebe o sinal provido pela *Front-End Interface*, por meio da linha *RCV_BPF*, realizando sua filtragem e amplificação a depender do ajuste da resistência variável *RV2*, possibilitando um ajuste de ganho entre $-6,5dB$ e $20dB$. Após o tratamento do sinal pelo filtro ativo, este é finalmente processado e demodulado pelo modem PLC.

Figura 13 – Filtro passa-faixas ativo utilizado na recepção do sinal

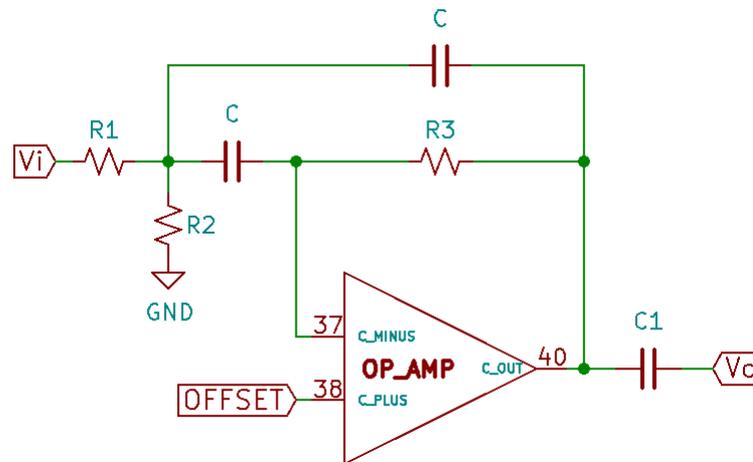


A fim de facilitar o entendimento sobre o filtro ativo desenvolvido, é demonstrado no diagrama da Figura 14, de forma resumida, a estrutura utilizada para obtenção de um filtro passa-faixas de segunda ordem de ganho fixo, utilizando-se valores idênticos de capacitâncias. Este filtro ideal é representado matematicamente pela Equação 3.3.

$$H(S) = -\frac{1}{R_1 \times C} \times \frac{S}{S^2 + \frac{2}{C \times R_3} \times S + \frac{R_1 + R_2}{C^2 \times R_1 \times R_2 \times R_3}} \quad (3.3)$$

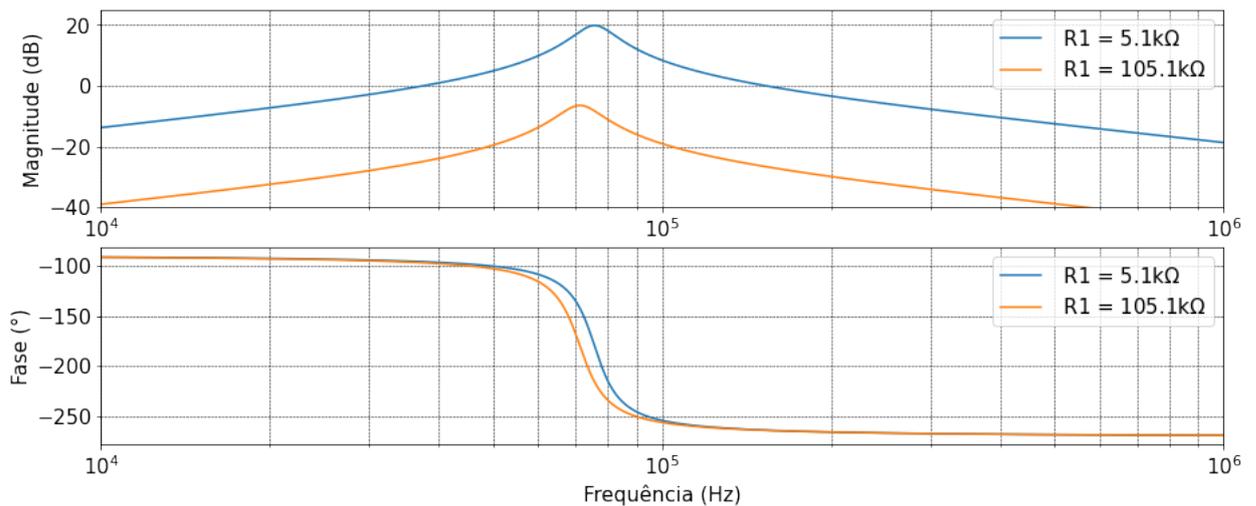
Utilizando-se da Equação 3.3 e observando os valores de componentes descritos na Figura 13, é descrito o comportamento em frequência do filtro passa-faixas ativo por meio do Diagrama de Bode presente na Figura 15, com $R2 = 688\Omega$ e $C = 270pF$. É observado um pequeno deslocamento em frequência com o ajuste do resistor variável *RV2*, porém, tal desvio não afeta consideravelmente as funcionalidades esperadas pelo modem PLC.

Figura 14 – Filtro passa-faixas ativo ideal representado pela Equação 3.3



Fonte: Autoria Própria

Figura 15 – Diagrama de Bode para Equação 3.3



Fonte: Autoria Própria

3.4 Controle de intensidade de tensão e corrente de saída

O controle de intensidade das grandezas de tensão e corrente presentes entre as conexões *ATOP1* e *ATOP2* (*Power Line Driver Output*) são definidas pelos resistores *R1*, *R2* e *R3*, presentes no diagrama da Figura 16. Tais resistores são responsáveis por caracterizar os *feedbacks* de tensão (*Voltage control loop*) e corrente (*Current control loop*) referentes a tais conexões.

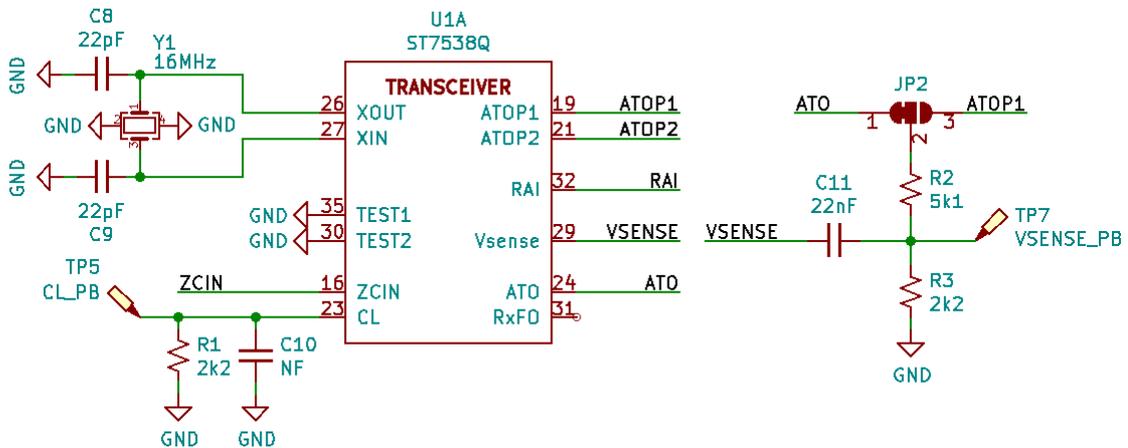
Tais *feedbacks*, por sua vez, são utilizados para controlar o bloco *Controle Automático de Nível*, ou (*CAN*), que consiste em um amplificador de ganho variável atuante sobre a tensão de saída nas conexões *ATOP1* e *ATOP2*. Desta forma, o controle de tensão tende a manter a amplitude de tensão constante na saída do *PLC*, a depender dos valores

dos resistores $R2$ e $R3$. Já o controle de corrente tende a limitar a saída de corrente do mesmo a um nível definido pelo resistor $R1$.

Desta forma, tendo em posse a [Equação 3.4](#) e objetivando-se alcançar um valor de referência $V_{ORMS} \approx 1V$ entre os terminais de saída ATOP1 e ATOP2, os valores de $R2$ e $R3$ foram definidos, respectivamente como, $5.1k\Omega$ e $2.2k\Omega$. Tais valores foram escolhidos levando em consideração os valores típicos para $VCL_{TH} = 180mV$ e $VCL_{HYST} = 18mV$ (STMICROELECTRONICS, 2006, P. 11), resultando em um valor aproximado de $V_{ORMS} \approx 0,929V$.

$$V_{ORMS} \approx \frac{2}{\sqrt{2}} \times \frac{R_2 + R_3}{R_3} \times (VCL_{TH} \pm VCL_{HYST}) \quad (3.4)$$

Figura 16 – Feedback de tensão e controle de corrente

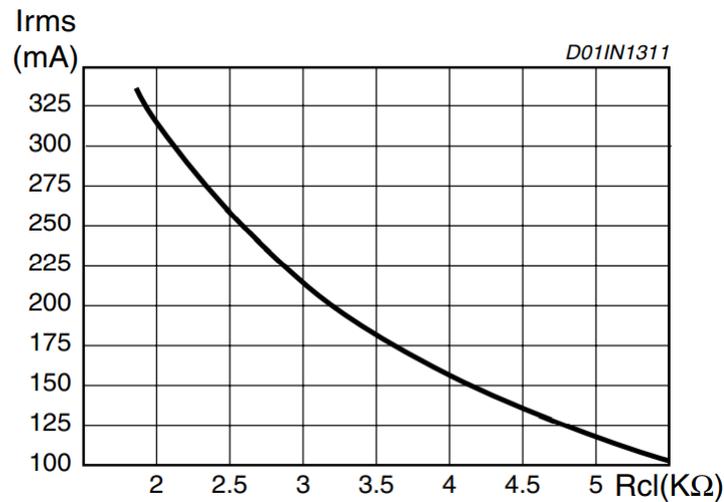


Fonte: Autoria Própria

Já com relação à limitação de corrente, tendo em posse o gráfico da [Figura 17](#) e objetivando-se alcançar um valor de referência $I_{ORMS} \approx 300mA$, O valor de $R1$ foi definido como $2.2k\Omega$, resultando em um valor de corrente máximo de $I_{ORMS} \approx 280mA$.

O valor máximo de tensão definido nos terminais ATOP devem obedecer a relação definida pela [Equação 3.5](#). Como $PAV_{cc} = 9V$ e $V_{ATOP} = (0,929/2) \times \sqrt{2} = 0,657V$, a condição estabelecida é satisfeita. Já para o valor máximo de corrente, não há uma limitação física, visto que o modem PLC fornece uma corrente de saída máxima de até $400mA$ (STMICROELECTRONICS, 2006, P. 27).

$$PAV_{cc} \geq \frac{V_{ATOP}}{2} + 7.5 \quad (3.5)$$

Figura 17 – Curva de controle de saída *vs* Rcl (R1)

Fonte: ([STMICROELECTRONICS, 2006, P. 28](#))

3.5 Simulações de Hardware

Nesta seção, serão demonstradas as simulações pertinentes aos circuitos de transmissão e recepção envolvidos no projeto. Para tanto, foi utilizada a ferramenta LTSpice¹, proporcionando a criação dos esquemáticos e suas posteriores simulações. Neste momento, é objetivo observar a composição do sinal recebido e transmitido.

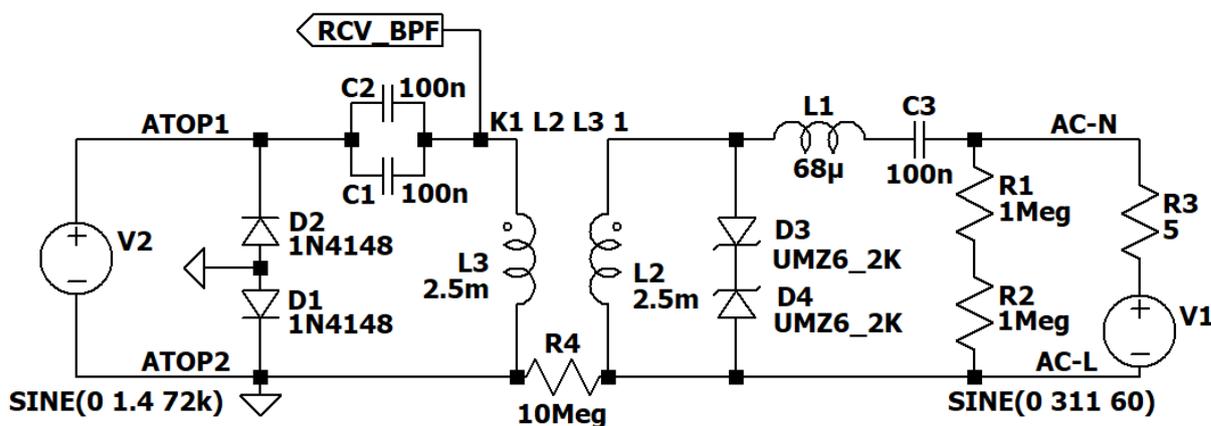
Tomando inicialmente o caso de transmissão do sinal, onde o modem PLC injeta na rede o sinal contendo a informação a ser transmitida, representado pelo diagrama da [Figura 18](#), é possível observar a composição em frequência do sinal presente na rede elétrica na [Figura 19](#). Como é de se esperar, há uma componente em 60Hz, de amplitude elevada, além da frequência de transmissão do PLC em 72kHz, e suas respectivas harmônicas ímpares, indesejáveis.

Em seguida, é demonstrado a simulação com o circuito de recepção de sinal, composto pelo filtro ativo, representado pela [Figura 20](#). Neste caso, foi utilizado uma fonte de tensão em 72kHz com amplitude de 0,05V acoplada à rede elétrica. O gráfico presente na [Figura 21](#) demonstra a composição do sinal após as etapas de condicionamento do sinal recebido da rede elétrica. É possível notar a atenuação nas baixas frequências, principalmente a de 60Hz. também é possível observar um pico em aproximadamente 10kHz causado pela ressonância entre a indutância própria do transformador de sinais ($L2$), do indutor $L1$ e do capacitor $C3$ presentes no lado de alta tensão.

Além disso, pode-se avaliar o ganho em amplitude da componente de tensão em

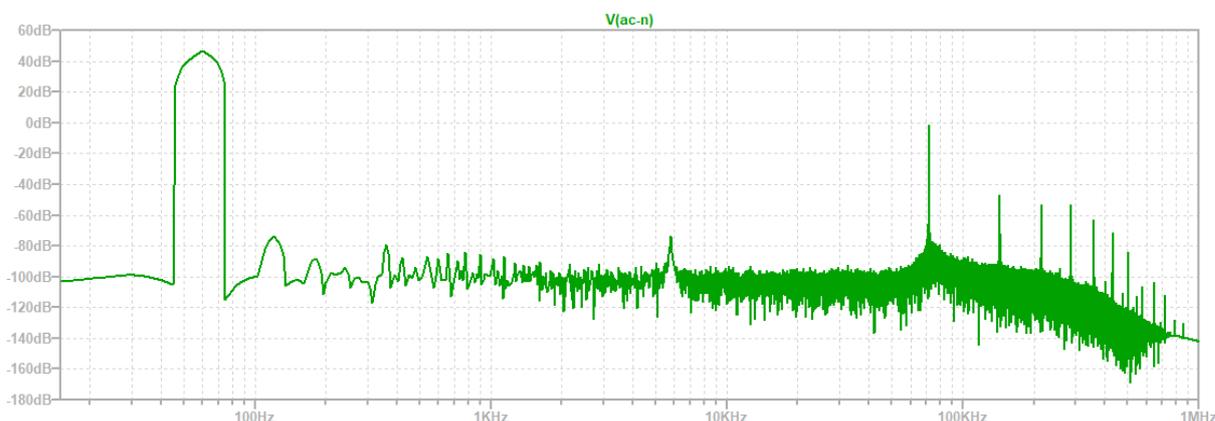
¹ LTSpice é um software de simulação SPICE de alto desempenho com criação de diagramas esquemáticos e visualizador de formas de onda. Possui vários aprimoramentos e modelos para facilitar a simulação de circuitos analógicos.

Figura 18 – Circuito simulado de transmissão em 72kHz



Fonte: Autoria Própria

Figura 19 – FFT para simulação do circuito da Figura 18



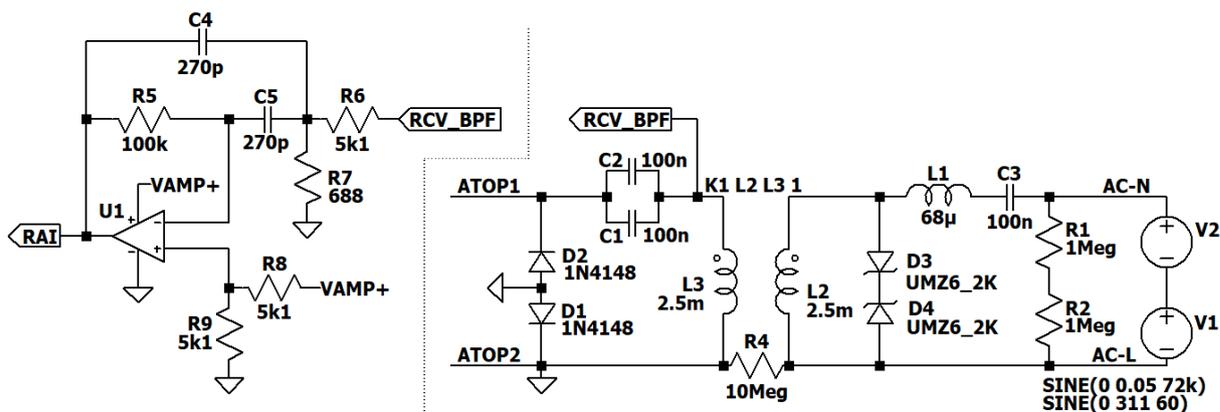
Fonte: Autoria Própria

72kHz no gráfico apresentado na Figura 21 observando sua amplitude, correspondendo a aproximadamente $-10dB$. Sabendo-se ainda que o nível de tensão desta componente presente na rede elétrica é $20 \times \log_{10}(0,05/\sqrt{2}) = -29,03dB$, é possível determinar um ganho simulado nesta frequência de aproximadamente $20dB$.

3.6 Placa de circuito impresso desenvolvida

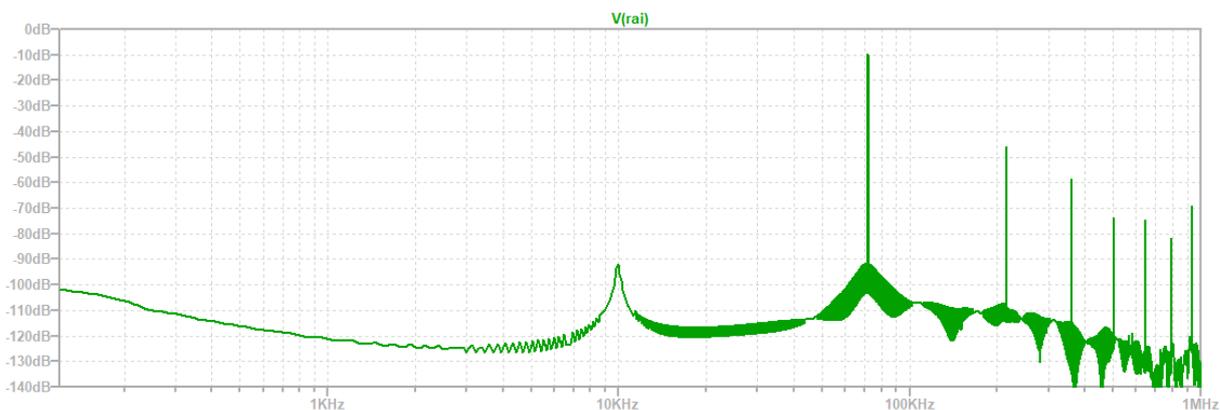
Neste trabalho utilizou-se o *Kicad EDA* para o desenvolvimento da placa de circuito impresso presente neste trabalho. Este se apresenta como uma ótima opção, possibilitando o desenvolvimento de esquemáticos eletrônicos, contendo diversas bibliotecas de componentes já disponíveis para utilização imediata no âmbito da instalação do software, assim como ambiente gráfico integrado para criação e edição de placas de circuito impresso, além da possibilidade de visualização os arquivos de fabricação.

Figura 20 – Circuito simulado de recepção em 72kHz



Fonte: Autoria Própria

Figura 21 – FFT para simulação do circuito da Figura 20



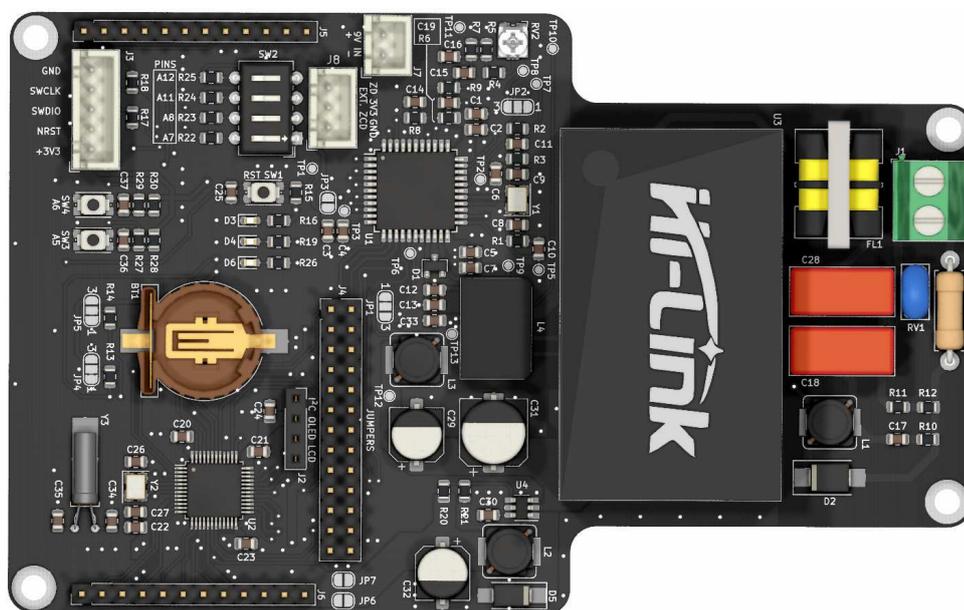
Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, todos os circuitos brevemente expostos no [Capítulo 3](#) e detalhados no [Apêndice A](#), foram realizados nesta ferramenta, dando origem ao esquemático eletrônico deste projeto. Este, posteriormente, foi utilizado para dar origem a placa de circuito impresso, demonstrada pelo seu modelo 3D presente na [Figura 22](#). Para tanto, a própria ferramenta *Kicad EDA* possui o ambiente *Kicad PCB Editor*, possibilitando o design da PCB sem a necessidade de ferramentas externas.

A fotografia apresentada pela [Figura 23](#) demonstra o módulo de hardware devidamente montado e funcional, com um módulo LCD demonstrando os dados recebidos pela rede elétrica. Além disso, é demonstrado também a utilização da conexão USB, como tratado no [Capítulo 4](#) a seguir.

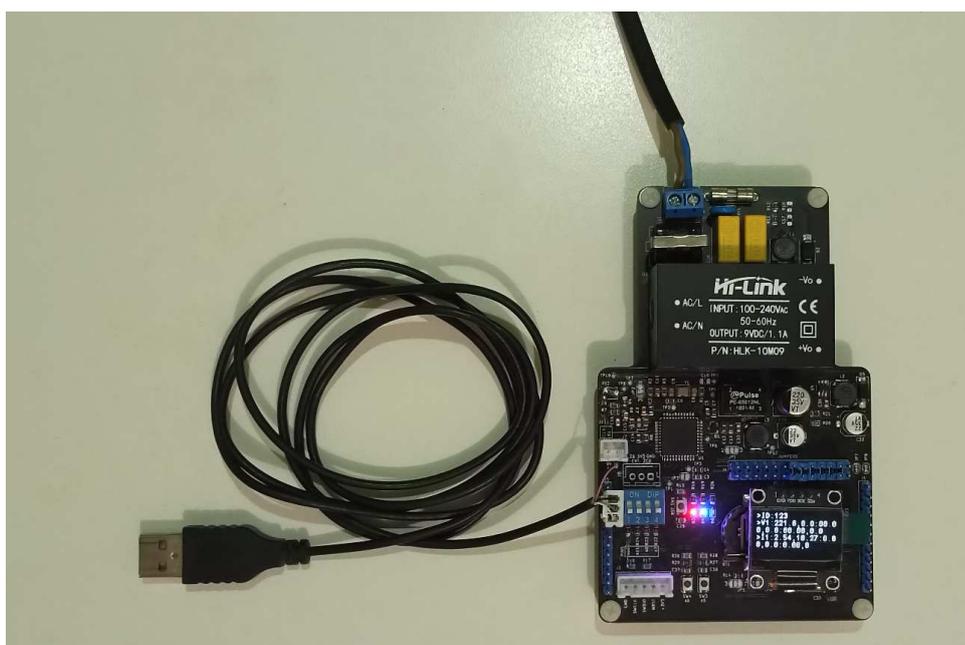
No [Apêndice B](#) estão presentes detalhes quanto as dimensões físicas do protótipo desenvolvido. para mais detalhes quanto ao design da PCB, o projeto está disponível em <https://github.com/anderson-pereira>.

Figura 22 – Renderização da PCB desenvolvida



Fonte: Autoria Própria

Figura 23 – Módulo de hardware completo



Fonte: Autoria Própria

4 Aplicação e Resultados

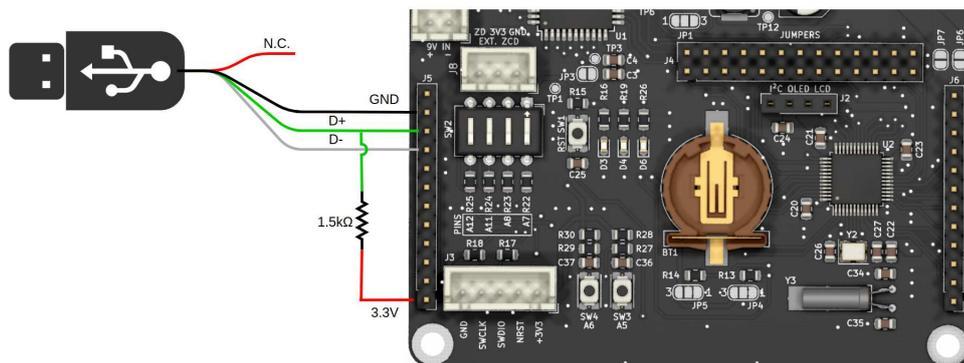
Como aplicação do projeto desenvolvido, foi realizada uma interface de comunicação *UART-USB* via rede elétrica. Para tanto, foram necessários dois dos módulos desenvolvidos, um primeiro responsável por capturar os dados transmitidos por interface *UART* de um *hardware* externo, por meio dos pinos *UART1_TX (PA9)* e *UART1_RX (PA10)*, empacotando-os e os transmitido via rede elétrica para o segundo módulo.

Já o segundo módulo é responsável por receber os pacotes enviados via rede elétrica pelo primeiro módulo, desempacotando-os e validando as informações por meio de checagem cíclica de redundância (ou *CRC*). Após tal validação, os dados recebidos são disponibilizados via interface USB por uma *Virtual COM Port* ao qual o microcontrolador *STM32F103C8* é configurado para realizar.

4.1 Interface USB

Para possibilitar a conexão via USB, o microcontrolador utilizado no projeto conta com uma interface USB *Full-Speed* configurável, com possibilidade de utilização de até oito *endpoints* distintos. Dessa forma, é necessário conectar devidamente as linhas *USBDM* e *USBDP* do cabo USB aos respectivos pinos *PA11* e *PA12* do microcontrolador, atentando-se para um resistor de pull-up de $1,5k\Omega$ para 3,3V na linha *USBDP*, classificando o dispositivo como *High speed*. Tal modificação é descrita em detalhes pela [Figura 24](#).

Figura 24 – Conexões necessárias para utilização da interface USB



Fonte: Autoria Própria

Com tais ações relacionadas à interface USB, deve-se obter o reconhecimento automático do dispositivo no *Host* ou *desktop* ao qual o módulo foi conectado. Como exemplo, a [Figura 25](#) demonstra as mensagens de *log* durante a descoberta do novo dispositivo USB, assim como sua classificação como dispositivo *tty*. Softwares como o minicom, ou Putty

podem ser utilizados para acessar a interface serial virtual *ttyACM0* e visualizar os dados recebidos pelo modem PLC.

Figura 25 – Reconhecimento do dispositivo USB em sistemas Linux

```
anderson@Inspiron-5675 ~  
$ dmesg  
[ 529.775168] usb 1-11.1: new full-speed USB device number 10 using xhci_hcd  
[ 530.100076] usb 1-11.1: New USB device found, idVendor=0483, idProduct=5740, bcdDevice= 2.00  
[ 530.100079] usb 1-11.1: New USB device strings: Mfr=1, Product=2, SerialNumber=3  
[ 530.100081] usb 1-11.1: Product: Modem PLC ComPort  
[ 530.100082] usb 1-11.1: Manufacturer: Anderson P.  
[ 530.100084] usb 1-11.1: SerialNumber: 6D6F45755748  
[ 530.113219] cdc_acm 1-11.1:1.0: ttyACM0: USB ACM device
```

Fonte: Autoria Própria

4.2 Utilização do FreeRTOS

A fim de gerenciar as várias tarefas presentes nesta aplicação, foi utilizado o *kernel FreeRTOS*¹, bastante difundido em aplicações com sistemas embarcados. A utilização deste em aplicações envolvendo os microcontroladores da STMicroelectronics é facilitado, disponível para uso imediato por meio da IDE STMCubeIDE, do próprio fabricante. Desse modo, funcionalidades cruciais, como a transmissão e recepção de dados pelo modem PLC, além de tarefas secundárias como atualização do *display* LCD e gerenciamento de pinos de *I/O* presentes no protótipo são realizados por este sistema operacional.

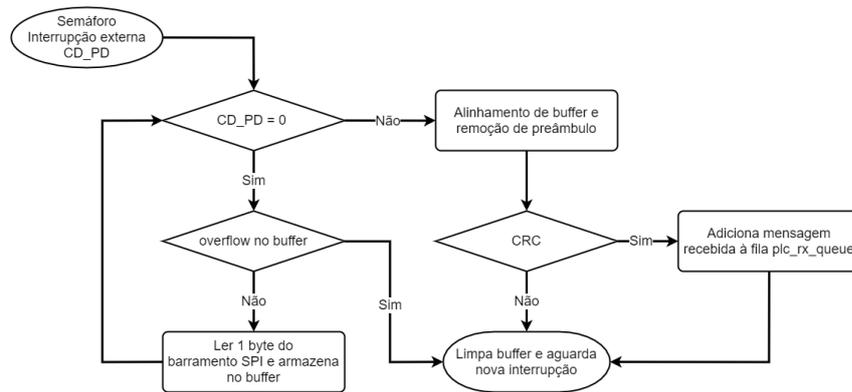
Para o caso de recepção de dados do modem PLC, o sinal *CD_PD* é utilizado para iniciar a rotina de recepção, como demonstrado pelo fluxograma na [Figura 26](#). Este sinal é utilizado para indicar a detecção de preâmbulo com condicionamento, forçando o sinal *CD_PD* para valor lógico zero após a detecção e enquanto existir transmissão de dados. Dessa forma, Enquanto o sinal *CD_PD* estiver em nível lógico baixo, a tarefa de recepção de dados armazena os valores recebidos do modem PLC via interface *SPI*.

Em caso de sucesso na recepção dos dados, ocorrerá um alinhamento dos dados recebidos e remoção do preâmbulo presente na mensagem. Após estes passos, é realizado a checagem cíclica de redundância, validando o pacote recebido. Em caso de sucesso, os dados recebidos são disponibilizados por meio da fila *plc_rx_queue* para posterior transmissão pela aplicação USB e disposição no *display* LCD.

Uma segunda funcionalidade essencial, a de transmissão de dados para o modem PLC, é realizada pela tarefa descrita pelo fluxograma na [Figura 27](#). Nesta, é utilizada uma fila *plc_tx_queue* responsável por armazenar os dados a serem transmitidos. Dessa forma, e na existência de informações nesta fila, dar-se início ao processo de transmissão,

¹ FreeRTOS é um sistema operacional em tempo real criado para microcontroladores e pequenos microprocessadores, permitindo que dispositivos com pouca memória e um único núcleo de processamento executem operações multitarefas.

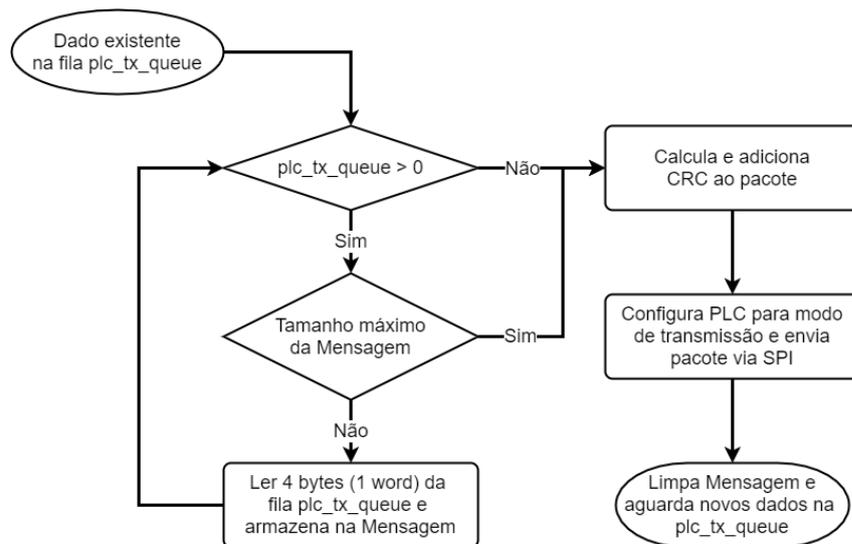
Figura 26 – Lógica para envio de pacotes via PLC



Fonte: Autoria Própria

criando o pacote a ser transmitido, respeitando o seu tamanho máximo e anexando, a este, o *checksum* referente à checagem cíclica de redundância.

Figura 27 – Lógica para recepção de pacotes via PLC



Fonte: Autoria Própria

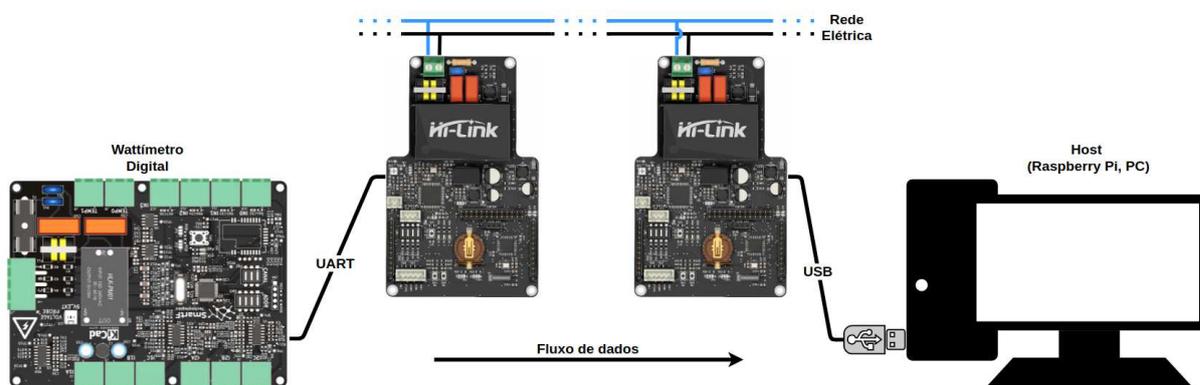
Desta forma, o modem PLC é configurado em modo de transmissão, por meio dos sinais *RxTx* e *REG_DATA*, com o pacote criado enviado via interface *SPI*, onde os dados são modulados e injetados na rede elétrica.

Além das duas tarefas citadas acima, pode-se falar também da tarefa referente ao encaminhamento de dados pelas interfaces *UART* e *USB*, assim como a atualização das informações no *display* LCD. Para tanto, esta tarefa faz uso dos dados disponibilizados pela fila *plc_tx_queue*, como visto na Figura 27, replicando seu conteúdo entre as interfaces e o LCD. Para mais detalhes, o código fonte utilizado no projeto está disponível em <https://github.com/anderson-pereira>.

4.3 Monitoramento Energético Pela Rede Elétrica

Com a aplicação descrita nas seções anteriores, pode-se criar inúmeras aplicações práticas no âmbito residencial. Para fins demonstrativos, foi realizada uma aplicação envolvendo o monitoramento energético residencial, apreciada em aplicações de automação residencial e *IoT*. Para tanto, foi utilizado um Wattímetro digital, de autoria própria, capaz de monitorar grandezas como tesões, correntes, ângulos de fase, dentre outros. Este possui uma interface UART, com padrão 38400 8:N:1, ao qual é conectada diretamente à interface serial do módulo PLC desenvolvido. A Figura 28 descreve tal aplicação.

Figura 28 – Aplicação com monitoramento energético



Fonte: Autoria Própria

As informações enviadas pelo Wattímetro são em formato de texto simples, não necessitando de nenhum pós processamento no *Host* para uma rápida interpretação. Dessa forma, é possível observar pela Figura 29 dados monofásicos de tensão ($>V1$), corrente ($>I1$), potência ativa ($>AP1$) e potência reativa ($>RP1$) para esta aplicação específica. Vale salientar que, para as leituras de tensão e correntes, os dados são estruturados como $(Módulo A), (ângulo A):(Módulo B), (ângulo B):(Módulo C), (ângulo C)$, visto que este wattímetro pode operar em instalações elétricas trifásicas.

Figura 29 – Dados recebidos pela interface serial

```

anderson@Inspiron-5675 ~
└─$ sudo cat /dev/ttyACM0
>ID:123
>V1:221.6,0.0:00.00,0.0:00.00,0.0
>I1:2.54,18.27:0.00,0.0:0.00,0.0
>I2:0.00,0.0:0.00,0.0:0.00,0.0
>F:60.02
>T:0.00:0.00
>IN:0:0:0:0
>AP1:121.87
>RP1:57.21
>AP2:0.0
>RP2:0.0

```

Fonte: Autoria Própria

5 Conclusão

Neste trabalho, foi desenvolvido um módulo de comunicação via rede elétrica, tecnologia conhecida como *Power-Line Communication* (PLC), com possibilidade de utilização no âmbito residencial, além de aplicações com *IoT*. Para tanto, este módulo conta com algumas interfaces de comunicação bastante difundidas, tais como *I²C*, *UART*, *SPI* e *USB*, além de conexões *GPIO* disponíveis para utilização.

Para tanto, foram apresentados vários conceitos básicos relacionados a tecnologia PLC, como as características de transmissão em *Narrowband* e *Broadband* e suas aplicações. Além disso, foram demonstrados modelos de caracterização do canal de comunicação, levando em consideração as variações de impedância ao decorrer da instalação elétrica.

Ainda neste contexto, foram apresentados conceitos básicos de modulação FSK, com exemplos de modulação e demodulações coerente e incoerente. Por fim, foram descritos as funcionalidades básicas do modem PLC utilizado neste trabalho, destacando suas características de transmissão e recepção de dados.

Baseados nos conceitos apresentados, foi desenvolvido um protótipo de hardware completamente funcional, utilizando-se do modem PLC ST7538Q. Para tal, foram descritas em detalhes as várias etapas de projeto, as respostas em frequência dos filtros elétricos utilizados, as simulações dos circuitos de recepção e transmissão, dentre outros.

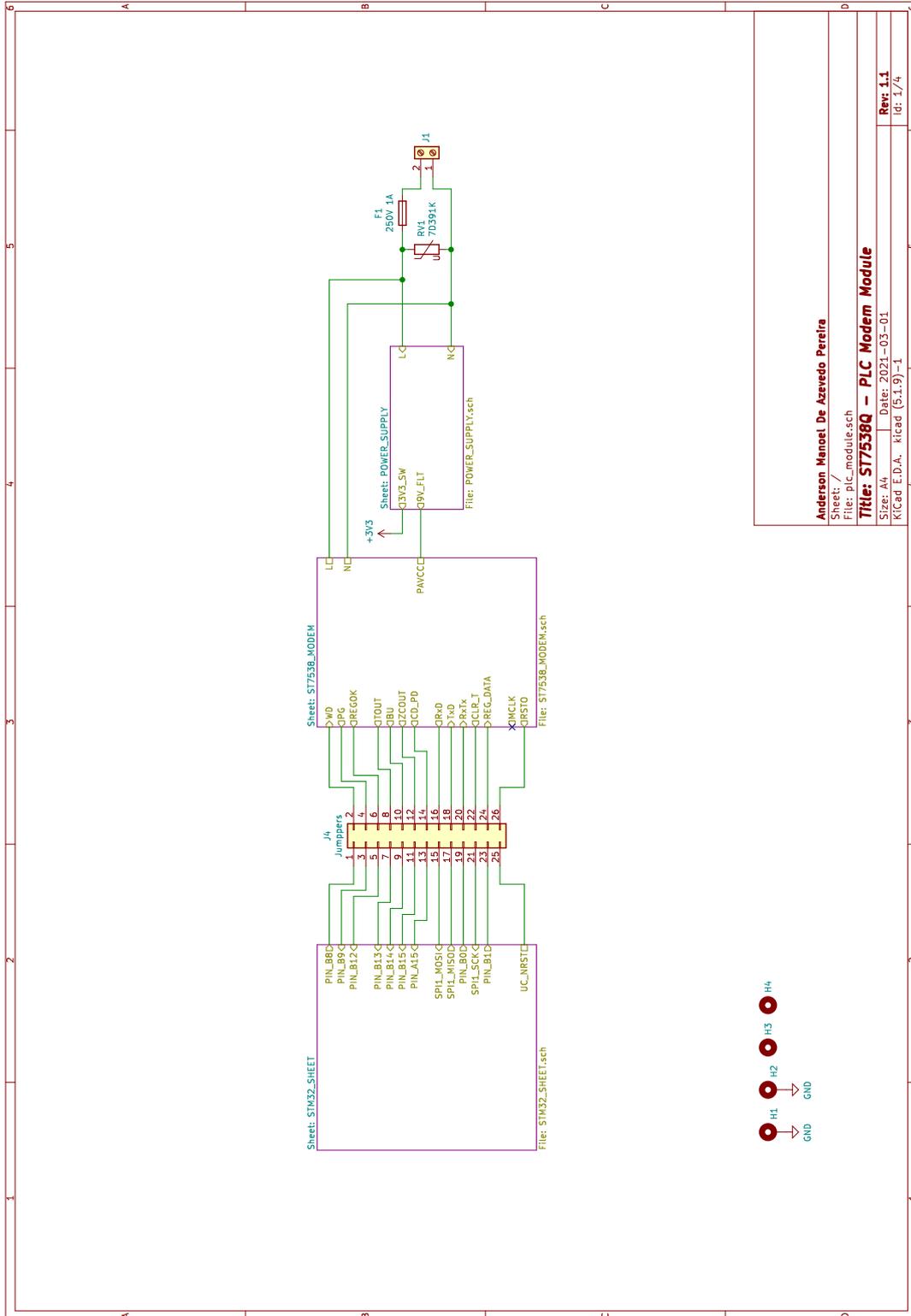
Diante do exposto, conclui-se que os objetivos foram atingidos em sua totalidade, obtendo-se um módulo de hardware funcional, possibilitando sua fácil utilização em conjunto com demais dispositivos e sistemas embarcados. Para todos os casos de testes, os módulos estabeleceram comunicação a uma distância de 50m, distância esta limitada pelas características físicas da instalação elétrica no local de testes. Não foram realizados testes visando a distância máxima possível de transmissão e os possíveis impactos causados pela variação de impedância da rede elétrica.

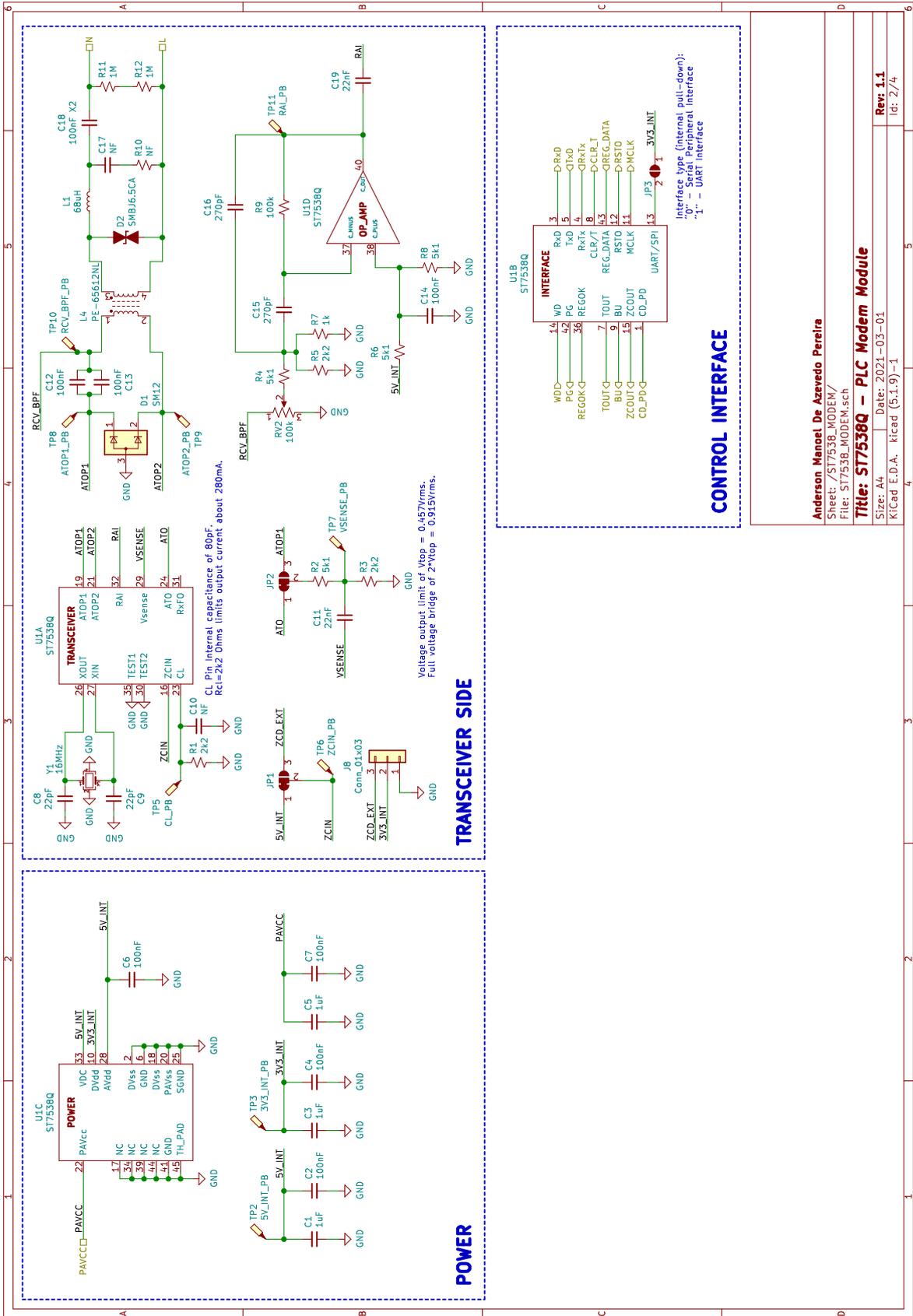
Como trabalhos futuros, serão necessários alterações de hardware relacionadas a melhoria da relação sinal-ruído durante a recepção de dados. Este problema interfere diretamente na distância máxima de transmissão e na corrupção de pacotes pelo modem PLC. Além disso, será necessário adotar algum protocolo de comunicação, possibilitando a interação entre vários módulos PLC.

Referências

- Gotz, M. et al. Power line channel characteristics and their effect on communication system design. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 4, p. 78–86, 2004.
- JR., L. E. F. *Principles of electronic communication systems*. 4 ed.. ed. [S.l.]: McGraw Hill Education, 2016. ISBN 978-0-07-337385-0.
- MELIT, M. et al. *Modeling of the transmission of power line communication signal through the power electric transformer*. 2012. Disponível em: <<https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12243-011-0277-4>>. Acesso em: 12 Mar. 2021.
- MIDDLESTEAD, R. W. *Digital Communications with Emphasis on Data Modems: Theory, Analysis, Design, Simulation, Testing, and Applications*. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 2017. ISBN 0470408529,9780470408520.
- MUDRIIEVSKYI, S. Power line communications: State of the art in research, development and application. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, v. 68, n. 7, p. 575–577, 2014. ISSN 1434-8411. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841114000995>>.
- QORVO. *ACT4088: 28V, 1.5A, 1.4MHz Step-Down DC/DC Converter*. 2019. Disponível em: <<https://www.qorvo.com/products/d/da006760>>. Acesso em: 24 Fev. 2021.
- STMICROELECTRONICS. *ST7538Q: FSK power line transceiver*. 2006. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/st7538q.pdf>>. Acesso em: 24 Fev. 2021.
- YIGIT, M. et al. *Power line communication technologies for smart grid applications: A review of advances and challenges*. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614002369>>. Acesso em: 12 Mar. 2021.

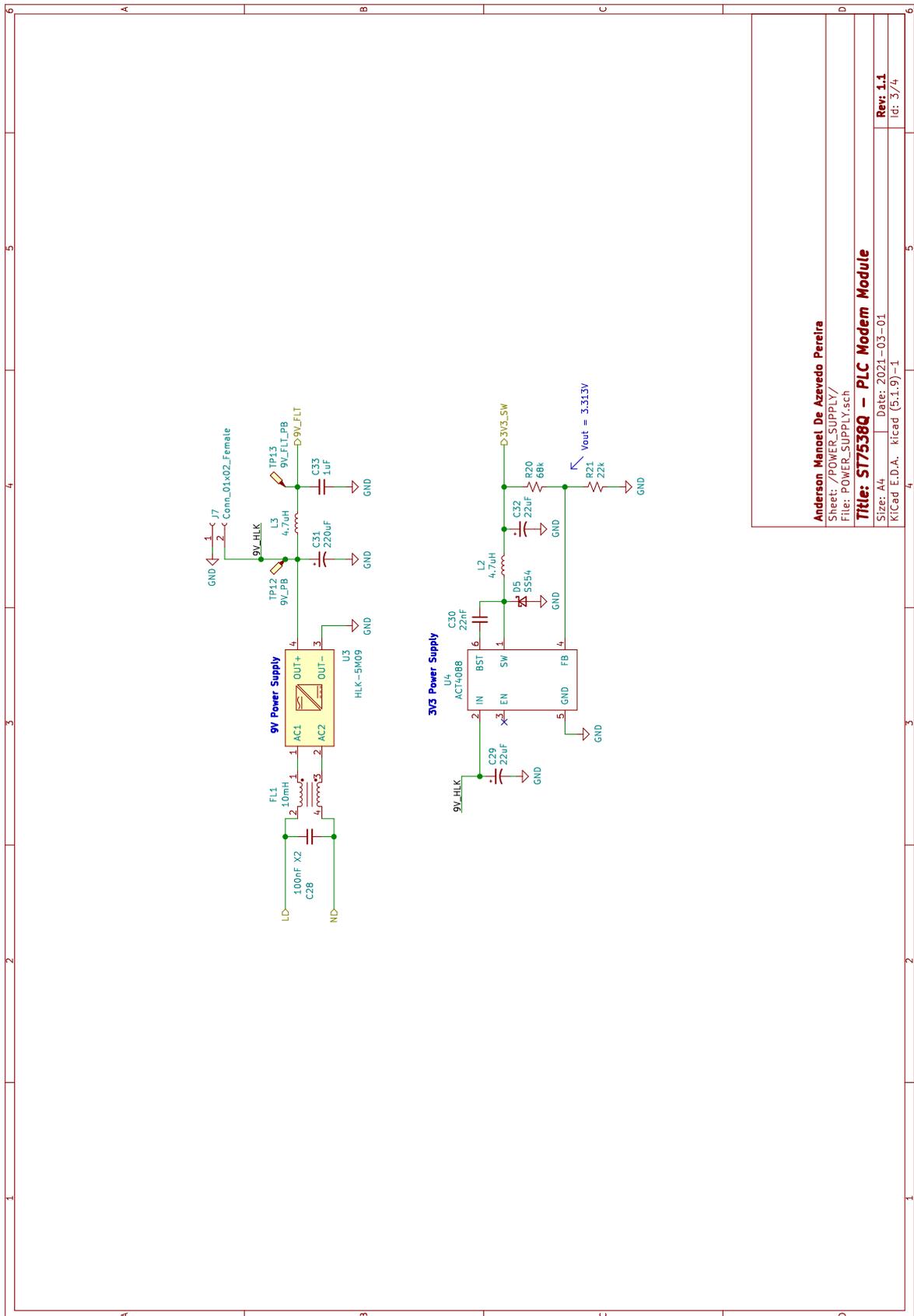
ANEXO A – Esquemático Eletrônico





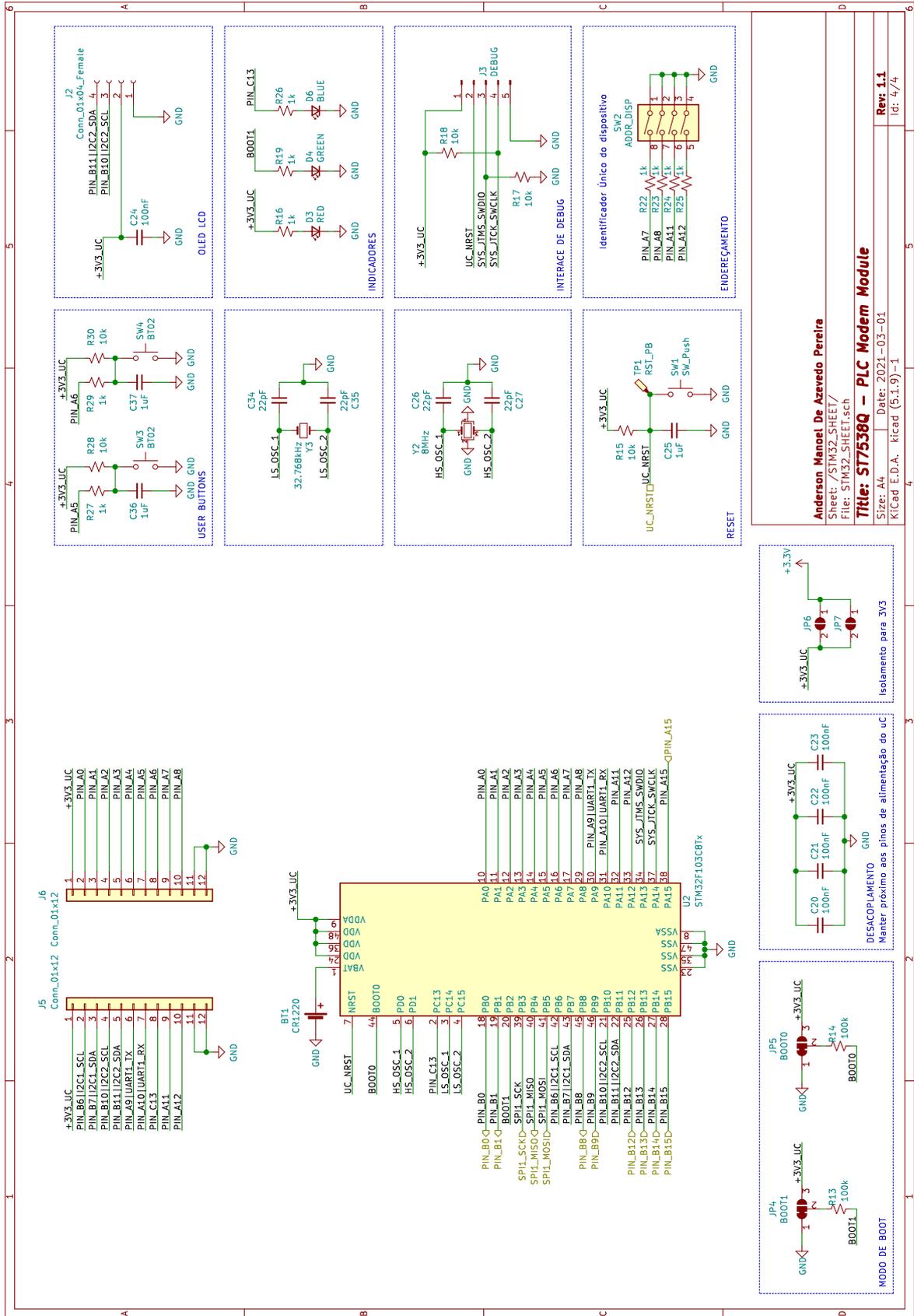
Anderson Manoel De Azevedo Pereira
 Sheet: //ST7538_Q.MODEM/
 File: ST7538_Q.MODEM.sch
Title: ST7538Q – PLC Modem Module
 Size: A4 Date: 2021-03-01
 K:\Cad E.D.A. Kicad (5.1.9)-1

Rev: 1.1
 Id: 2/4



Anderson Manoel De Azevedo Pereira
 Sheet: //POWER_SUPPLY/
 File: POWER_SUPPLY.sch
Title: S17536Q - PLC Modem Module
 Size: A4 Date: 2021-03-01
 Kicad E.D.A. Kicad (5.1.9)-1

Rev: 1.1
 Id: 3/4



Anderson Manoel De Azevedo Pereira
 Sheet: /STM32-SHEET/
 File: STM32-SHEET.sch

Title: ST7538Q - PLC Modem Module

Size: A4 Date: 2021-03-01
 Kicad E.D.A. Kicad (5.1.9)-1

Rev: 1.1
 Id: 4/4

Isolamento para 3V3

DESACOPLEMENTO

Manter próximo aos pines de alimentação do uC

MODO DE BOOT

OLED LCD

INDICADORES

INTERFACE DE DEBUG

ENDERECAMENTO

Identificador Único do dispositivo

USER BUTTONS

RESET

OSCILLATORS

RESET

ANEXO B – Dimensões Físicas

