

Nestor Dias Pereira Neto

**Desenvolvimento de um co-processador de
vídeo em FPGA para integração com o Robot
Operating System - ROS**

Salvador

30 de abril 2022

Nestor Dias Pereira Neto

Desenvolvimento de um co-processador de vídeo em FPGA para integração com o Robot Operating System - ROS

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Bahia - UFBA

Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Wagner Oliveira

Coorientador: Paulo César

Salvador

30 de abril 2022

Nestor Dias Pereira Neto

Desenvolvimento de um co-processador de vídeo em FPGA para integração com o Robot Operating System - ROS/ Nestor Dias Pereira Neto. – Salvador, 30 de abril 2022-

43p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Wagner Oliveira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia - UFBA
Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 30 de abril 2022.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. 2. Palavra-chave3. I. Orientador. II. Universidade xxx. III. Faculdade de xxx. IV. Título

Nestor Dias Pereira Neto

Desenvolvimento de um co-processador de vídeo em FPGA para integração com o Robot Operating System - ROS

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Salvador, 24 de novembro de 2012:

Wagner Oliveira
Orientador

Professor
Convidado 1

Professor
Convidado 2

Salvador
30 de abril 2022

Resumo

Segundo a.o resumo deve ressaltar o objetivo, o método, os resultados e as conclusões do documento. A ordem e a extensão destes itens dependem do tipo de resumo (informativo ou indicativo) e do tratamento que cada item recebe no documento original. O resumo deve ser precedido da referência do documento, com exceção do resumo inserido no próprio documento. (...) As palavras-chave devem figurar logo abaixo do resumo, antecidas da expressão Palavras-chave:, separadas entre si por ponto e finalizadas também por ponto.

Palavras-chave: latex, abntex, editoração de texto.

Abstract

oihbqptipbõq4tnpot4photnj4yojnj4ynojp

Keywords: latex. abntex. text editoration.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Organização	14
I	REFERENCIAIS TEÓRICOS	15
2	CYCLONE V: SYSTEM ON A CHIP - SOC	17
2.1	Field Programmable Gate Array - FPGA	17
2.2	Hard processor ARM	17
2.2.1	Embedded Linux	17
2.3	Kit de desenvolvimento DE10-nano	17
3	ROBOT OPERATING SYSTEM - ROS	19
3.1	Sistema multiagentes	19
II	DESENVOLVIMENTO	21
4	ARQUITETURA DO SISTEMA	23
4.1	Modelo cliente-servidor	23
4.2	Biblioteca de comunicação - libinterfacesocket	24
5	PACOTE ROS (CLIENTE)	27
6	SERVIDOR	31
III	RESULTADOS	35
7	RESULTADOS ALCANÇADOS	37
8	CONCLUSÃO	39
9	ESTUDOS FUTUROS	41

REFERÊNCIAS	43
-------------------	----

1 Introdução

Nos últimos anos novas técnicas para construção de robôs tem estado em muita evidência, em especial áreas como robótica móvel e robótica colaborativa tem chamado bastante atenção dos pesquisadores. Uma das principais características dessas áreas é exigência de um alto grau de percepção do ambiente que rodeia o robô, além de uma execução mais precisa em seus movimentos, isto devido ao fato de que as atividades desempenhadas por robôs estão exigindo um nível cada vez maior de interação com as atividades desempenhadas por seres humanos.

Outro ponto que sempre teve bastante importância no desenvolvimento de novos robôs é a autonomia, tanto do ponto de vista do consumo energético quando na tomada de decisões, superar o nível de autonomia atual continua sendo um dos principais objetivos na pesquisa e desenvolvimento de novos robôs.

As consequências desses trabalhos podem ser percebida em robôs com

2 - a busca por sistemas com um grau maior de autonomia A robótica tem se caracterizado pelo grande nível de percepção do ambiente e pelos sistemas complexos de controle do movimentos

O ROS como um framework que esta se tornando o padrão no desenvolvimento de robótica

1 - Fazer um link com a complexidade dos sistemas robóticos modernos e o ROS

Agrupar inúmeros "blocos" de softwares usados em robótica, fornecer drivers para hardwares específicos (sensores e atuadores), gerenciar troca de mensagens entre os nós que fazem parte do sistema, são as funções do ROS. Essas características fazem com que o ROS seja reconhecido com um pseudo sistema operacional (PYO et al., 2017). Dessa maneira o ROS se tornou muito ágil no desenvolvimento de novas aplicações para robótica. Usando nós já desenvolvidos e testados por outros desenvolvedores podemos criar novos sistemas completos apenas gerenciando esses nós na rede interna do ROS. Essa abordagem fez com que o número de pacotes para o ROS cresça em uma taxa muito rápida, desde o ano de seu lançamento, 2007, até 2012 o ROS aumentou de 1 para 3699 pacotes (YAMASHINA et al., 2005).

Com essa distribuição de tarefas através de vários nós podemos criar sistemas cada vez mais complexos, apenas inserindo novos nós na rede, essa rede é gerenciada pelo ROS Master, que é apenas mais um nó do sistema, mas com a função de ser um servidor de nome e serviços para o restante dos nós. Ele identifica os nós na rede, assim todos os nós podem se comunicar com os outros através de conexões peer-to-peer, Figura 1. Para

desenvolver novas aplicações para o crescente grupo de pacotes ROS, o desenvolvedor deve respeitar os protocolos de comunicação da rede, as bibliotecas do ROS facilitam este trabalho, por já fornecer funções prontas para o desenvolvimento de novos códigos compatíveis e que possam se registrar na rede. Detalhes dos protocolos e interno podem ser visto em (ROS, 2011a), (ROS, 2018) e (ROS, 2011b).

«««< HEAD Por se tratar de um hardware configurável o FPGA é ideal para processamento digitais de sinais. O potencial que os FPGAs possuem para melhorar o ===== **Desenvolvimento com fpga, SoC. dificuldade e maior tempo de desenvolvimento**

1 - explicar a ideia do FPGA e a dificuldade do desenvolvimento

O potencial que os FPGAs possuem para melhorar o »»»> 688eea1c4a8a8466b873451fbfb594eb047e8a desempenho de sistemas que utilizam processamento digitais de sinal é conhecido já algum tempo, as possibilidades de paralelismo, criação de estruturas de DSP dedicadas à aplicação, são recursos muito interessantes que a possibilidade do hardware configurado oferecem. Em contra partida as facilidade de desenvolvimento encontradas em aplicações que fazem uso de softwares não são encontradas nas mesmas proporções no mundo do hardware, sendo assim:

Juntar fpga com robótica através do ros dando foco na facilidade de desenvolvimento

2 - Fala sobre o FPGA escolhido

explicar a parte da comunicação entre o computador/ros e o SoC

melhorar a comunicação, comunicação eficiente, pacote pronto e de fácil integração com qualquer sistema ros,

O mais genérico possível para se enquadrar a qualquer projeto é que o desenvolvedor tenha interesse em incluir um FPGA ao sistema

Definir o problema (a pergunta)

- **Como estabelecer a comunicação entre o ROS e um sistema de processamento auxiliar embarcado em um FPGA?**

Este problema é o que o trabalho vai tentar responder, podendo assim outros pesquisadores possam usar os benefícios do uso do hardware dedicado integrados ao benefícios que o ROS fornecem aos sistemas robóticos.

1.1 Justificativa

Nos últimos anos novas técnicas para construção de robôs tem sido bastante estudadas, em especial uma área que tem sido bastante explorada é a robótica móvel. A principal características que tem sido buscada é cada vez fornecer mais autonomia ao sistemas robóticos o que torna seus softwares cada vez mais complexos, o que aumenta a necessidade do uso de processadores muito mais poderosos, consequentemente aumentando muito o consumo de energia. Entretanto a busca por mais autonomia, diz respeito também às baterias, que são as fontes de energia da maioria dos robôs móveis, o que provoca uma verdadeira briga entre poder de processamento e baixo consumo.

Sendo assim, o FPGA pode ser uma ótima alternativa para solucionar os problemas de aumento do poder de processamento em conjunto com baixo consumo de energia. Meyer-Baese (2007) descreve algumas vantagens dos FPGAs modernos para uso em processamento digitais de sinais, como as cadeias de fast-carry usadas para implementar MACs de alta velocidade e o paralelismo tipicamente encontrado em dedign implementados em FPGA. Por essas características o FPGA necessita de frequências menores de trabalho para alcançar desempenho equivalente ou superior às soluções baseadas em processadores, tornando a dissipação de energia consideravelmente menor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma solução para estabelecer comunicação entre *Field Programmable Gate Array - FPGA*, configurado como um co-processador de vídeo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os assuntos relevantes ao projeto: Verilog HDL, embedded linux, Cyclone V, TCP/IP Stack, ROS;
- Conhecer com detalhes os protocolos da rede TCP/IP usada para comunicação interna dos nós e serviços ROS;
- Implementa distribuição embedded linux para processador ARM;
- Estabelecer comunicação entre o ROS e o Cyclone V, através da tecnologia Gigabit Ethernet;
- Testar aplicações de processamento de vídeo em hardware em conjunto com ROS;
- Avaliar a performance com a inclusão do FPGA ao sistema.

1.3 Organização

No primeiro capítulo...

Parte I

Referenciais teóricos

2 Cyclone V: System on a Chip - SoC

2.1 Field Programmable Gate Array - FPGA

2.2 Hard processor ARM

2.2.1 Embedded Linux

2.3 Kit de desenvolvimento DE10-nano

3 Robot Operating System - ROS

3.1 Sistema multiagentes

Parte II

Desenvolvimento

4 Arquitetura do sistema

Para conseguirmos estabelecer a comunicação entre o computador e o SoC precisamos efetuar programação de sockets e bibliotecas específicas para trabalho em redes, desenvolver um pacote ROS para disponibilizar os dados recebidos através da interface de rede para os outros pacotes ROS do sistema robótico, além de um programa rodando no HPS do SoC para estabelecer esta comunicação entre a interface de rede da placa De10-nano e a aplicação sendo executada no FPGA. Já a aplicação que estará embarcada no FPGA contido no SoC deverá ser descrita por alguma linguagem de descrição de hardware, como por exemplo, verilog ou VHDL.

Todas essas etapas descritas anteriormente são necessárias para a construção completa do sistema proposto, o que torna o desenvolvimento da solução completa um desafio devido às diferentes ferramentas de software e hardware necessárias para sua conclusão. Tendo em vista este problema, a solução foi idealizada para conter o maior grau de modularidade possível, ou seja, cada uma dessas etapas será tratada com um projeto independente, apenas tendo cuidado para garantir a correta comunicação entre cada uma delas.

A grande vantagem que esse abordagem traz ao projeto é a possibilidade futura, de tanto a continuação do desenvolvimento como da manutenção do sistema, serem realizados por profissionais com background nas diferentes áreas envolvidas, sem a necessidade de se envolver no desenvolvimento de outros módulos. Sendo assim, um profissional especialista em descrição de hardware poderia se dedicar apenas à concepção da solução embarcada no FPGA, sem a necessidade possuir conhecimento em programação de redes.

4.1 Modelo cliente-servidor

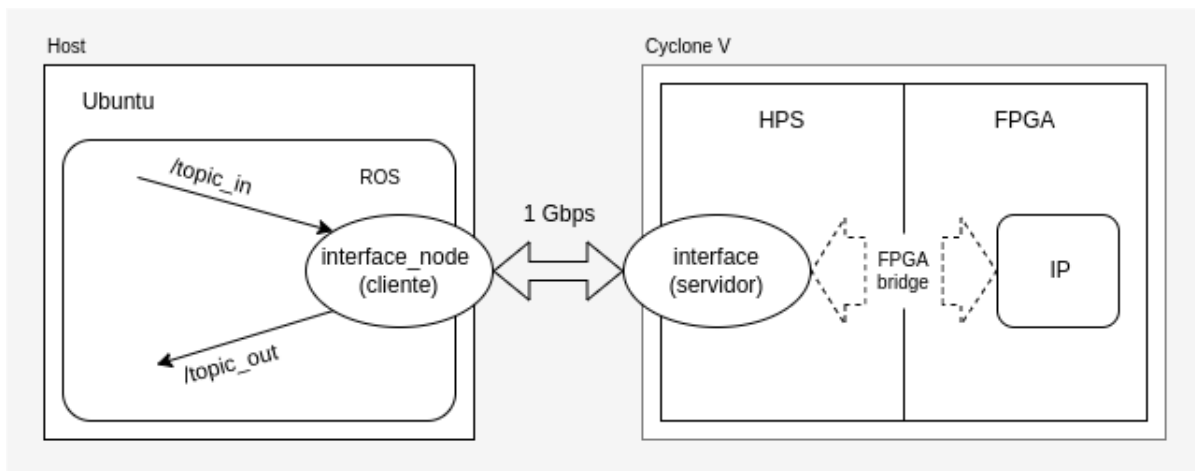
A comunicação entre o host, rodando o ROS, e a placa DE10-nano será estabelecida através de uma rede gigabit ethernet ponto a ponto, ou seja, o host e o SoC estarão conectados diretamente entre si. Desta maneira é possível obter o melhor desempenho da rede, alcançando as maiores taxas de transmissão de dados. Com o meio de comunicação definido é preciso definir também a arquitetura da comunicação, uma boa alternativa é o modelo cliente-servidor.

O modelo cliente-servidor é caracterizado por possuir uma estrutura que permite dividir o trabalho computacional entre os participantes da comunicação, isto é, entre o servidor, que é o encarregado de disponibilizar os recursos e serviços, e o cliente, que realiza as solicitações para os serviços disponíveis. Desta maneira tanto o cliente quanto

o servidor foram tratados como módulos independentes durante o desenvolvimento do trabalho. O uso do modelo cliente-servidor contribui de forma significativa para que o sistema alcance o máximo de modularização, essa abordagem facilita, entre outras coisas, a depuração e manutenção do código, o que proporciona mais agilidade e simplicidade no processo de desenvolvimento da solução.

Na Figura 1 podemos ter uma visão global do sistema, nela podemos ver cada etapa da comunicação. No lado do host, está instalado o ROS, nele também é onde o cliente será executado, assim sendo o cliente fica responsável por ler o tópico de entrada, fornecido por outro nó do sistema, realizar uma solicitação ao servidor enviando os dados já lidos. O servidor, por sua vez, aceita a solicitação do cliente, recebe os dados e os envia à aplicação embarcada no FPGA que os devolve após seu processamento. Para completar o ciclo o servidor retorna os dados processados ao cliente, que por sua vez, disponibiliza os dados já processados através do tópico de saída.

Figura 1 – Arquitetura geral



Fonte: do autor

4.2 Biblioteca de comunicação - libinterfacesocket

Para manter o padrão do desenvolvimentos dos códigos tanto do cliente quanto do servidor, foi desenvolvida uma classe, que fornece os métodos para a abertura da comunicação, além de métodos para envio e recebimento das mensagens através da rede gigabit ethernet. Essa classe foi desenvolvida como um módulo a parte e compilada como uma biblioteca estática, sendo assim, a partir do momento em que os métodos de comunicação estiverem testados e validado tanto o código do cliente quanto o do servidor poderão fazer uso desta biblioteca, eliminando assim a necessidade de reescrever uma parte do código código. Outra vantagem nessa abordagem é que ao manter o código desassociado

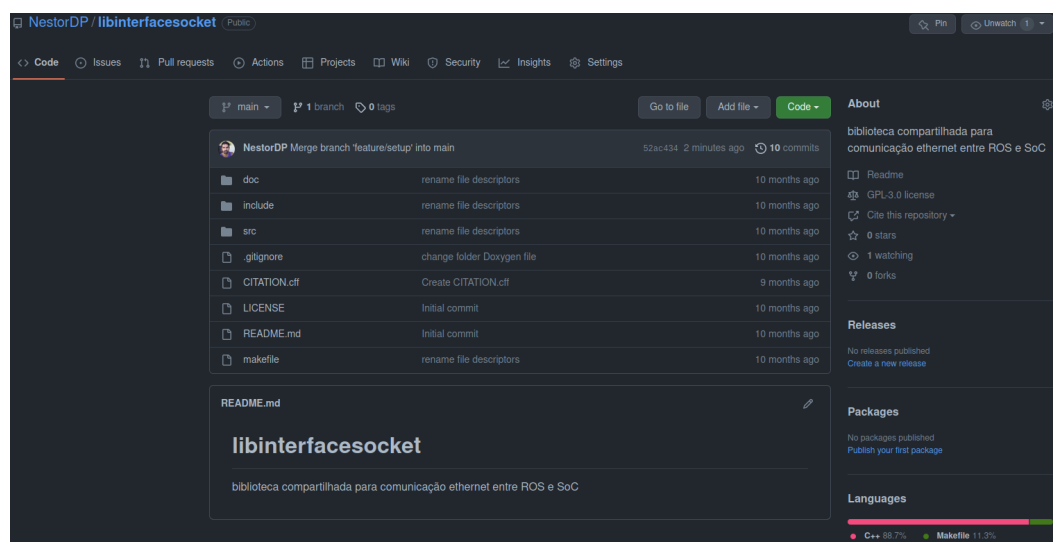
tanto do servidor como do cliente, nós possibilita fazer alterações ou correções de bugs, sem necessariamente realizar alterações nos códigos do servidor ou do cliente.

A programação da biblioteca foi realizada com base em sockets. Sockets são um caminho para conectar processos em uma rede de computadores. A conexão através de sockets entre nós em uma rede independe do protocolo. Um nó da rede ouve uma determinada porta para um IP específico esperando por o pedido de conexão do segundo nó, assim a conexão entre dois processos é estabelecida. O servidor é o nó que aguarda o pedido ser enviado pelo cliente.

A programação de sockets em C++ possibilita um alto nível de otimização da comunicação entre os processos, principalmente por se tratar de um modelo cliente-servidor onde só existirá a comunicação entre o servidor e apenas um cliente. Após implementar a comunicação entre o servidor e o cliente, poderá ser testadas novas técnicas de para otimizar o desempenho da rede possibilitando o aumento da taxa de transferência de dados entre o servidor e o cliente.

O código fonte da biblioteca pode ser encontrado no repositório no github (NETO, 2021a), que pode ser visto na figura 2, onde podemos observar a estrutura de arquivos da biblioteca. Vale frizar que, a libinterfacesocket possui um makefile para realizar o processo de compilação de forma automática. Assim podemos de forma simplificada compilar e instalar a biblioteca tanto no sistema do host onde será executado o cliente, quanto no sistema do HPS embarcado no SoC, onde o servidor estará rodando.

Figura 2 – Repositório libinterfacesocket



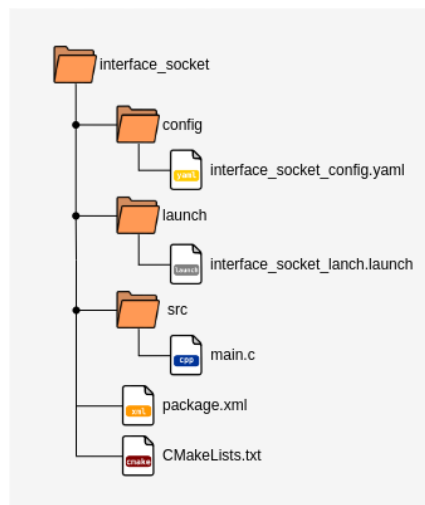
Fonte: do autor

5 Pacote ROS (cliente)

Como já foi mencionado anteriormente o cliente é um pacote ROS, sendo assim, deve-se levar em consideração, os conceitos de programação do framework ROS em seu desenvolvimento. As técnicas específicas de programação ROS usadas no cliente serão descritas com detalhes neste capítulo, além da explicação do seu funcionamento interno e do uso da `libinterfacesocket`.

No desenvolvimento de aplicações com ROS deve ser respeitada a estrutura de diretórios de um pacote ROS. Pacotes são a maneira com que os softwares são organizados no ROS, eles podem conter desde nós, que são as unidades de processamento do ROS, até mesmo bibliotecas ou módulos de softwares de terceiros. Os pacotes devem seguir uma estrutura padrão, por este motivo o código fonte do cliente foi organizado como é mostrado na Imagem 3 abaixo.

Figura 3 – Estrutura de diretórios pacote cliente



Fonte: do autor

A seguir será apresentada uma breve descrição de cada item do pacote:

config/interface_socket_config.yaml: Arquivo com o qual o usuário pode mudar alguns parâmetros de configuração da comunicação, como IP do servidor ou alguns outros parâmetros do tópico que será lido. Essa mudança pode ocorrer sem a necessidade de recompilar o código fonte, isso pode dar flexibilidade ao usuário do pacote durante o desenvolvimento de uma nova aplicação, que poderá ser configurada sem alterações no código fonte do nó.

launch/interface_socket.launch: Arquivo responsável chamar a execução do nó, além de carregar os parâmetros presentes no arquivo config.yaml no servidor de parâmetro

do ROS.

src/main.cpp: Código fonte do executável, ou seja, o código fonte do único nó deste pacote.

package.xml: Manifesto do pacote é o arquivo que define as propriedades do pacote, como por exemplo, nome do pacote, autor, e dependências. Deve estar presente em todos os pacotes ROS (ROS, 2019).

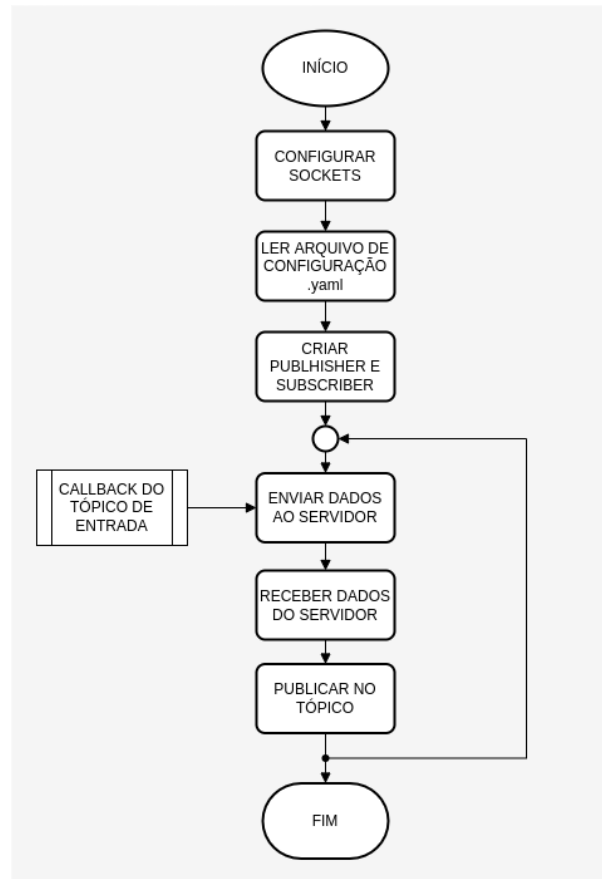
CmakeLists.txt: Contém instruções e diretivas para configuração do processo de compilação do pacote.

Este pacote disponibiliza apenas um executável, ou seja, apenas um nó que tem a finalidade de ler um tópico, enviar através da interface de rede os dados brutos contidos na mensagem do tópico de entrada, receber de volta esses dados processados pelo servidor, montar uma mensagem ROS e publicar essa mensagem através do tópico de saída. O processo descrito anteriormente é relativamente simples, como pode ser visto no fluxograma simplificado da Figura 4

Este pacote disponibiliza apenas um executável, ou seja, apenas um nó que tem a finalidade de ler um tópico, enviar através da interface de rede os dados brutos contidos na mensagem do tópico de entrada, receber de volta esses dados processados pelo servidor, montar uma mensagem ROS e publicar essa mensagem através do tópico de saída. O processo descrito anteriormente é relativamente simples, como pode ser visto no fluxograma simplificado da Figura 4

Existem alternativas prontas para fazê-lo, como por exemplo o ROS serial, pacote ROS desenvolvido para permitir comunicação entre o ROS e outros dispositivos que possuem uma porta serial ou uma interface de rede [8]. A escolha por desenvolver um novo pacote para executar a mesma função se fez necessário pela necessidade de alta taxa de transferência de dados entre o ROS e o SoC para que seja aceitável a utilização do SoC com a finalidade de acelerar o processamento por hardware. Desenvolvendo um novo pacote de comunicação podemos extrair o máximo de desempenho da rede, como por exemplo, escolhendo o melhor protocolo (UDP ou TCP) e transferindo apenas os dados para o processamento da informação. Todos os códigos do cliente podem ser encontrados no repositório disponível em [9].

Figura 4 – Fluxograma pacote cliente



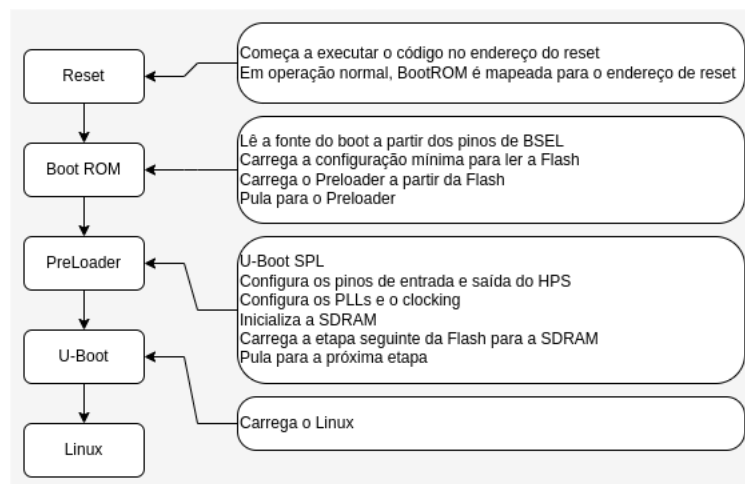
Fonte: do autor

6 Servidor

O servidor é o software embarcado no HPS do Soc. Ele é o responsável por gerenciar a comunicação entre a interface de rede por onde recebe os dados provenientes do pacote ROS (cliente) e o FPGA.

A primeira etapa a ser concluída no desenvolvimento do servidor é compilação de uma versão linux para processadores ARM que será instalada no kit de desenvolvimento. O fluxo de boot do linux na placa é resumido na Figura 5.

Figura 5 – Boot linux embarcado



Fonte: (ROCKETBOARDS.ORG, 2015)

O primeiro elemento de software é o *Boot ROM* que está gravado de fábrica internamente no dispositivo. Os arquivos de *PreLoader*, *U-boot* e do sistemas de arquivos do linux são salvos em um cartão de memória micro SD.

O *Secondary Program Loader - SPL*, conhecido como *PreLoader*, é executado a partir da Boot ROM. Ele é responsável por configurar o sistema para que o *bootloader* (U-boot) possa ser executado. A Intel fornece uma ferramenta chamada BSP editor que, a partir de arquivos que descrevem o hardware, podem gerar o PreLoader para o projeto específico (ROCKETBOARDS.ORG, 2015).

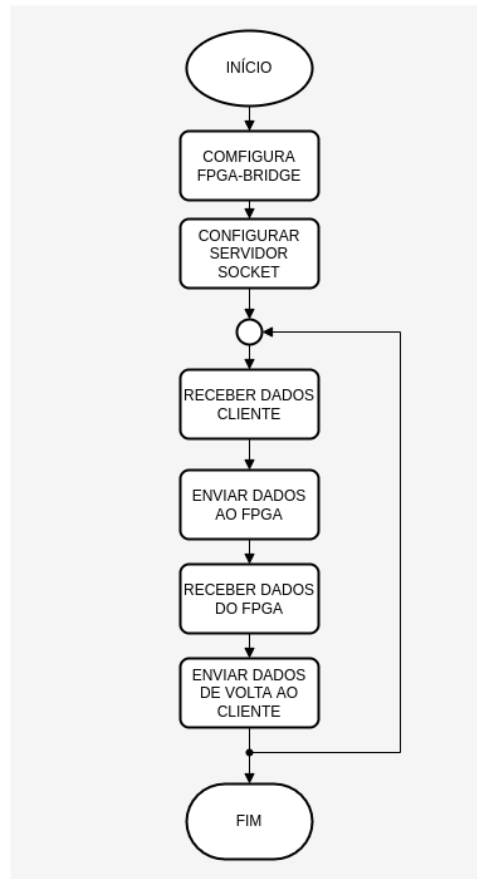
A etapa seguinte ao *PreLoader* é o *bootloader*. Nessa fase do boot todas as questões de baixo nível do SoC, como por exemplo, os clocks, pinos e SDRAM, já foram inicializados e estão prontos. O objetivo do bootloader, é obter essas informações do sistema e fazer com que ele funcione até o ponto onde o linux possa ser iniciado. Outra função importante do U-boot em um SoC Intel é programar o FPGA (ROCKETBOARDS.ORG, 2015).

Com todas as etapas do boot finalizadas o linux já estará sendo executado pelo

HPS e pronto para o desenvolvimento do servidor. Os códigos do servidor podem ser baixados a partir do repositório disponível na referência (NETO, 2021b). Após baixar a biblioteca de comunicação (NETO, 2021a) e executar sua compilação e instalação, os códigos do servidor poderão ser baixados e compilados. O Servidor mantém porta aberta para estabelecer uma conexão com o cliente e assim que a conexão é estabelecida, o cliente já pode começar a enviar os dados. Ao receber os dados do cliente, o servidor envia-os ao FPGA que os processa e os devolve ao servidor para que ele possa reenviar os dados já processados ao cliente. Um fluxograma simplificado desse processo pode ser visualizado na Figura 6.

O acesso do servidor ao FPGA é feito através de mapeamento de endereços do linux, os SoCs Intel possuem uma arquitetura de memória mapeada. Para facilitar essa tarefa a Intel possui uma ferramenta chamada de *sopc-create-header-files* integrada ao Quartus Prime (software de desenvolvimento para FPGAs Intel) que, através dos arquivos do projeto do sistema, consegue gerar um arquivo cabeçalho com todos os endereços para os periféricos relacionados ao FPGA. Portanto, o arquivo cabeçalho gerado disponibiliza o *offset* do endereço em que cada periférico está localizado, assim, o servidor pode enviar e/ou receber dados ao periférico conhecendo o endereço da FPGA-bridge em que este periférico está conectado.

Figura 6 – Fluxograma simplificado do servidor



Fonte:Elaborado pelo autor

Parte III

Resultados

7 Resultados Alcançados

8 Conclusão

O objetivo de estabelecer uma comunicação com alta taxa de transferência entre o framework de robótica ROS e um SoC com FPGA integrado foi alcançado, possibilitando o uso de aceleração por hardware de maneira mais ágil em projetos de robótica.

9 Estudos futuros

Por se tratar de um trabalho interdisciplinar que abrange áreas como programação de rede, compilação e configuração de linux embarcado, desenvolvimento com o ROS e com SoC, trabalhos futuros podem dar ênfase a alguma dessas áreas específicas, otimizando alguns pontos do projeto para se alcançar maiores taxas de transferência, tornar o sistema ainda mais genérico e fácil de ser usados por outros grupos de trabalho que tenham o interesse de adicionar processamento por hardware em seus projetos de robótica.

Referências

NETO, N. P. *Biblioteca projeto interfacesocket*. 2021. Disponível em: <<https://github.com/NestorDP/libinterfacesocket>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 32.

NETO, N. P. *interface_socket_server*. 2021. Disponível em: <https://github.com/NestorDP/interface_socket_server>. Citado na página 32.

ROCKETBOARDS.ORG. *Embedded Linux Beginners Guide*. 2015. Disponível em: <<https://rocketboards.org/foswiki/Documentation/EmbeddedLinuxBeginnerSGuide>>. Acesso em: 5 outubro 2021. Citado na página 31.

ROS. *catkin/package.xml*. 2019. Disponível em: <<http://wiki.ros.org/catkin/package.xml>>. Acesso em: 21 setembro 2021. Citado na página 28.