

Vitor Farias de Borba

**SISTEMA EMBARCADO PARA AUMENTO DA AUTONOMIA
DE PERFILÔMETRO A LASER APLICÁVEL AO INTERIOR
DE DUTOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Armando Albertazzi G. Jr., Dr. Eng.

Coorientador: Miguel Burg Demay, M.Sc

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

BORBA, Vitor Farias de
SISTEMA EMBARCADO PARA AUMENTO DA AUTONOMIA DE
PERFILÔMETRO A LASER APLICÁVEL AO INTERIOR DE DUTOS / Vitor
Farias de BORBA ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves
Júnior ; coorientador, Miguel Burg Demay. - Florianópolis,
SC, 2015.
124 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Sistema Embarcados. 3.
Processamento de imagens. 4. Perfilometria. I. Gonçalves
Júnior, Armando Albertazzi . II. Demay, Miguel Burg . III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Vitor Farias de Borba

**SISTEMA EMBARCADO PARA AUMENTO DA AUTONOMIA
DE PERFILÔMETRO A LASER APLICÁVEL AO INTERIOR
DE DUTOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.
Orientador

Miguel Burg Demay, M.Sc.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng. (Presidente)
Universidade Federal de Santa Catarina

Cesar Alberto Penz, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Alexandre Dias, Dr.Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a meus pais, José e Jacira, que me apoiaram em todos os momentos de minha vida, e, que me deram todo o suporte necessário à minha busca pelo conhecimento. Sem eles, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Armando Albertazzi G. Junior pela orientação e oportunidade de trabalhar neste projeto como seu orientando.

Ao MSc. Miguel Burg Demay, pela sua coorientação, por suas ideias e por sua disponibilidade.

Aos MSc. Pedro Buschinelli, João Melo e sua equipe pela colaboração e troca de informações durante o período de desenvolvimento do projeto.

Aos meus pais que de tudo fizeram para poder proporcionar a mim chances que eles não tiveram, e as minhas irmãs que sempre me apoiaram.

A minha namorada Amanda, por sua incansável paciência e incentivo durante os períodos onde permiti que o estresse e cansaço transpassassem.

Agradeço aos colegas de mestrado, Filipe Fontana, Gregory Chagas, Milena Victorette e Renato Machado por seu companheirismo, e por suas correções e colaborações durante o desenvolvimento deste trabalho. Aproveito para agradecer a contribuição dos colegas de laboratório Claudio Schmitz, Cícero Walendowsky e Mauro Benedet, que prestaram apoio nos momentos em que mais foi necessário.

Gostaria também de agradecer a Agência Nacional do Petróleo – ANP e a Petrobras, pelo apoio financeiro prestado por intermédio de seu Programa de Recursos Humanos para Formação de Engenheiros no Setor de Petróleo e Gás – PRH34, e ao apoio da empresa NVIDIA na forma de doações de *hardware*.

Por último, mas não menos importante, agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina e ao departamento de engenharia mecânica pela oportunidade de fazer parte de um programa como este e a todos os professores e servidores que tornaram possível a realização deste trabalho.

"A educação é a arma mais poderosa que temos
para mudar o mundo."
(Nelson Mandela)

RESUMO

É comum na indústria petrolífera a utilização de dutos para transporte de óleo e gás. Devido ao ambiente hostil em que operam, esses dutos estão sujeitos a avarias como corrosão e amassamentos. Com o objetivo de auxiliar na identificação dessas avarias, foi desenvolvido em trabalhos anteriores um sistema de perfilometria óptica que utiliza a triangulação cônica a laser e processamento de imagens para medir o perfil geométrico interno de dutos. Esse sistema de medição utiliza cabos para conectar o sensor a um computador, que processa as imagens e armazena os resultados das medições. A utilização de cabos restringe a autonomia de medição para aproximadamente cinquenta metros devido à perda de qualidade do sinal. Essa restrição limita o uso do perfilômetro a pequenos trechos do duto. Este trabalho avalia potenciais alternativas para o aumento da autonomia do perfilômetro, visando a inspeção de dutos de comprimento superior a novecentos metros. A pesquisa realizada indicou o uso de sistemas embarcados como a alternativa mais viável sem que haja o comprometimento das características metrológicas e funcionais do perfilômetro. Uma comparação entre as arquiteturas de sistemas embarcados revelou as possibilidades de (a) realizar o simples armazenamento das imagens, ou (b) o processamento embarcado através de soluções híbridas. As soluções foram desenvolvidas e analisadas experimentalmente para avaliar as características de consumo e desempenho. Esses testes apontaram o uso do sistema embarcado baseado na arquitetura *CPU+GPU* para processamento como a alternativa mais viável. Por fim, foram destacadas as modificações necessárias a esse sistema para futura implementação no perfilômetro a fim de dotá-lo da autonomia necessária para a aplicação em dutos de comprimento superior a novecentos metros.

Palavras-chave: Perfilômetro. Autonomia. Sistema embarcado. Armazenamento de imagens. Processamento de imagens.

ABSTRACT

The use of pipelines for oil and gas transportation is a common industry practice. Due to the hostile environment where they operate, these pipelines are subject to damages such as, corrosion and dents. An optical profilometer, which uses the conical triangulation combined with image processing, was previously developed to assess and quantify the amount of damages by measuring the inner geometry of pipelines. This measurement system uses cables to connect the sensor to a computer, which process the images, compute and saves the results. The use of cables restricts the measurement autonomy to fifty meters due to technical limitations. This restriction limits the use of the profilometer to small portions of the pipeline. This work evaluate potential alternatives to increase the profilometer autonomy, aiming the inspection of pipelines above nine hundred meters. The developed research pointed the use of embedded systems as the most viable alternative without degradation of the metrological and functional characteristics of the profilometer. A comparison between the embedded systems architectures revealed two possibilities: (a) save the images for later processing, or (b) embedded processing these images using hybrid devices. The solutions where developed and experimentally analyzed to evaluate the power consumption and performance characteristics. These tests indicated the use of an embedded system based on *CPU+GPU* architecture as the most viable alternative. To finalize, the necessary modifications for this system to future implantation in the profilometer where pointed.

Keywords: Profilometer. Autonomy. Embedded Systems. Image saving. Image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de medição da triangulação laser por folha de luz.	32
Figura 2 - Esquema de funcionamento do PEROLA - I.....	32
Figura 3 - Estrutura de comunicação do PEROLA-I.....	34
Figura 4 - PEROLA-I destacando a localização dos elementos principais.....	34
Figura 5 - Diagrama de processamento de imagem.....	35
Figura 6 - Esquema de retificação de uma imagem.....	36
Figura 7 - Imagem em análise.....	37
Figura 8 - Simulação do afastamento dos eixos no PEROLA-I.....	38
Figura 9 - Resultado da medição do PEROLA-I com uma irregularidade.....	38
Figura 10 - Reconstrução virtual 3D de um duto sob inspeção sem corrigir o desalinhamento entre os eixos do interferômetro e do duto. .	39
Figura 11 - Reconstrução virtual 3D de um duto no qual houve correção do desalinhamento entre os eixos do interferômetro e do duto.....	39
Figura 12 - Princípio de formação da região “cega”.....	40
Figura 13 - Medição planejada apresentando regiões de sombra.....	41
Figura 14 - Medição planejada apresentando regiões de sombra com medição em sentido inverso.....	41
Figura 15 - Combinação de medições planejadas de ambas as direções.....	41
Figura 16 - Protótipos desenvolvidos.....	42
Figura 17 - Diagrama geral do hardware de um sistema embarcado. ...	52
Figura 18 - Plataforma de desenvolvimento Jetson TK1.....	64
Figura 19 - Plataforma de desenvolvimento Helio.....	65
Figura 20 - Algoritmo do núcleo de aquisição de imagens.....	67
Figura 21 - Algoritmo do núcleo específico do sistema de armazenamento de imagens baseado em <i>ARM</i>	69
Figura 22 - Algoritmo executado pela porção <i>ARM</i> do sistema de processamento em <i>CPU+GPU</i>	71
Figura 23 - Algoritmo de processamento em <i>CUDA</i>	72
Figura 24 - Configuração do sistema atual.....	74
Figura 25 – Configuração básica dos sistemas desenvolvidos.....	74
Figura 26 - Gráfico dos resultados dos testes de armazenamento de imagens com <i>HDD</i>	82
Figura 27 - Gráfico de um teste de armazenamento com <i>HDD</i> e mil arquivos por pasta.....	83
Figura 28 - Gráfico de um teste de armazenamento com <i>HDD</i> e 25 mil imagens por pasta.....	83

Figura 29 - Gráfico de um teste de armazenamento com <i>HDD</i> e todas as imagens em uma pasta.....	84
Figura 30 - Gráfico dos resultados dos testes de armazenamento de imagens com <i>SSD</i>	86
Figura 31 - Gráfico de um teste de armazenamento com <i>SSD</i> e mil imagens por pasta.....	86
Figura 32 - Gráfico de um teste de armazenamento com <i>SSD</i> e 25 mil imagens por pasta.....	87
Figura 33 - Gráfico de um teste de armazenamento com <i>SSD</i> e todas as imagens em uma pasta.....	87
Figura 34 - Gráfico de uma das medições de processamento em <i>GPU</i> .	89
Figura 35 - Dispersão da velocidade de processamento em <i>GPU</i>	89
Figura 36 - Montagem do equipamento de testes.....	92
Figura 37 - Gráfico da corrente do sistema de armazenamento de imagens em temperatura ambiente.....	94
Figura 38 - Distribuição de probabilidade da corrente no sistema de armazenamento de imagens em temperatura ambiente.....	94
Figura 39 - Gráfico da corrente do sistema de processamento de imagens em temperatura ambiente.....	95
Figura 40 - Distribuição de probabilidade da corrente no sistema de processamento de imagens em temperatura ambiente.....	96
Figura 41 - Gráfico da corrente do sistema de armazenamento de imagens em ambiente aquecido.....	97
Figura 42 - Distribuição de probabilidade da corrente do sistema de armazenamento de imagens em ambiente aquecido.....	98
Figura 43 - Gráfico da corrente do sistema de processamento de imagens em ambiente aquecido.....	99
Figura 44 - Distribuição de probabilidade da corrente do sistema de processamento de imagens em ambiente aquecido.....	100
Figura 45 - Gráfico da corrente da câmera.....	100
Figura 46 - Distribuição de probabilidade da corrente da câmera.....	101
Figura 47 - Duto utilizado na avaliação do sistema de perfilômetria. .	109
Figura 48 - Perfil de testes.....	110
Figura 49 - Comparação de uma das medições do perfil de avaliação com o uso de computador.....	111
Figura 50 - Comparação de uma das medições do perfil de avaliação com o uso do sistema embarcado.....	111
Figura 51 - Geração de superfície através das medições.....	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações do projeto PEROLA-I.	43
Quadro 2 - Comparação das soluções estudadas.	49
Quadro 3 - Comparação entre as possíveis soluções compostas estudadas.	60
Quadro 4 - Resultados do teste de armazenamento para formatos sem perda.	80
Quadro 5 - Resultado dos testes de armazenamento com JPEG para diferentes qualidades de compressão.	80
Quadro 6 - Resultados dos testes de armazenamento de imagens com <i>HDD</i>	81
Quadro 7 - Resultados dos testes de armazenamento de imagens com <i>SSD</i>	85
Quadro 8 - Resultado do teste de velocidade de processamento em <i>GPU</i>	88
Quadro 9 - Equipamento utilizados nas medições de corrente.	93
Quadro 10 - Resumo das dados de corrente do sistema de armazenamento de imagens em temperatura ambiente.	93
Quadro 11 - Resumo dos dados de corrente do sistema de processamento de imagens em temperatura ambiente.	96
Quadro 12 - Resumo dos dados de corrente do sistema de armazenamento de imagens em ambiente aquecido.	97
Quadro 13 - Resumo dos dados de corrente do sistema de processamento de imagens em ambiente aquecido.	99
Quadro 14 - Resumo dos dados de corrente da câmera.	101
Quadro 15 - Resumo do atendimento aos requisitos.	106
Quadro 16 - Autonomia dos sistemas desenvolvidos.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μ C	Microcontrolador
ADC	<i>Analogic/digital converter</i>
ARM	<i>Advanced RISC machine</i>
ASIC	<i>Application specific integrated circuits</i>
BMP	<i>Device independent Bitmap</i>
CPU	<i>Central processing unit</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
DAC	<i>Digital/analogic converter</i>
DSP	<i>Digital signal processor</i>
FPGA	<i>Field programable gate array</i>
GigE	Gigabit ethernet
GPU	<i>Graphics processing unit</i>
HDD	<i>Hard disc drive</i>
HDMI	<i>High-definition multimedia interface</i>
JPEG	<i>Joint photographic experts group</i>
L4T	<i>Linux for tegra</i>
P&G	Petróleo e gás
PCIe	<i>Peripheral component interconnect express</i>
PEROLA	Perfilometria óptica a laser aplicada a dutos
PEROLA-I	Perfilômetro Óptico a Laser para inspeção Interna de Dutos
PIG	<i>Pipeline inspection gauge</i>
PNG	<i>Portable network graphics</i>
RAM	<i>Random access memory</i>
SATA	<i>Serial AT attachment</i>
SD	<i>Secure digital</i>
SoC	<i>System on chip</i>
SSD	<i>Solid state drive</i>
TIFF	<i>Tagged image file format</i>
USB	<i>Universal serial bus</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	27
1.1	Motivação	28
1.2	Objetivos	29
1.2.1	Objetivo Geral.....	29
1.2.2	Objetivos Específicos	29
1.3	Estrutura do trabalho.....	30
2	PEROLA-I.....	31
2.1	Princípio de funcionamento	31
2.2	Estrutura Mecânica e de comunicação.....	33
2.3	Processamento da imagem.....	34
2.4	Pós-processamento.....	37
2.5	Especificações.....	42
2.6	Limitações e requisitos.....	44
2.7	Análise de alternativas	45
2.7.1	Uso de repetidores	45
2.7.2	Transmissão sem fio	46
2.7.3	Uso de fibra óptica.....	47
2.7.4	Uso de sistemas embarcados.....	47
2.7.5	<i>Smart</i> Câmeras.....	48
2.8	Comparação entre as alternativas estudadas	48
3	Sistemas embarcados.....	51
3.1	Arquiteturas de sistemas embarcados	53
3.1.1	Microprocessadores	53
3.1.2	Digital Signal Processor (DSP).....	54
3.1.3	Field Programmable Gate Arrays (FPGA).....	54
3.1.4	Soluções compostas	55
3.2	Comparação das alternativas levantadas	56
4	Alternativas para o aumento de autonomia do PEROLA-I.....	63
4.1	Sistema de armazenamento de imagens baseado em arm	68
4.2	Sistema de processamento baseado em <i>CPU+GPU</i>	70
4.3	Sistema de processamento baseado em <i>CPU+FPGA</i>	73
4.4	Análise da influência dos sistemas desenvolvidos nos requisitos metrológicos.....	74
4.4.1	Sistema de armazenamento de imagens baseado em <i>ARM</i>	75
4.4.2	Sistema de processamento baseado em <i>CPU+GPU</i>	76
4.4.3	Sistema baseado em <i>CPU+FPGA</i>	76

5 Avaliação das alternativas.....	79
5.1 Testes de desempenho de armazenamento e processamento de imagens	79
5.1.1 Sistema de armazenamento de imagens baseado em <i>ARM</i>	79
5.1.2 Sistema de processamento baseado em <i>CPU+GPU</i>	88
5.1.3 Sistema de processamento baseado em <i>CPU+FPGA</i>	90
5.2 Testes de armazenamento e processamento de imagens em temperatura ambiente.....	91
5.2.1 Sistema de aquisição e armazenamento de imagens.....	93
5.2.2 Sistema de processamento baseado em <i>CPU+GPU</i>	95
5.3 Testes de armazenamento e processamento de imagens em ambiente aquecido.....	96
5.3.1 Sistema de aquisição e armazenamento de imagens.....	97
5.3.2 Sistema de processamento baseado em <i>CPU+GPU</i>	98
6 Análise dos sistemas.....	103
6.1 Alterações para implantação	103
6.1.1 Sistema de aquisição de imagens	103
6.1.2 Sistema de processamento de imagens baseado em <i>CPU+GPU</i>	104
6.1.3 Sistema de processamento de imagens baseado em <i>CPU+FPGA</i>	104
6.2 Análise comparativa dos sistemas desenvolvidos	105
6.3 Comparação dos resultados do sistema desenvolvido frente à solução atual.....	109
7 Conclusões	115
7.1 Dos sistemas embarcados desenvolvidos	115
7.2 Das comparações entre os sistemas desenvolvidos.....	116
7.3 Sugestões para trabalhos futuros.....	116
Referências.....	119

1 INTRODUÇÃO

A utilização de dutos no transporte de insumos propicia o abastecimento constante e previsível, possibilitando o deslocamento seguro de grandes quantidades de produtos, diminuindo o tráfego de cargas perigosas por caminhões, trens ou navios e, conseqüentemente, reduzindo os riscos de acidentes ambientais e a geração de poluentes no processo de transporte (SHELL, 2014; CEPA, 2014). Além disso, a utilização de dutos (CEPA, 2014):

- permite dispensar o armazenamento do insumo;
- simplifica carga e descarga;
- reduz custos de transportes;
- reduz a possibilidade de perdas ou roubos;
- possui baixo consumo de energia e baixos custos operacionais.

O estado de conservação de dutos é uma grande preocupação em vários setores da indústria. Os danos ambientais e o desperdício de recursos advindos de vazamentos são extremamente nocivos às empresas transportadoras, tanto financeira como estrategicamente. Assim, a manutenção preventiva e a eventual substituição de dutos é tarefa de grande importância para a indústria, independente de seu campo de atuação. Tal preocupação é ainda maior na indústria de petróleo e gás (P&G) (CORDELL; VANZANT, 2003).

Entre os diversos fatores que podem provocar danos e rompimentos de dutos, os mais relevantes são: corrosão, amassamentos, defeitos de soldagem e movimentações do solo.

A corrosão interna, causada por agentes orgânicos, químicos e eletroquímicos, pode ser acelerada pelo fluido transportado. Em dutos condutores de petróleo, juntamente com esse insumo, são transportadas pequenas frações de água salgada e bactérias. Em refinarias, o óleo é transportado a temperaturas elevadas, potencializando os efeitos da corrosão.

Amassamentos são provocados por máquinas de escavação e perfuração, além de causas naturais, como deslizamentos de terra e rochas, sendo responsáveis pela fragilização da parede de dutos por meio da formação de pontos de concentração de tensões, além de prejudicar o transporte do fluido.

Os defeitos de soldagem constituem-se também em pontos concentradores de tensões, deixando o duto mais frágil e suscetível a rompimentos (ELLENBERGER, 2010; CORDELL; VANZANT, 2003).

Para garantir a segurança e a eficiência da rede de dutos, a inspeção da superfície interna destes é realizada de forma periódica, em intervalos que dependem do ambiente e do fluido transportado. Essa avaliação comumente emprega *PIG*¹ de diferentes princípios: magnéticos, mecânicos ou de ultrassom (CORDELL; VANZANT, 2003).

Entretanto, existem situações em que se deseja realizar a inspeção de dutos com riqueza de detalhes, às quais a maioria dos métodos de inspeção empregados em *PIG* hoje disponíveis na indústria não são suficientes.

Nesse sentido, foi desenvolvido, em parceria entre LABMETRO e Petrobrás, uma família de *PIG* ópticos para avaliação da superfície interna de dutos, o qual foi denominado Perfilômetro Óptico a Laser para inspeção Interna de Dutos (PEROLA-I). Embora sua utilização somente seja possível em dutos previamente limpos e sem a presença de óleo, os resultados obtidos mostram-se promissores (BUSCHINELLI *et al.*, 2012a; BUSCHINELLI; ALBERTAZZI JUNIOR; FANTIN, 2007; BUSCHINELLI, 2007).

1.1 MOTIVAÇÃO

Atualmente, o perfilômetro se encontra em fase de aperfeiçoamento. Estão sendo realizados testes em campo com objetivo de identificar os principais requisitos para futuras melhorias.

Um dos requisitos identificados através dessas medições é a autonomia, a qual é limitada pela necessidade de conexão física por cabos com um computador, uma vez que todo o processamento da imagem é executado externamente.

¹ *PIG* são sistemas inseridos em dutos, que se deslocam por seu interior. São empregados tanto para limpeza como para inspeção. Esses últimos são sistemas de medição especializados para a identificação de defeitos em tubulações. Existem algumas especulações sobre a origem do nome *PIG*, incluindo os ruídos gerados por *PIG* de limpeza ao se deslocar no duto, bem como de sua aparência ao final do procedimento, ambos se assemelhando a um “porco”, que é a tradução para o português da palavra inglesa “*pig*”. Atualmente pode ser utilizado como acrônimo da expressão “*Pipeline Inspection Gauge*” (medidor para inspeção de dutos, em tradução livre do autor) (CORDELL; VANZANT, 2003).

Cabos longos trazem diversos problemas, seja pelo manuseio dificultado ou por problemas de interferência e atenuação do sinal. Além disso, existem limitações referentes à distância máxima permitida pelo barramento utilizado na transmissão de dados.

A demanda pela utilização do sistema de perfilometria em um *riser*² de novecentos metros de comprimento levou ao aparecimento de um problema a ser resolvido por este projeto: o aumento da autonomia do sistema.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Visando a continuidade do desenvolvimento do projeto PEROLA, este trabalho tem como objetivo geral identificar, desenvolver e validar uma solução capaz de, com o mínimo de alteração das características metrológicas e funcionais, dotar o sistema PEROLA-I de autonomia superior a novecentos metros.

1.2.2 Objetivos Específicos

Tendo em vista o objetivo geral deste trabalho, e levando em conta os trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento na época desta dissertação, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- realizar levantamento de alternativas para a resolução do problema proposto;
- definir a(s) alternativa(s) mais adequada(s);
- desenvolver a(s) alternativa(s) mais adequada(s);
- validar a(s) alternativa(s) escolhida(s);
- recomendar a melhor alternativa para a continuidade do projeto.

Não é objetivo deste trabalho a implementação de uma solução final, sendo assim, não fazem parte do escopo o desenvolvimento: de circuitos eletrônicos, de interface com o usuário, do sistema de

² No contexto aqui empregado, um *riser* pode ser considerado um duto de elevação, utilizado na extração de gás natural e petróleo em plataformas distantes da costa marítima.

alimentação e de características não pertinentes ao desempenho geral do sistema.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está subdividido em sete capítulos, descritos brevemente a seguir.

O capítulo 2 descreve o perfilômetro, objeto de estudo deste trabalho. Descreve também as possíveis tecnologias a serem empregadas na resolução do problema proposto e as analisa de acordo com os requisitos do projeto.

No capítulo 3 é apresentado o conceito de sistemas embarcados e as principais tecnologias empregadas no tratamento de imagens. É também realizada uma comparação dessas tecnologias para determinação das soluções que possuem maior potencial para a aplicação desejada.

O capítulo 4 apresenta os sistemas desenvolvidos, e analisa de forma sucinta a influência de cada um desses nos aspectos metrológicos e de tempo real do perfilômetro.

Os testes de validação e seus resultados são expostos no capítulo 5, em que são realizados testes de desempenho e operação a diferentes temperaturas, enquanto o consumo foi avaliado.

A análise das alterações a serem feitas para implantação dos sistemas desenvolvidos é realizada no capítulo 6. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 PEROLA-I

Os *benchmarks* realizados por Buschinelli (2007) e por Melo (2012) demonstram que existem no mercado diversas opções de *PIG* utilizados para inspeção de defeitos internos em dutos de P&G, sendo a maioria destes voltados à medição de espessura remanescente do duto através de ultrassom e fluxo magnético.

A necessidade de medição do perfil do duto com elevado nível de detalhamento levou Buschinelli (2007) a desenvolver um sensor baseado no princípio óptico da triangulação laser por folha de luz.

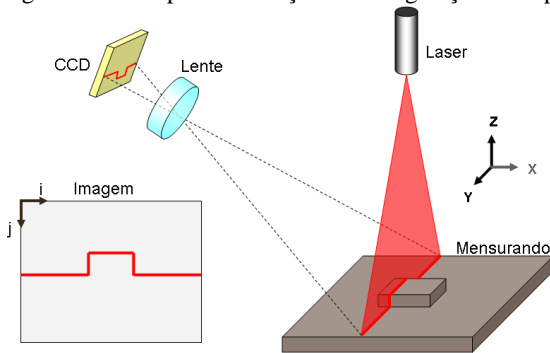
O sensor desenvolvido atraiu interesse da indústria e deu origem em 2009 a uma parceria entre Labmetro e Petrobras no sentido de desenvolver: (a) um sistema capaz de medir o perfil interno de dutos, (b) um sistema capaz de medir o perfil externo e (c) um software de avaliação das medições geradas por ambos os sistemas. O projeto de pesquisa resultante dessa parceria foi batizado como: **PER**filometria **Ó**ptica a **L**Aser aplicada a dutos (PEROLA). Somente o sistema utilizado na medição de perfis internos é abordado neste trabalho.

Por fazer uso de princípios ópticos, o uso do PEROLA-I se restringe a situações de parada e onde já ocorreu a limpeza prévia dos dutos (BUSCHINELLI, 2007). Neste trabalho, o termo “perfilômetro” é preferido em lugar de *PIG* para destacar a medição do perfil geométrico interno do duto com elevada resolução.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A triangulação laser por folha de luz é um princípio óptico que utiliza uma câmera posicionada de forma a captar a projeção de uma folha de luz sobre o plano a ser medido. Através de equações trigonométricas e do uso da calibração aplicadas às imagens obtidas, é possível identificar o perfil da superfície atingida por essa folha de luz, conforme pode ser observado na figura 1 (KENNEDY, 2015).

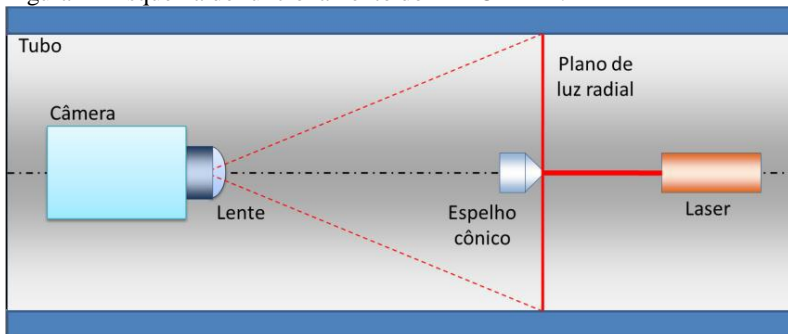
Figura 1 - Princípio de medição da triangulação laser por folha de luz.



Fonte: Buschinelli(2007).

Na triangulação cônica a laser, método óptico de medição adotado no PEROLA-I, o laser incide sobre a ponta de um espelho cônico de semiângulo³ de 45°, gerando um plano de luz radial e perpendicular ao feixe original, que intercepta a superfície interna de uma seção do duto, gerando uma linha brilhante. A câmera, estrategicamente posicionada e com o auxílio de uma lente grande angular, é capaz de registrar os 360° de uma seção do duto em uma única imagem. Esse princípio é exemplificado através da figura 2.

Figura 2 - Esquema de funcionamento do PEROLA - I.



Fonte: Buschinelli *et al.*(2012).

³ O termo semiângulo é utilizado para definir a metade de um ângulo, neste caso em particular, é utilizado para definir o ângulo entre a superfície e o eixo do cone.

A imagem obtida é enviada ao computador. Através do processamento das imagens obtêm-se vetores indicadores da distância radial entre o eixo óptico do sistema e a superfície do duto que compõe o perfil de uma seção reta do duto. Em particular, o protótipo desenvolvido discretiza a seção com passo angular de $0,25^\circ$, resultando em um conjunto de 1440 valores de raios por seção (BUSCHINELLI *et al.*, 2012b).

Para obter o perfil tridimensional do duto medido é preciso movimentar o sistema, para que inúmeras seções sejam adquiridas e as imagens processadas. O deslocamento longitudinal é realizado por auxílio mecânico externo ou ação da gravidade

2.2 ESTRUTURA MECÂNICA E DE COMUNICAÇÃO

O princípio de funcionamento do perfilômetro considera que o eixo do sistema e o eixo do duto são coincidentes e alinhados, para isso foi desenvolvida uma solução autocentrante baseada em dois trens de roda, um em cada ponta do corpo do perfilômetro. Esses trens de roda foram inspirados no mecanismo dos guarda-chuvas, possuindo molas que forcem a aberturam dos braços de roda e fazem com que o sistema permaneça centrado.

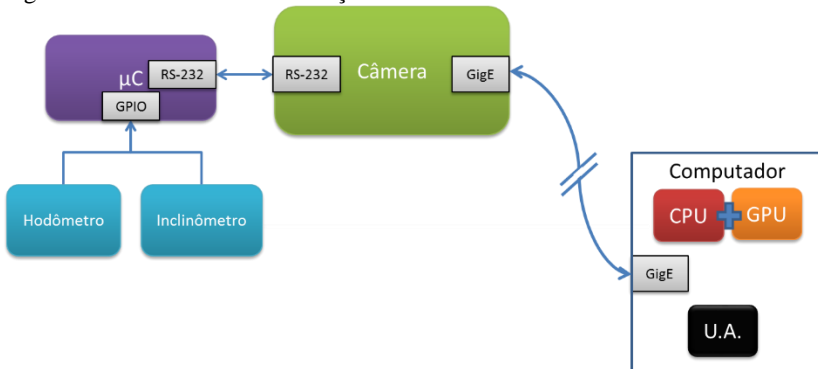
O deslocamento longitudinal do perfilômetro é medido por um hodômetro em contato com a superfície do duto (um encoder acoplado a uma roda). Durante a movimentação um inclinômetro é usado para medir uma eventual rotação do perfilômetro em torno do próprio eixo para que correções possam ser aplicadas.

Na figura 3 é apresentada a estrutura de comunicação do sistema de medição como um todo, neste diagrama é possível observar que para que as informações obtidas pelo sistema de referência (hodômetro e inclinômetro) cheguem ao computador é preciso utilizar a câmera como interface de comunicação.

As informações fornecidas pelo sistema de referência são registradas por um microcontrolador (μC) que calcula a distância percorrida e, ao atingir incrementos de distância de aquisição pré-definida pelo usuário⁴, aciona a câmera e registra na sua memória os valores de distância e inclinação do perfilômetro a serem lidos pelo computador (BUSCHINELLI, 2007). Esta configuração é utilizada para reduzir o número de conexões de longa distância.

⁴ No projeto PEROLA – I, a distância entre as medições pode ser configurada, sendo o mais usado 1,0 mm.

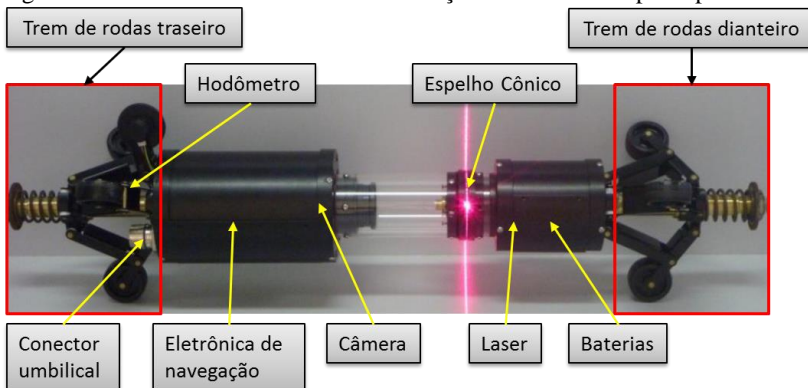
Figura 3 - Estrutura de comunicação do PEROLA-I.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

A figura 4 apresenta a disposição dos principais elementos na estrutura mecânica do PEROLA-I.

Figura 4 - PEROLA-I destacando a localização dos elementos principais.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

2.3 PROCESSAMENTO DA IMAGEM

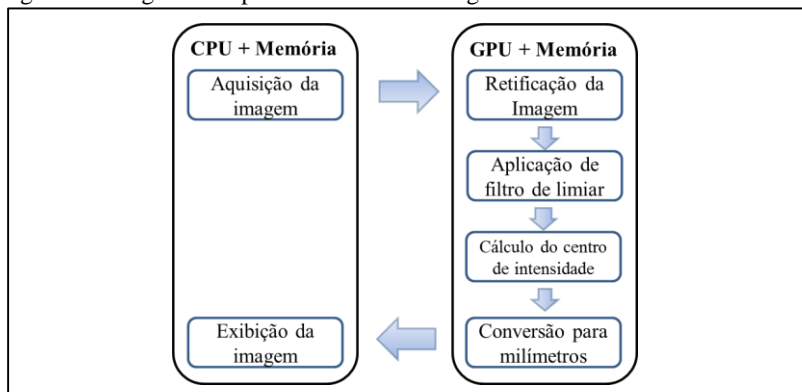
Para utilização da taxa de aquisição de imagens de 45 Hz (45 quadros por segundo), valor determinado pela especificação do projeto, foi estipulado que o sistema deve ser capaz de lidar com pelo menos 50 Hz, considerando suficiente a margem de segurança de 5 Hz.

Para isso, todo o ciclo de aquisição, transferência e processamento ou armazenamento da imagem deve ocorrer dentro de 20 ms.

Segundo os testes realizados por Buschinelli *et al.* (2012b), os processadores de uso comum disponíveis durante sua pesquisa não foram capazes de realizar o processamento a 50 Hz. Por esse motivo, o processamento das imagens foi designado a uma unidade de processamento gráfico (*GPU*), a qual permite a implementação de processamento paralelo em larga escala para determinadas situações.

No tratamento da imagem para obtenção dos vetores de medição, as etapas de aquisição e exibição da imagem são executadas por uma unidade de processamento central (*CPU*) de uso comum, e representam apenas uma pequena parte do processamento executado, sendo o restante exercido pela *GPU*, como pode ser observado na figura 4.

Figura 5 - Diagrama de processamento de imagem.



Fonte: Traduzido pelo autor a partir de Buschinelli *et al.* (2012b).

As etapas de processamento de imagem em *GPU* foram implementadas em *CUDA*⁵ (MELO, 2012; BUSCHINELLI *et al.*, 2012b).

A etapa de aquisição é centrada no recebimento da imagem e disponibilização da mesma para processamento em *GPU*.

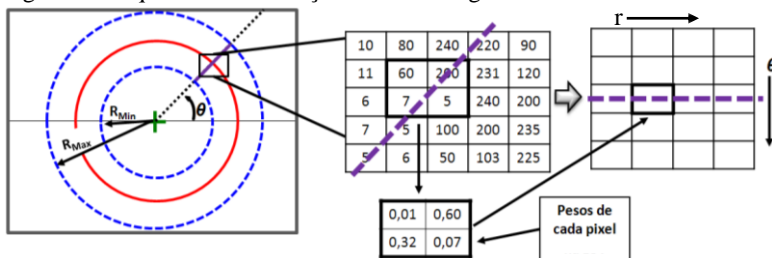
⁵*Compute Unified Device Architecture (CUDA)* é uma plataforma de computação paralela e um modelo de programação desenvolvidos pela NVIDIA. A sua utilização permite aumento significativo de desempenho computacional, ao aproveitar o poder de processamento paralelo da *GPU* (NVIDIA, 2014b).

O objetivo da retificação é transformar a imagem cartesiana em coordenadas polares que podem ser mais facilmente processadas utilizando computação paralela. Na imagem retificada cada linha representa um ângulo polar e cada coluna um valor de raio. Assim, a imagem pode ser processada de forma paralela para encontrar valores de raio em cada ângulo.

O valor de cada pixel na imagem retificada é obtido através de mapeamento geométrico. Quando as coordenadas calculadas na imagem original não são números inteiros, a interpolação bilinear é aplicada aos quatro pixels vizinhos que contribuem para compor o novo pixel na imagem de destino.

A figura 6 apresenta de forma gráfica e simplificada o processo de retificação.

Figura 6 - Esquema de retificação de uma imagem.



Fonte: Desenvolvida pela equipe do PEROLA.

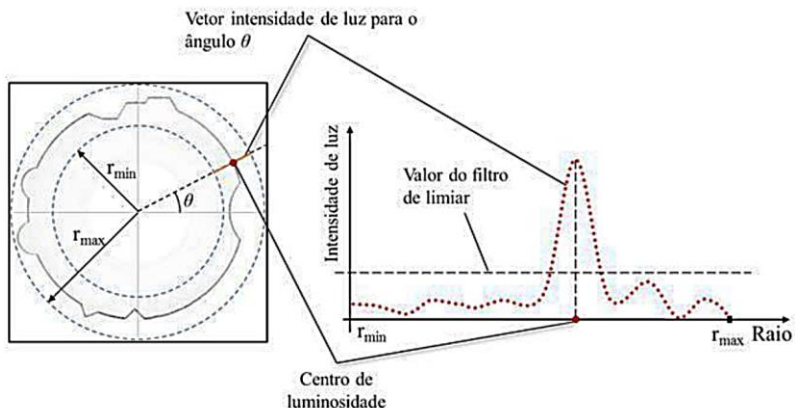
Tendo em vista a otimização do sistema, esse processo só é executado em uma área delimitada pelos raios mínimo (R_{Min}) e máximo (R_{Max}) da região de busca, como pode-se observar na figura 6.

O filtro de limiar é um filtro adaptativo ou fixo aplicado à imagem retificada, com o objetivo de remover pixels que têm intensidade luminosa muito baixa. Na figura 7, em que o gráfico presente representa a variação de intensidade luminosa ao longo do raio para um mesmo valor de ângulo, é possível observar seu funcionamento, em que, após calculado o limiar a ser utilizado, todos os valores abaixo deste são transformados em zero para que não degradem o cálculo do centro de luminosidade.

Na detecção do centro de luminosidade da imagem, os valores de intensidade de cada pixel são utilizados considerando sua posição na linha da matriz retificada. Por meio da "equação do centro de massa unidimensional" é possível encontrar o centro de massa de cada linha. A

posição do centro de luminosidade ou “centro de massa” é considerado como o valor do raio para o ângulo desejado (MELO, 2012).

Figura 7 - Imagem em análise.



Fonte: Buschinelli *et al.* (2012a).

Finalizando o processamento da imagem, a conversão de pixels para milímetros é realizada através de um polinômio de terceira ordem obtido por meio da calibração prévia, que relaciona o raio em pixels com o raio em coordenadas reais em milímetros (BUSCHNELLI *et al.*, 2012a).

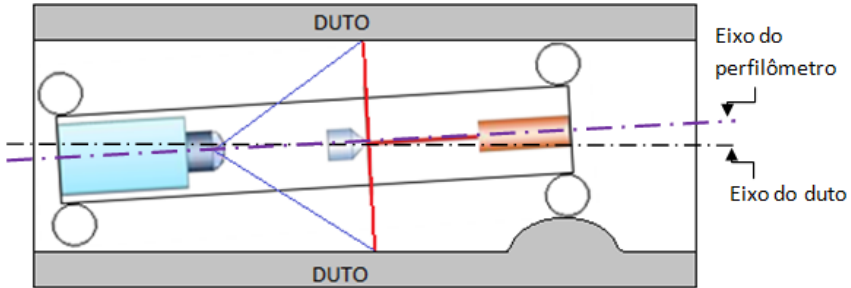
O resultado do processamento retorna a CPU que permite o armazenamento ou exibição em tela.

2.4 PÓS-PROCESSAMENTO

Uma vez que o princípio de medição pressupõe o alinhamento entre o eixo do sistema com o eixo do duto, o afastamento desta condição dá origem a erros de medição. Essa limitação é especialmente observável quando um dos trens de roda passa sobre um defeito acentuado, causando o deslocamento do centro óptico do sistema e o desalinhamento entre os dois eixos, resultando na geração de falsas informações sobre a geometria local. Essas falsas informações foram denominadas “artefatos”.

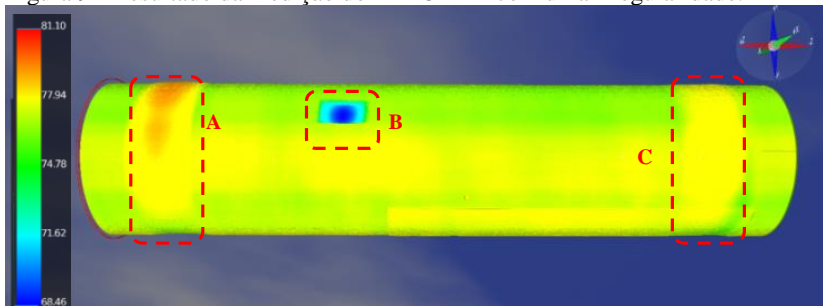
É possível observar na figura 8 o deslocamento do eixo do perfilômetro ao passar pelo duto e na figura 9 os artefatos A e C gerados quando os trens de roda frontal e traseiro, respectivamente, passam sobre o defeito real B (VICTORETTE, 2014).

Figura 8 - Simulação do afastamento dos eixos no PEROLA-I.



Fonte: Victorette (2014).

Figura 9 - Resultado da medição do PEROLA-I com uma irregularidade.

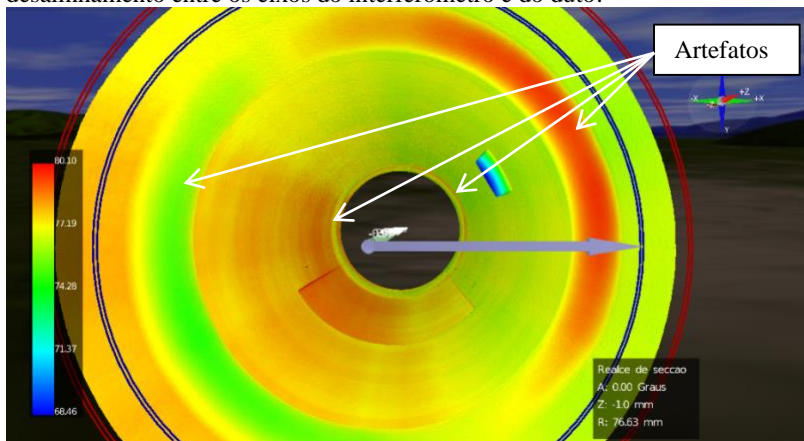


Fonte: Victorette (2014).

O algoritmo de pós-processamento desenvolvido por Victorette (2014) é capaz de reduzir os efeitos do desalinhamento do eixo do PEROLA-I em relação ao duto, reduzindo a geração de artefatos de forma satisfatória.

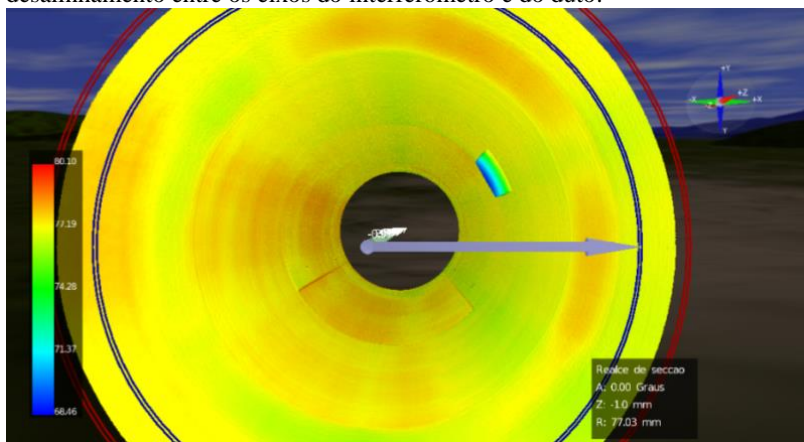
A figura 10 mostra a nuvem de pontos resultante da medição de um trecho de duto sem a mencionada correção. A figura 11 mostra o mesmo trecho medido com a aplicação da correção. Comparando essas duas figuras é possível notar a sensível redução de artefatos.

Figura 10 - Reconstrução virtual 3D de um duto sob inspeção sem corrigir o desalinhamento entre os eixos do interferômetro e do duto.



Fonte: Victorette (2014).

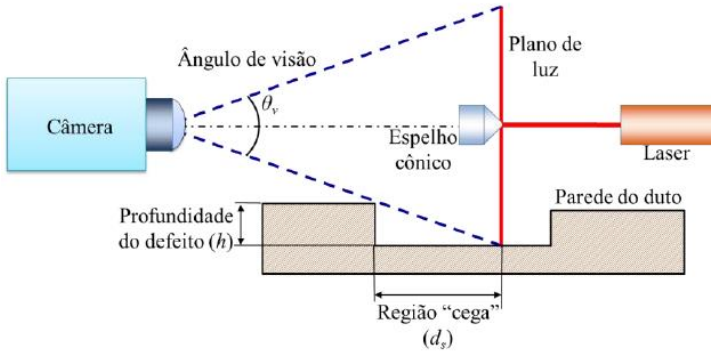
Figura 11 - Reconstrução virtual 3D de um duto no qual houve correção do desalinhamento entre os eixos do interferômetro e do duto.



Fonte: Victorette (2014).

A presença de defeitos com paredes íngremes pode fazer com que regiões do mensurando não sejam medidas; a essas regiões foi dado o nome de áreas de sombra ou regiões “cegas”. A figura 12 mostra como se formam essas regiões “cegas”.

Figura 12 - Princípio de formação da região “cega”.



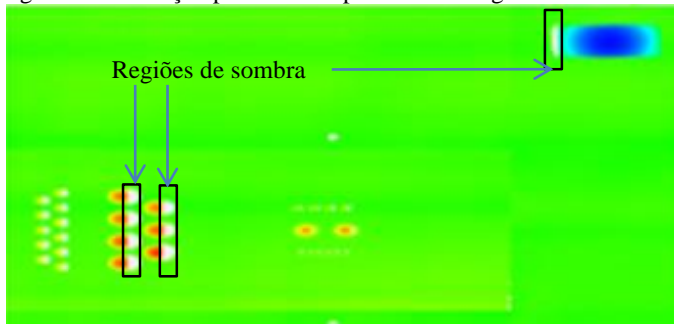
Fonte: Buschinelli *et al.* (2012a).

Essa condição extrema se apresenta muito raramente em dutos reais. Para minimizar este efeito, atualmente podem ser combinadas medições bidirecionais, isto é, uma vez em cada sentido, o que resulta em uma medição com um índice ainda menor de ocorrência das zonas de sombra.

A figura 13 apresenta a medição planejada de um duto com defeitos artificiais de grande intensidade apresentando áreas de sombra, representadas na figura na cor branca. A figura 14 apresenta o mesmo duto sendo medido na direção oposta, onde é possível ver que a geração de áreas de sombra se dá em uma região diferente da anterior, tornando possível que a combinação das imagens reduza a aparição dessas regiões como pode ser observado na figura 15.

A desvantagem da utilização desta estratégia é a necessidade de realizar medições nos dois sentidos, dobrando o tempo e recursos necessários para a medição.

Figura 13 - Medição planejada apresentando regiões de sombra.



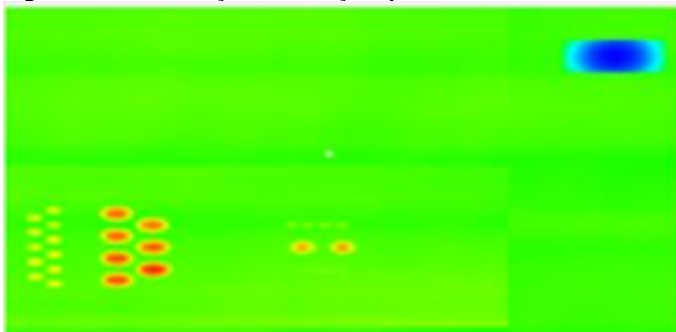
Fonte: Desenvolvida pela equipe do PEROLA.

Figura 14 - Medição planejada apresentando regiões de sombra com medição em sentido inverso.



Fonte: Desenvolvida pela equipe do PEROLA.

Figura 15 - Combinação de medições planejadas de ambas as direções.

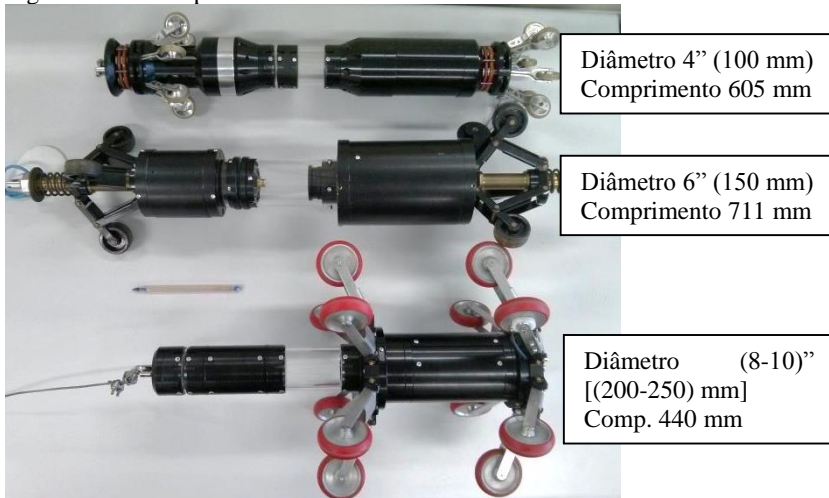


Fonte: Desenvolvida pela equipe do PEROLA.

2.5 ESPECIFICAÇÕES

O projeto PEROLA-I atualmente dispõe de protótipos para medição de dutos com diâmetros de 4”⁶ (100 mm), 6” (150 mm) e (8 a 10)” [(200 a 250) mm], os quais podem ser observados na figura 16.

Figura 16 - Protótipos desenvolvidos.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

O quadro 1 apresenta um resumo das especificações dos protótipos. Nesse quadro, o comprimento máximo do cordão umbilical refere-se ao comprimento máximo de cabo de comunicação testado. Esta é atualmente a característica restritiva à autonomia do perfilômetro.

A velocidade máxima de inspeção é intimamente ligada à resolução longitudinal e à frequência de aquisição da câmera, a redução desta reduziria a necessidade de processamento e de transmissão de dados.

⁶ Embora a polegada não seja uma unidade do Sistema Internacional, são empregadas neste trabalho por serem utilizadas como especificação de dutos.

Quadro 1 - Especificações do projeto PEROLA-I.

Item \ Nome	PEROLA-I 4"	PEROLA-I 6"	PEROLA-I 8-10"
Resolução da câmera utilizada [pixels]	1024x1024	1024x1024	1024x1024
Diâmetro mínimo de passagem [mm]	85 (3,3")	134 (5,3")	140 (5,5")
Faixa de diâmetro (medição) [mm]	88 a 132 (3,5" a 5,2")	128 a 176 (5,0" a 6,9")	140 a 300 (5,5" a 11,8")
Comprimento máx. (umbilical) [m]	50	50	50
Incerteza radial do sensor laser [mm]	±0,2	±0,3	±0,5
Resol. angular [°]	0,25	0,25	0,25
Resolução longitudinal [mm]	Mín.: 0,15 Típico: 1,0	Mín.: 0,2 Típico: 1,0	Mín.: 0,3 Típico: 1,0
Incerteza longitudinal (na resol. long. de 1,0 mm) [mm]	0,1%	0,2%	0,1%
Velocidade (depende da resol.long.)[mm/s]	45*(Resol. Long.)	45*(Resol. Long.)	90*(Resol. Long.)
Velocidade máxima[mm/s]	300 mm/s	150 mm/s	300 mm/s
Raio de curvatura mínimo (passagem) [m]	8,0	1,5	8": 0,6 10": 0,5
Raio de curvatura mínimo (medindo) [m]	8,0	2,5	8": 2,0 10": 1,5
Comprimento [mm]	605	711	440
Massa [kg]	3,0	3,5	4,5

Fonte: Desenvolvido pela equipe do PEROLA.

O sistema de medição para dutos de 4" apresenta os piores resultados em relação ao raio de curvatura para passagem do equipamento e para medição, mesmo sem ser o maior dos protótipos. Isso ocorre por ser o protótipo em que o trem de rodas possui menor capacidade de variação de seu diâmetro, dificultando a passagem do perfilômetro ao longo de curvas.

A incerteza radial do sensor deve ser utilizada para comparação com os desvios causados pela solução a ser desenvolvida. Qualquer incerteza inserida ao processo deve ser considerada desprezível em relação a esta.

Os diâmetros mínimos de passagem e as faixas de diâmetros que possibilitam medição são relativos ao diâmetro nominal do duto que pode ser medido com o uso do protótipo escolhido.

2.6 LIMITAÇÕES E REQUISITOS

Todos os protótipos necessitam que a tubulação esteja limpa e seca. Na presença de detritos, os mesmos serão medidos como parte da tubulação.

O principal ganho buscado no projeto nessa fase é o aumento substancial da autonomia de medição do sistema. Entretanto, o sistema a ser desenvolvido deve ser avaliado em relação a:

- potencial de autonomia – como já foi mencionado anteriormente, o elemento motivador dessa demanda foi a necessidade de medição de um *riser* de novecentos metros de comprimento. Entretanto, deseja-se ultrapassar este limite e aumentar a autonomia de forma que dutos ainda maiores possam ser medidos;
- velocidade de comunicação - em um primeiro momento tem-se como requisito o tratamento de cinquenta imagens por segundo, considerando a resolução de (1024 x 1024) pixels e representação em 8 bpp (bits por pixel), ambas características da imagem produzida pela câmera utilizada, a velocidade de transmissão mínima necessária será de 410 Mb/s;
- compatibilidade - a solução desenvolvida deve proporcionar compatibilidade com o *hardware* e os *softwares* já desenvolvidos;
- facilidade de utilização - a utilização do sistema deve ser o menos complexa possível;
- número e tamanho de elementos - o perfilômetro poderá ser requisitado para avaliação de dutos em ambientes fechados ou em plataformas *off-shore*. Em ambas situações é ideal que o sistema apresente poucos elementos necessários ao seu funcionamento e que o tamanho e massa desses elementos seja reduzido, facilitando por exemplo, seu transporte em helicópteros e alocação nos ambientes fechados;
- custo - a solução desenvolvida deve apresentar custo reduzido em relação ao sistema como um todo, e apresentar custo de operação baixo.

Tem-se também como requisito, a manutenção das demais especificações do projeto, não devendo fazer parte da solução, a redução da velocidade de medição, aumento significativo do protótipo e/ou perda de resolução da medição.

2.7 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

Tendo em vista a resolução do problema proposto, algumas opções foram analisadas. Na sequência encontram-se as características mais relevantes das quatro principais opções para a resolução do problema proposto. É importante destacar que não são as únicas possibilidades, apenas representam as alternativas que foram consideradas pelo autor com maiores chances de sucesso no âmbito deste trabalho.

2.7.1 Uso de repetidores

A utilização de repetidores convenientemente dispostos ao longo do comprimento do cabo atua na redução dos problemas relacionados à qualidade do sinal. Eles fazem com que o sinal, atenuado pela impedância dos cabos seja amplificado a níveis aceitáveis, permitindo que distâncias maiores sejam alcançadas, sem degradação na qualidade da transmissão. Para isso, repetidores devem ser instalados a distâncias regulares no próprio cabo de comunicação, as quais não devem ultrapassar a distância máxima de cem metros (SPURGEON; ZIMMERMAN, 2014; TOY, 2012).

Repetidores adicionam atrasos de comunicação, impactando no tempo máximo de transmissão dos dados permitido pelo protocolo utilizado. O número máximo de repetidores é determinado pelo atraso inserido pelo mesmo na linha de comunicação. Entretanto, é comum que a utilização de mais de quatro repetidores cause degradação do sinal, uma vez que o atraso total passa a ser maior do que o permitido (SPURGEON; ZIMMERMAN, 2014). Portanto, o uso de repetidores não viabiliza o atendimento do requisito de medir trechos de novecentos metros.

A velocidade de transmissão seria a mesma atualmente disponível e a compatibilidade deste sistema é total, uma vez que é uma forma de estender a autonomia da atual estrutura de comunicação.

Em relação a facilidade de utilização, cabos de grande comprimento trazem complicações em relação à distribuição do mesmo durante a medição. Seria preciso utilizar um sistema mecânico para

distribuí-lo através de carretéis. Entretanto, como uma das pontas precisa ser fixa haveria uma torção do cabo durante o processo de medição. Esse problema pode ser reduzido através do uso de *slip rings*⁷, elementos que exigem manutenção e cuidados específicos para o funcionamento adequado.

Uma vez que o cabo é obrigatoriamente dividido em menores seções (de 100 m) seria possível realizar a desconexão e ampliação da linha de transmissão de forma gradativa, simplificando a distribuição dos cabos, mas, complicando a utilização do sistema e ampliando o tempo total de medição.

A utilização de grandes linhas cabeadas representa a necessidade de transporte destes cabos ao local de medição, o que seria custoso em locais de difícil acesso.

De forma resumida, embora apresente uma solução de fácil implementação, a adição de repetidores é uma opção limitada em relação ao comprimento máximo teórico de quatrocentos metros.

2.7.2 Transmissão sem fio

Existem roteadores sem fio com velocidade de transmissão de 450 Mb/s, sendo o alcance limitado a algumas centenas de metros.

Para a utilização de comunicação sem fio com quilômetros de alcance e velocidade de comunicação na ordem de gigabits por segundo, somente foram encontrados sistemas de transmissão de dados sem fio que necessitam de alinhamento entre antenas de grande/médio porte e elevado consumo.

O alcance informado pelos fabricantes em relação a seus produtos é especificado para campos abertos, sem a presença de barreiras. No caso de dutos isso não ocorre, uma vez que o perfilômetro pode transitar por curvas fazendo com que a própria parede do duto se torne uma barreira a propagação da onda.

No caso de dutos metálicos existe o efeito pelicular em que a parede do duto age como uma blindagem eletromagnética atenuando o sinal de interesse. Essa atenuação é maior quando cresce a frequência do sinal transmitido (BENEDET, 2014; COSTA, 2009).

Uma das características mais importantes de conexões sem fio é o baixo nível de determinismo, sendo possível que um pacote necessite ser

⁷ Dispositivo eletromecânico que permite a transmissão de sinais ou potência elétrica de um ponto estacionário a uma estrutura rotacional através de anéis de contato (MOOG, 2015).

transmitido diversas vezes antes de seu eficaz recebimento, dificultando as tarefas de processamento em tempo real (GOLDSMITH, 2005).

Esta alternativa representa total compatibilidade com o sistema atual além de reduzir a complexidade de uso e o número de elementos necessários ao funcionamento deste.

O baixo nível de determinismo e a necessidade de alinhamento entre antenas faz com que o uso desta tecnologia seja de difícil implantação, apresentando potencial de autonomia inferior ao atualmente aplicado.

2.7.3 Uso de fibra óptica

Fibras ópticas são amplamente utilizadas na transmissão de informações a longas distâncias. Dependendo das características da fibra, e do laser utilizado, é possível realizar a comunicação ponto-a-ponto a quilômetros de distância entre emissor e receptor.

Os equipamentos utilizados na transmissão de dados para longa distância por fibras ópticas costumam fazer uso de fibras monomodo, as quais necessitam de um alinhamento bastante preciso. Também é usual utilizar fibras feitas em vidro, uma vez que as fibras de plástico causam alta atenuação do sinal.

A fonte de luz necessária para realizar comunicação a longas distâncias deve ser capaz de fornecer um feixe de alta coerência e estabilidade. Esses fatores fazem com que o custo de sistemas como o proposto ainda seja elevado, quando comparado ao das outras alternativas (DECUSATIS, 2014).

A utilização de fibras ópticas de grande comprimento está sujeita aos mesmos problemas expostos em relação a cabos longos, sendo agravada pela ausência de opções comparáveis ao *slip ring*. Tornando a utilização de fibras ópticas complexa e sujeita ao transporte de elementos de grande porte.

2.7.4 Uso de sistemas embarcados

A utilização de sistemas embarcados tem como objetivo, como sugerido pelo nome, a instalação de um sistema computacional diretamente no corpo do sistema de medição, dispensando a necessidade de conexão com um computador externo.

Essa alternativa apresenta ainda duas possíveis soluções:

- uma solução capaz de substituir parcialmente o computador, realizando apenas as etapas hoje referentes à *CPU*, ou seja, aquisição de imagens e armazenamento em disco. Nesse caso, as imagens armazenadas seriam processadas posteriormente;
- uma solução capaz de substituir todas as tarefas referentes à *CPU+GPU*, armazenando apenas os dados processados.

A utilização de um sistema embarcado, independente da versão aplicada, ataca o problema de autonomia de forma mais agressiva do que as três alternativas anteriormente citadas. A autonomia passaria a ser limitada pelo consumo de energia e espaço de armazenamento de dados disponíveis, ambas características que podem ser expandidas de acordo com a necessidade.

A compatibilidade desta alternativa com o sistema atual depende apenas da programação e configuração de *hardware* a serem desenvolvidos.

O número total de elementos seria reduzido, sendo necessário apenas o transporte do perfilômetro e de um carretel com o cabo de aço utilizado para o resgate deste.

2.7.5 Smart Câmeras

Geralmente utilizadas na detecção de objetos e outras aplicações industriais comuns, estas câmeras possuem sistemas embarcados dedicados (SICK SENSOR INTELLIGENCE, 2015), os quais poderiam ser programados para realizar o processamento ou armazenamento das imagens obtidas pelo perfilômetro.

Por se tratar de uma solução semelhante a utilização de sistemas embarcados, em que a única diferença é a utilização de uma solução comercial compacta e dedicada, pode ser considerado que, em relação aos requisitos a serem analisados esta solução somente difere da utilização de sistemas embarcados em relação a compatibilidade, em que seria necessário realizar alterações no *hardware* do perfilômetro.

2.8 COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS ESTUDADAS

Tendo em vista a melhor comparação entre as alternativas estudadas e as especificações atuais do perfilômetro, o quadro 2 foi compilado através das estimativas apresentadas anteriormente.

Quadro 2 - Comparação das soluções estudadas.

Requisito	Sistema	Repetidores	Transmissão sem fio	Fibra Óptica	Sistemas Embarcados	Smart câmera
Potencial de autonomia [m]		400	±50	>5000	Configurável	Configurável
Velocidade de comunicação [Gb/s]		1	1	1	1	1
Compatibilidade		Total	Total	Total	Configurável	Necessita de alterações de <i>hardware</i>
Número e tamanho de elementos ^a		Maior	Menor	Maior	Menor	Menor
Facilidade na inspeção		Complexo manejo de cabos	Simplificada	Complexo manejo das fibras	Configurável	Configurável
Custo [R\$]		± (300 + 50) ^b	Não disponível	Não disponível	± (2000 + 2000) ^c	± (8000 + 2000) ^c

^a = Em relação ao sistema em uso atualmente
^b = Custo de um conversor/repetidor + custo por metro de cabo
^c = Custo do sistema + custo por unidade de armazenamento de 1 TB SSD

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

No quadro 2 é possível perceber a presença de elementos em destaque, esses são os melhores resultados para cada característica da comparação.

É possível verificar que o uso de repetidores assim como a transmissão sem fio, podem ser descartadas devido à expectativa de baixa autonomia.

O uso de fibra óptica apresenta expectativa de alta autonomia, mas foi descartada por apresentar dificuldades durante a inspeção devido à necessidade de longos cabos.

Devido a necessidade de alterações de hardware a aplicação de uma solução baseada em *smart* câmeras foi considerada inadequada.

O desenvolvimento de um sistema embarcado foi considerado a opção mais viável para desenvolvimento e validação por apresentar bons resultados nos principais quesitos. Ele também apresenta características indefinidas que variam muito de acordo com a implementação, possibilitando resultados ainda melhores.

Sendo assim, os próximos capítulos desta dissertação tratam somente do desenvolvimento e validação de um sistema embarcado para o perfilômetro óptico a laser.

3 SISTEMAS EMBARCADOS

Cada vez mais empregados em diferentes áreas da sociedade, os sistemas embarcados constituem sistemas microprocessados, sendo o microprocessador encapsulado e dedicado ao dispositivo ou sistema que controla. São compostos por elementos de *hardware* e *software* e se caracterizam por: (MALINOWSKI; YU, 2011; OSHANA, 2006)

- serem restritos à aplicação, dedicados a tarefas específicas;
- apresentarem elevada robustez;
- possuírem limitados recursos computacionais, como capacidade de processamento e memória;
- apresentarem, muitas vezes, requisitos de tempo real e baixo consumo de energia.

Por definição, sistemas embarcados constituem partes de dispositivos maiores. Seu custo, portanto, não deve possuir grande relevância frente ao custo do produto ao qual está integrado. De maneira semelhante, as dimensões de sistemas embarcados são limitadas pela própria aplicação. Assim, o número de componentes e a quantidade de memória empregados sofrem restrições, o que se reflete na capacidade computacional (DOBOLI; CURRIE, 2011).

Os elementos mais comuns em sistemas embarcados são: a unidade de processamento (*CPU*), a memória do sistema, e conversores de sinais analógicos para sinais digitais (*ADC*). Além disso, é necessário existir um conjunto de suporte que forneça os serviços essenciais ao funcionamento do sistema embarcado.

Nos casos em que existe atuação externa controlada pelo sistema, é comum encontrar conversores de sinais digitais para sinais analógicos (*DAC*).

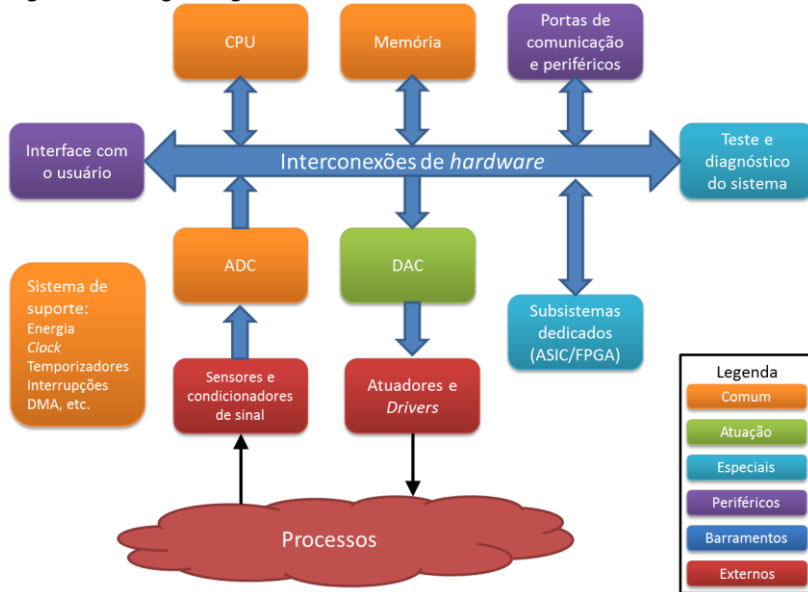
Em projetos especiais, em que é necessário alto desempenho é possível encontrar ferramentas de diagnóstico e subsistemas dedicados à execução de partes do *software*.

Periféricos como: a interface de usuário e portas de comunicação são adicionados quando existe a interação entre o sistema embarcado e, usuários ou outros sistemas.

Pode ser observado na figura 17 o diagrama geral do *hardware* de um sistema embarcado. É possível que soluções específicas não possuam um ou mais dos elementos citados, mas, em geral, esta é a

estrutura esperada quando se trata de um sistema embarcado de alto desempenho.

Figura 17 - Diagrama geral do hardware de um sistema embarcado.



Fonte: Adaptado de Jimenez, Palomera e Couvertier (2013).

Ao se tratar de projeto de sistemas embarcados, deve-se levar em consideração as principais características desses. São elas: (JIMENEZ; PALOMERA; COUVERTIER, 2013)

- funcionalidade - capacidade de executar a função para a qual foi programado;
- custo - quantidade de recursos necessários durante o ciclo de vida do produto;
- desempenho - capacidade de executar as funções a tempo;
- dimensões - espaço físico ocupado pelo sistema;
- consumo - quantidade de energia necessária para manter o sistema em funcionamento;
- tempo de desenvolvimento - tempo necessário para desenvolver uma solução que atenda a todas as necessidades do projeto;

- confiabilidade - capacidade de funcionamento de forma confiável por longos períodos sem a necessidade de manutenções e/ou interferência do usuário;
- manutenção - capacidade de receber manutenção corretiva, adaptativa, preventiva ou aperfeiçoamentos.

3.1 ARQUITETURAS DE SISTEMAS EMBARCADOS

Existem diversas arquiteturas que podem ser utilizadas em sistemas embarcados. A seguir são apresentadas algumas dessas, de maneira sucinta, é explicado seu funcionamento, exemplificando aplicações em tratamento e/ou armazenamento de imagens, escopo deste trabalho.

3.1.1 Microprocessadores

Microprocessadores são classicamente caracterizados por um único fluxo de instruções, que opera sobre um único fluxo de dados. Apesar de os programas estarem organizados através de instruções sequenciais, elas podem ser executadas de forma sobreposta em diferentes estágios (*pipelining*) (TOLEDO; MARTÍNEZ; FERRÁNDEZ, 2007).

São desenvolvidos em sua maioria, para uso geral, principalmente devido a sua natureza sequencial, mas podem ser utilizados em sistemas embarcados.

É possível encontrar sistemas embarcados cuja capacidade de processamento e armazenamento são muito semelhantes à de computadores convencionais. Entretanto, assim como essas características, o consumo e tamanho são próximos a computadores convencionais, dificultando o uso em circunstâncias nas quais o sistema deve ser móvel (INTEL, 2013).

A família de microprocessadores *Advanced RISC Machine (ARM)* é uma arquitetura de microprocessadores, cujo foco é o melhor desempenho possível mantendo tamanho e consumo reduzidos, o que torna seu uso comum ao se tratar de sistemas embarcados similares ao proposto por este trabalho.

Pode-se citar inúmeras aplicações de processamento e/ou armazenamento embarcado de imagens através de microprocessadores *ARM*, por exemplo: o sistema de aquisição e armazenamento de imagens desenvolvido por Zhang, Xue e Wang (2010) e o sistema desenvolvido

por Da-Zhai e Yu-Xia (2010), capaz de realizar a leitura de códigos de barra através do processamento de imagens.

3.1.2 Digital Signal Processor (DSP)

DSP são processadores otimizados para o tratamento de sinais, apresentando elementos de hardware específicos para operações mais comuns em processamento de sinais. (OSHANA, 2006).

Por possuírem sua arquitetura voltada para a execução em tempo real, é comum encontrarmos *DSP* com alto nível de confiabilidade e determinismo (OSHANA, 2006). Essas características tem sua importância reforçada pelo fato de existirem *DSP* desenvolvidos especialmente para o processamento de imagens.

Li *et al.* (2013) desenvolveram, através do uso de *DSP*, um sistema embarcado capaz de realizar estimativas do número de pessoas em ambientes monitorados por câmeras de segurança.

3.1.3 Field Programmable Gate Arrays (FPGA)

FPGA são semicondutores baseados em matrizes de blocos lógicos com interconexões programáveis (XILINX, 2014). Através da programação dessas conexões é possível criar qualquer circuito lógico, algo bastante similar a montar circuitos mais complexos através da combinação de portas lógicas e elementos digitais simples. Sendo possível inclusive, programar estruturas semelhantes ao arranjo interno de microprocessadores completos (ALTERA, 2014).

FPGA surgiram com o intuito de oferecer conectividade programável entre componentes chave. Essa abordagem permite que erros de projeto que somente são reconhecidos em fase avançada de desenvolvimento possam ser corrigidos através da reprogramação do *FPGA* (WOODS *et al.*, 2008).

Atualmente, *FPGA* costumam aliar o desempenho dos circuitos integrados para aplicações específicas (*ASIC*) com a vantagem da possibilidade de serem reprogramados. *FPGA* permitem a criação de arquiteturas que melhor se adaptam ao algoritmo a ser processado, possibilitando ganhos em relação à velocidade e ao consumo (WOODS *et al.*, 2008).

O uso de cálculos que envolvem ponto flutuante em *FPGA* costuma ser uma tarefa complexa e custosa. Na maioria dos *FPGA* é preciso realizar transformações de ponto flutuante para ponto fixo para que os cálculos possam ser executados, essas transformações

determinam a precisão do resultado a ser obtido, consomem blocos lógicos do *FPGA* e reduzem o desempenho geral do processamento devido ao número maior de operações necessárias (INSTRUMENTS, 2015).

Com a intenção de demonstrar a possibilidade de construção de um sistema de processamento de imagem e vídeo baseado unicamente em *FPGA*, Toledo, Martínez e Ferrández (2007) desenvolveram um sistema de apoio a pessoas com a visão de túnel⁸. O sistema desenvolvido utiliza uma câmera para aquisição da imagem periférica, que é então processada no sistema baseado em *FPGA*, realizando a detecção de contornos de acordo com as configurações escolhidas pelo usuário. As imagens tratadas são exibidas em um óculos que possibilita o controle de transparência, permitindo a exibição dos contornos da visão periférica na própria visão do ambiente.

3.1.4 Soluções compostas

São geralmente compostas de duas ou mais tecnologias diferentes, buscando-se agregar os benefícios e compensar as deficiências referentes a cada tecnologia.

Geralmente, sistemas embarcados compostos possuem uma arquitetura dividida em duas unidades, sendo uma responsável pela aquisição de dados, gerenciamento de periféricos e armazenamento, e outra responsável pelo processamento de alto desempenho dos dados adquiridos. Essa topologia pode variar bastante, podendo incluir mais de duas tecnologias ou até mesmo duas unidades de uma mesma tecnologia.

O sistema desenvolvido por Mu e Dong (2013) ilustra a utilização de um sistema embarcado composto no tratamento de imagens. Fazendo uso de uma solução composta por *FPGA+DSP* eles foram capazes de desenvolver, através do processamento de vídeo, um sistema para avaliação do carvão produzido, realizando em tempo real o tratamento das imagens adquiridas. O sistema desenvolvido utiliza o *FPGA* para aquisição, controle de tempo e pré-processamento, enquanto o *DSP* realiza o processamento de alto desempenho.

Como um segundo exemplo pode-se citar o trabalho de Huang *et al.* (2012), no qual foi desenvolvido um sistema embarcado baseado em

⁸ É uma condição onde a visão periférica é afetada enquanto a visão central permanece intacta como se a imagem fosse vista através de um túnel (MERRIAM-WEBSTER, 2015).

ARM+DSP para realizar o tratamento de imagens em tempo real e obter comandos multitoque em uma tela. Nesse sistema, o *ARM* é responsável pelo gerenciamento de periféricos, enquanto o *DSP* realiza o processamento das imagens.

Ainda é preciso destacar o uso de sistemas baseados em *CPU+GPU*. As *GPU* são formadas por centenas e até milhares de núcleos de processamento de baixa complexidade permitindo a operação de centenas de cálculos simultaneamente. Entretanto, as *GPU* não possuem alguns dos componentes necessários para sua utilização independente, tornando-as hardwares especializados em computação numérica dependentes da utilização em conjunto de uma *CPU*.

É comum a *CPU* ser utilizada em tarefas altamente sequenciais e gerenciamento de periféricos, e a *GPU* ser responsável por tarefas com alto nível de computação numérica, em que existe a possibilidade de paralelismo, em especial em situações nas quais um mesmo cálculo deva ser aplicado a inúmeros conjuntos de dados (KIRK; HWU, 2010).

Embora possam ser utilizadas outras linguagens de programação para *GPU*, o uso de *CUDA* se sobressai por apresentar inúmeras facilidades e proximidade a linguagens como C/C++, amplamente difundidas (NVIDIA, 2014b). A atual utilização de *CUDA* nas versões existentes do PEROLA-I traz especial interesse a essa configuração.

Por necessitar de *GPU* habilitadas para a utilização de *CUDA*, não existem muitas aplicações desta tecnologia em sistemas embarcados. Entretanto, é possível identificar a utilização de *GPU* não habilitadas para *CUDA* através de outras linguagens de programação. O sistema desenvolvido por Raihan *et al.* (2013), por exemplo, é um sistema que utiliza uma *CPU ARM11* e uma *VideoCore IV* como *GPU* para realizar o reconhecimento de placas de registro de automóveis através de uma câmera em cancelas com autoatendimento. Nessa configuração, a *GPU* é utilizada para acelerar a execução de filtros e o processamento de imagens.

3.2 COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS LEVANTADAS

As câmeras atualmente utilizadas no projeto contam com suporte de desenvolvimento para microprocessadores convencionais e para os da família *ARM*, tornando necessária a utilização mínima de um desses elementos como interface de comunicação com periféricos.

Como foi anteriormente mencionado, seria possível desenvolver um sistema embarcado capaz de armazenar as imagens obtidas pela câmera ou processá-las e armazenar apenas os dados finais. A análise do

sistema de armazenamento de imagens mostra que as principais operações efetuadas seriam de gerenciamento de periféricos, reduzindo a escolha da arquitetura a um microprocessador.

Em relação ao sistema de processamento, já foi verificado anteriormente por Melo (2012) que *CPU* de uso comum (como as empregadas em computadores de mesa e portáteis atualmente) não seriam capazes de oferecer o desempenho requerido pelo sistema, tornando necessário o uso de soluções compostas.

Somente foram consideradas opções compostas por dois sistemas, uma vez que a adição de vários sistemas complicaria o desenvolvimento e traria desvantagens em relação a consumo e tamanho. As propostas de soluções compostas que poderiam atender aos requisitos de sistemas embarcados impostos pelo sistema em desenvolvimento são:

- CPU+DSP;
- CPU+FPGA;
- CPU+CPU;
- CPU+GPU.

A seguir podem ser observadas as considerações levadas em conta para cada solução em relação as principais características de sistemas embarcados expostas no início deste capítulo:

- Desempenho - Devido as diferentes arquiteturas de processamento pesquisadas, uma comparação genérica de desempenho sem testes com o algoritmo desenvolvido seria subjetiva demais para ser válida. Por este motivo, considerou-se que todas as soluções compostas estudadas seriam capazes de desempenhar o requisito mínimo de 50 Hz.
Para todas as soluções a programação é um fator importante no desempenho geral do sistema, mas para os sistemas que contam com *DSP* e *FPGA* esse é um fator crucial, sendo tão responsável quanto o hardware escolhido pelo desempenho final do sistema (FYKSE, 2013; CULLINAN; WYANT; FRATTESI, 2013; KESTUR; DAVIS; WILLIAMS, 2010).
- Tamanho - Devido as dimensões atuais do perfilômetro, seria preciso que o *hardware* a ser desenvolvido fosse inserido em uma área circular de diâmetro 100 mm no caso do protótipo de (8-10)'' ou em uma área circular de diâmetro 60 mm nos demais protótipos. De acordo com a pesquisa de mercado

realizada, nenhuma das alternativas levantadas, apresenta produtos comerciais dentro destas dimensões. Seria preciso então realizar o desenvolvimento de *hardware* dedicado.

Por se tratar de dimensões reduzidas para o projeto de um sistema embarcado de alto desempenho, deve ser levada em conta a capacidade de redução do hardware empregado para cada uma destas soluções. A existência de *Systems on Chip (SoC)*⁹ baseados na solução escolhida deve ser uma das principais características a ser observada no projeto de um sistema reduzido. Atualmente podem ser encontrados *SoC* para três das quatro opções levantadas, somente a utilização de sistemas *CPU+CPU* não apresenta esta possibilidade.

- Consumo – Novamente, esta é uma comparação que não pode ser realizada de forma objetiva sem a presença de testes no algoritmo final. Entretanto, uma vez que a necessidade de um *hardware* reduzido aponta o uso de *SoC* como solução, espera-se para todas as alternativas baseadas nestes, um consumo energético reduzido, estimado em poucas dezenas de watts por hora.
- Tempo de desenvolvimento - Para a solução baseada em *CPU+GPU* é previsto um curto período de desenvolvimento, centrado nos algoritmos de aquisição de imagem e compatibilização dos algoritmos de processamento já utilizados em *GPU* comuns. O tempo previsto para desenvolvimento nesta alternativa é de aproximadamente seis meses.

Para as demais soluções seria necessário recomençar o desenvolvimento de *software* a partir do início. Em soluções com múltiplas *CPU* este desenvolvimento é simplificado, sendo possível utilizar bibliotecas de *software* como a OpenMP (OPENMP, 2015), que facilitariam o desenvolvimento de uma solução escalar (possibilitando inclusive a adição de mais *CPU* a medida que se torne necessário). Seriam necessários em torno de nove meses para

⁹ Os *SoCs*, “sistemas em um chip” em tradução livre do autor, referem-se a componentes que incorporam muitos dos elementos necessários ao funcionamento de um sistema computadorizado em um único circuito integrado, reduzindo consumo e tamanho e melhorando a eficiência energética (JERRAYA; WOLF, 2005; FURBER, 2000).

obtenção de uma solução funcional e doze para uma solução otimizada.

Para aplicação adequada de um *DSP* neste problema, seria preciso levar em conta os elementos de hardware presentes e a melhor forma de utilização de cada um deles para atingir o objetivo do algoritmo. Esta atividade eleva o tempo de desenvolvimento e o torna dependente do *hardware* empregado. A estimativa de desenvolvimento deste sistema é de doze meses a partir da escolha de um *hardware*, uma vez que é necessário realizar uma ambientação com a tecnologia e hardware escolhido.

Na aplicação de uma solução que inclua um *FPGA* é preciso planejar não somente o algoritmo a ser executado mas também transcrever este algoritmo em descrição de *hardware* para que o mesmo seja sintetizado no *FPGA*. Segundo a expectativa de especialistas da Macnica DHW, empresa que foi procurada para aquisição de *hardwares* e fornecimento de cursos, estas tarefas sozinhas levariam em torno de 6 meses de um profissional experiente para obtenção de uma solução otimizada, soma-se a este tempo o desenvolvimento da porção de *software* responsável pela aquisição das imagens, resultando em um tempo total de aproximadamente dez meses. Este tempo é previsto para um profissional experiente, como a equipe de projeto não possui experiência com tal tecnologia, se estima um tempo de desenvolvimento aproximado de quatorze meses.

- Custo – Como nenhuma das alternativas possui *hardware* comercial pronto para a aplicação, o custo da plataforma de desenvolvimento a ser empregada não foi levado em consideração como fator decisivo.
O custo de projeto de soluções específicas seria semelhante para todas as soluções e as diferenças do custo de produção são desprezíveis em relação ao custo total do perfilômetro. Sendo assim, este fator foi considerado como não impactante na escolha de uma solução a ser desenvolvida.
- Confiabilidade – Ao falarmos de confiabilidade, uma das soluções se destaca, a utilização de *FPGA* tem como uma de suas principais características o alto nível de confiabilidade e determinismo quando programadas e utilizadas da maneira correta (WOODS *et al.*, 2008). Uma vez que esta tecnologia

se trata de um *hardware* programável, não existe a necessidade de um sistema operacional, onde existem diversas rotinas sendo executadas em segundo plano, entretanto, uma vez que parte do processo é executado em uma *CPU*, a confiabilidade do sistema como um todo passa a ser determinada por este elemento.

Soluções com múltiplas *CPU* dependeriam da comunicação e sincronismo entre *CPU* e sistemas operacionais, sendo considerada a solução com menor índice de confiabilidade.

Parte do processamento dos sistemas baseados em *CPU+DSP* é realizada por elementos de *hardware*, melhorando as características de confiabilidade do sistema. Entretanto, todo o sistema é gerenciado por um sistema operacional na *CPU*, novamente limitando a confiabilidade geral do sistema.

Uma vez que a solução baseada em *CPU+GPU* possui arquitetura de processamento semelhante a atualmente empregada esta característica foi considerada suficiente e não foi analisada para esta solução.

O quadro 3 apresenta uma breve compilação dos dados expostos acima. Estes dados foram utilizados para auxílio na escolha da solução da arquitetura a ser utilizada no sistema de processamento de imagens.

Quadro 3 - Comparação entre as possíveis soluções compostas estudadas.

Item \ Sistema	<i>CPU + DSP</i>	<i>CPU + FPGA</i>	<i>CPU + CPU</i>	<i>CPU + GPU</i>
Desempenho	N/A	N/A	N/A	N/A
Tamanho	OK	OK	Não atende	OK
Consumo	OK	OK	Não atende	OK
Tempo de desenvolvimento [meses]	± 12	± 14	± 9	± 6
Custo [R\$]	N/A	N/A	N/A	N/A
Confiabilidade	OK	OK	Não atende	OK
N/A = Não avaliado				

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

No quadro 3 os melhores resultados esperados para cada característica estão destacados em negrito. Analisando estas características é possível observar que a solução baseada em “*CPU+CPU*” não apresenta um bom prospecto para o desenvolvimento. Tendo sido então abandonada.

As configurações baseadas em “*CPU+FPGA*” e “*CPU+DSP*” possuem o mesmo número de características destaque e apresentam boas alternativas ao desenvolvimento de um sistema embarcado para processamento de imagens. Entretanto, o tempo de desenvolvimento para ambas soluções foi considerado elevado. Inviabilizando o desenvolvimento de qualquer uma das soluções e mais um sistema de armazenamento e imagens dentro do tempo disposto para o projeto.

Uma parceria com desenvolvedores autônomos de *FPGA* foi realizada para que este fosse desenvolvido em paralelo ao projeto principal. Tal oportunidade não foi encontrada para o desenvolvimento de um sistema *CPU+DSP*.

Considerando os requisitos do sistema e as particularidades de cada opção apresentada, optou-se pelo desenvolvimento de três sistemas distintos considerados como sendo os mais promissores, são eles:

- sistema de armazenamento de imagens baseado em *CPU*;
- sistema de processamento de imagens baseado em *CPU+GPU*, preferencialmente uma *GPU* habilitada para o uso de *CUDA*;
- sistema de processamento de imagens baseado em *CPU+FPGA*.

A escolha de *hardware* específico e descrição desses sistemas será realizada no capítulo 4.

4 ALTERNATIVAS PARA O AUMENTO DE AUTONOMIA DO PEROLA-I

Para aumentar a autonomia do perfilômetro como proposto no capítulo 1, foi proposto no capítulo 2 o uso de sistemas embarcados. A análise das características desses sistemas indicou, no capítulo 3, a possibilidade do uso de um sistema de armazenamento de imagens, ou de duas soluções compostas distintas para o processamento dessas imagens.

Em relação a estrutura de comunicação, uma vez que o sistema embarcado será inserido no perfilômetro, todas as conexões serão locais. Seria possível então, realizar a comunicação direta do μC com o sistema embarcado a ser desenvolvido, ou até mesmo incorporar as funções deste e remover a necessidade do μC . No entanto, para manter o requisito de compatibilidade com o *hardware* atual, permitindo que seja mantida a possibilidade de uso de computadores para o processamento, a configuração atual foi mantida.

Os microprocessadores da família *ARM* foram escolhidos para desempenhar o papel de *CPU* nas três opções destacadas no final do capítulo 3, devido a suas características de baixo consumo e disponibilidade de *Systems on Chip* baseados nestes.

O desenvolvimento de *hardware* especializado não faz parte do escopo deste trabalho, por esse motivo, foram escolhidas placas de desenvolvimento que possibilitem a validação do uso dos sistemas embarcados para aumento da autonomia do perfilômetro.

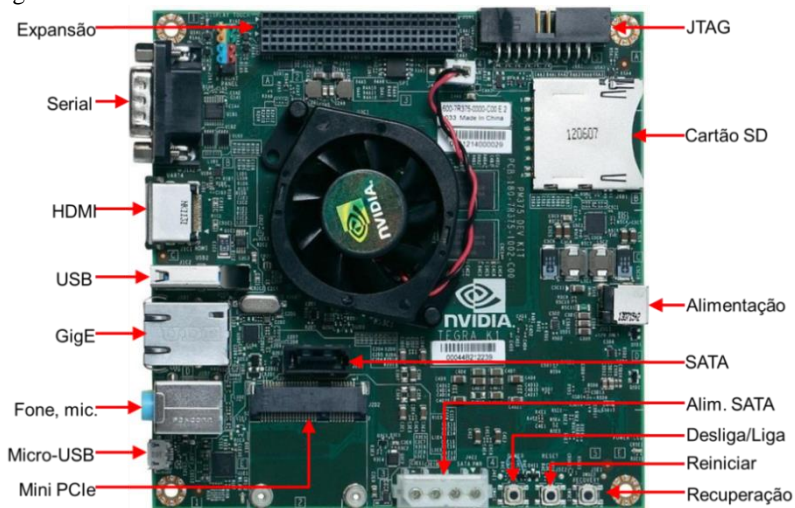
Para o desenvolvimento do sistema de armazenamento de imagens as principais características devem ser: o uso de uma *CPU ARM*, uma interface *gigabit ethernet*, e uma interface *SATA*. Uma vez que esses requisitos são comuns às soluções a serem desenvolvidas, optou-se pela utilização do *hardware* de umas das outras soluções.

Foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho e implementação do sistema de processamento baseado em *CPU+GPU* a plataforma Jetson TK1 (NVIDIA, 2014c). Apresentada pela NVIDIA como a primeira plataforma, baseada em tecnologia *CUDA*, para desenvolvimento de sistemas embarcados de alta capacidade computacional e baixo consumo de energia, possuindo o mesmo núcleo de computação NVIDIA Kepler utilizado em supercomputadores. As características dessa plataforma são (NVIDIA, 2014a):

- Tegra K1 SoC contendo uma GPU de arquitetura Kepler com 192 núcleos CUDA e um ARM Cortex A15 equipado com 4 núcleos de 2,32 GHz e 1 núcleo de baixo consumo;
- memória RAM de 2 GB;
- adaptador de rede com suporte *Gigabit ethernet* e jumbo frames de até 9 kB;
- Saída de vídeo via *HDMI*;
- interface *SATA 3* com alimentação na própria placa;
- sistema operacional L4T (baseado no Ubuntu 14.04);
- dimensões – (127 x 127 x 30) mm.

A plataforma Jetson TK1 pode ser observada em detalhes na figura 18.

Figura 18 - Plataforma de desenvolvimento Jetson TK1.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Para o desenvolvimento do sistema utilizando a arquitetura *CPU+FPGA* uma pesquisa de mercado revelou que Xilinx e Altera, líderes de mercado, possuem plataformas que apresentam capacidade de resolver o problema proposto. Optou-se pela utilização de soluções desenvolvidas pela Altera devido a maior familiaridade dos desenvolvedores externos com suas ferramentas. Dentro do portfólio

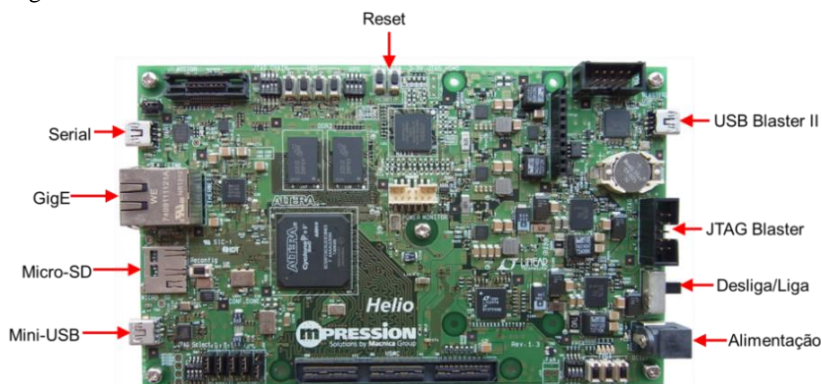
dessa empresa a solução cujas especificações melhor atenderam aos requisitos (consumo, desempenho e custo) foi a plataforma *Helio Board*.

As principais características da plataforma em questão são (MPRESSION, 2013):

- Cyclone V *SoC* contendo *FPGA* e um *ARM Cortex A9* com 2 núcleos de 1 GHz;
- memória *RAM* de 1 GB;
- adaptador de rede com suporte *Gigabit ethernet* e *jumbo frames* de até 4 kB;
- interface mini-*USB 2.0*;
- sistema operacional *yocto Linux*;
- dimensões – (100 x 167 x 30) mm.

A plataforma *Helio* pode ser observada na figura 19.

Figura 19 - Plataforma de desenvolvimento *Helio*.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

É possível verificar nas configurações desta plataforma, a inexistência de uma interface *SATA*. Para o sistema de processamento em *FPGA* é possível que esta não seja uma característica restritiva. Entretanto, para o sistema de armazenamento de imagens em *ARM*, não é possível realizar o desenvolvimento com uso compartilhado desta plataforma. Por este motivo optou-se pela utilização da *Jetson TK1* também no sistema de armazenamento de imagens, sendo utilizada somente a porção *ARM* desta.

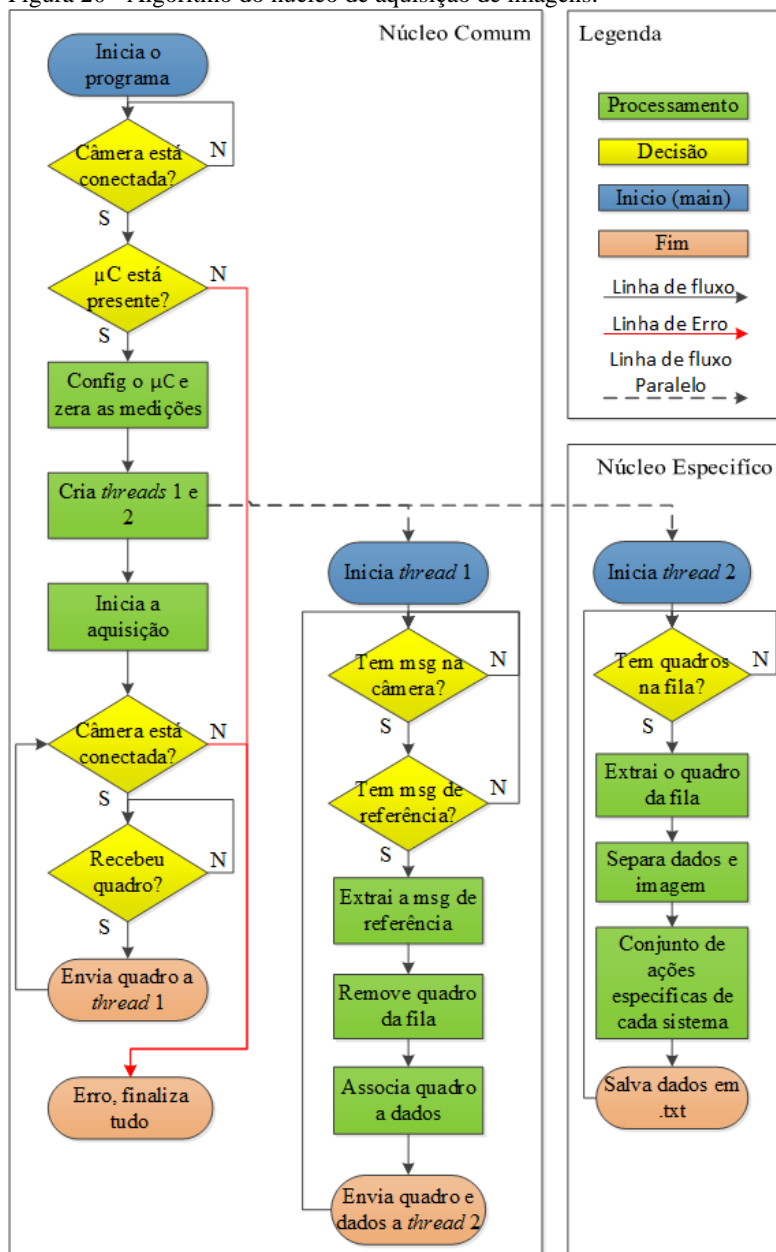
Em todos os sistemas, na comunicação com a câmera, as configurações padrão de rede são insuficientes, é preciso: utilizar um endereço de *IP* fixo, configurar o tamanho dos pacotes de transmissão (*jumbo frames*) para o máximo aceito pela plataforma e ajustar os tamanhos dos *buffers* de recebimento e envio.

Uma vez que todos os três sistemas devem realizar a comunicação com a câmera e com o μC , foi desenvolvido um módulo de *software* para aquisição de imagens que deve ser utilizado por todas as soluções. As tarefas específicas de cada solução devem ser adicionadas a este módulo.

O fluxograma apresentado na figura 20 demonstra de forma simplificada os passos executados pelo algoritmo desenvolvido para o núcleo de aquisição de imagens.

Na figura 20 é possível observar que, uma vez que o software entra em regime de operação, a *thread* principal passa a ser responsável apenas pelo gerenciamento da câmera, aguardando um novo quadro ou a desconexão da câmera. A *thread* 1 é responsável por, uma vez recebida a imagem, realizar a leitura dos registradores e buscar a leitura do sistema de referência, enviando então o conjunto para o núcleo específico, executado pela *thread* 2.

Figura 20 - Algoritmo do núcleo de aquisição de imagens.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

4.1 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE IMAGENS BASEADO EM ARM

É comum encontrarmos câmeras de vídeo capazes de armazenar mais de 50 Hz (GOPRO, 2015) com resoluções ainda maiores do que a utilizada pelo PEROLA-I. Câmeras como essas costumam utilizar *hardwares* dedicados para o processo de conversão de vídeos, comprimindo estes e armazenando-os em um formato compacto em que geralmente existem perdas. Em se tratando de vídeos é algo aceitável, mas não desejável em uma abordagem metrológica. Poderiam ser utilizados formatos de vídeo sem compressão, entretanto, o tamanho desses vídeos seria semelhante ao tamanho dos quadros armazenados separadamente, apresentando o inconveniente de necessitar separar os quadros para análise, por esse motivo o sistema foi desenvolvido visando o armazenamento de imagens e não de vídeos.

A utilização de um sistema de aquisição de imagens é baseada na ideia de armazenar todos os quadros capturados, para que estes sejam posteriormente processados. Nessa configuração, a principal característica é a quantidade de dados a serem armazenados.

Uma vez que os principais gargalos deste sistema são a unidade de armazenamento, e o formato de imagem a ser utilizado, estas características devem ser definidas através de testes de desempenho do sistema. Para formatos como o BMP por exemplo, cada imagem teria em torno de 1 MB, sendo necessários em torno de 1 TB para armazenamento da distância mínima requerida.

A princípio seria possível utilizar cartões *SD*, unidades de estado sólido (*SSD*) ou discos rígidos (*HDD*). Entretanto, cartões *SD* ainda não possuem capacidade de armazenamento comparável as demais alternativas. *SSDs* e *HDDs* foram testados para definir a unidade de armazenamento padrão do sistema de armazenamento.

Em relação ao desempenho, uma vez que a plataforma é constituída por um microprocessador que permite a execução em apenas um núcleo de baixo consumo, é preciso forçar a execução em alto desempenho para que todos os núcleos de processamento sejam utilizados, somente dessa forma é possível garantir que o desempenho do sistema será máximo e que mais de um núcleo estará disponível.

A utilização de todos os núcleos do *ARM* disponíveis é especialmente importante devido ao fato de partes do programa serem executadas em *threads* separadas, as quais somente podem ser atribuídas a diferentes núcleos se esses estiverem disponíveis. De outra forma,

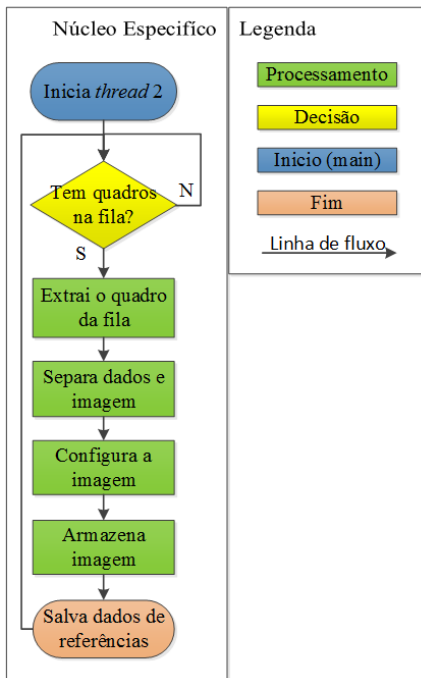
todas as *threads* seriam executadas intercaladamente, prejudicando o desempenho geral do sistema.

No desenvolvimento do núcleo de *software* específico, para manter a versatilidade, permitindo que vários formatos de imagem fossem testados, optou-se pela utilização da biblioteca de desenvolvimento aberto para visão computacional (OpenCV), uma biblioteca multiplataforma muito utilizada no tratamento e armazenamento de imagens (ITSEEZ, 2015). Essa biblioteca é utilizada para simplificar as atividades de compressão, formatação e armazenamento das imagens.

Com a utilização da biblioteca mencionada foi necessária a adição de duas operações no algoritmo do núcleo específico de *software*, como pode ser observado na

figura 21 essas operações são: a configuração da imagem para o formato desejado e o armazenamento desta.

Figura 21 - Algoritmo do núcleo específico do sistema de armazenamento de imagens baseado em *ARM*.



Fonte: Desenvolvido pelo autor

O sistema de armazenamento apresenta as seguintes vantagens em relação as demais soluções desenvolvidas:

- possibilidade de visualização da superfície real do duto, permitindo ao operador esclarecer visualmente possíveis dúvidas em relação à medição;
- menor exigência de *hardware* específico, possibilitando que o desenvolvimento deste não seja necessário.

O sistema apresenta ainda as seguintes desvantagens em relação as demais soluções desenvolvidas:

- autonomia limitada pela unidade de armazenamento;
- desgaste acelerado da unidade de armazenamento;
- aumento do tempo total de medição, após a medição é preciso realizar a transferência de uma grande quantidade de dados para o computador, e somente então realizar o processamento destes dados.

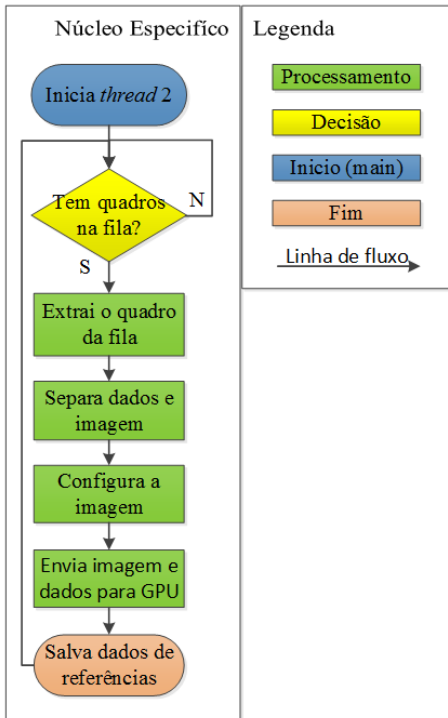
4.2 SISTEMA DE PROCESSAMENTO BASEADO EM *CPU+GPU*

A utilização de um sistema de processamento de imagens tem como objetivo a substituição de todas as atividades do computador. Nesse sistema, as imagens devem ser processadas, armazenando os dados e resultados necessários para a análise do duto, e descartadas.

A figura 22 apresenta o algoritmo do núcleo específico do software executado pela porção *ARM* da plataforma. É possível observar que a única tarefa adicionada ao núcleo específico é o envio de imagem e dados à *GPU* para processamento, no qual são utilizadas as mesmas funções desenvolvidas para uso em computadores com pequenas alterações para o funcionamento na plataforma em questão.

O algoritmo da porção *CUDA* do software pode ser visualizado na figura 23, onde é possível verificar que embora na figura 22 a tarefa do *ARM* no processamento tenha sido resumida como “envia imagem e dados para *GPU*”, ele é de vital importância na execução das funções em *CUDA*.

Figura 22 - Algoritmo executado pela porção *ARM* do sistema de processamento em *CPU+GPU*.



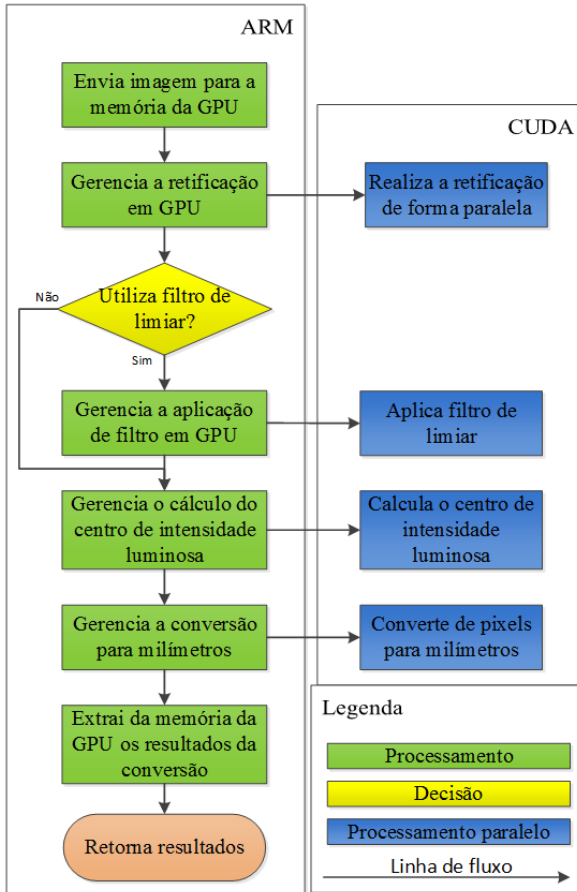
Fonte: Desenvolvida pelo autor.

A *GPU* deve receber instruções e dados do *ARM* para funcionar, essa atividade foi resumida na figura 23 como gerenciamento, pelo qual deve ser entendida toda a parte do código que: envia os dados necessários a *GPU*, configura o número de núcleos *CUDA* a serem utilizados, qual algoritmo deve ser executado e aguarda a finalização da execução em *GPU*. Os resultados das funções em *CUDA* permanecem na memória da *GPU* até que sejam deliberadamente removidos pelo *ARM*.

Esse sistema tem como saída dois arquivos em formato de texto formatado, um dos arquivos é preenchido com os dados de inclinação e posição relativa, o segundo é preenchido com os resultados dos raios calculados. Uma vez que o número de dados no arquivo que armazena os resultados é muito grande, o que torna o carregamento deste no computador para posterior análise lento, foi necessária à utilização de

um arquivo para cada mil medições, estratégia aplicada aos dois arquivos.

Figura 23 - Algoritmo de processamento em *CUDA*.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

A principal vantagem desta solução em relação às demais soluções desenvolvidas é a compatibilidade da linha de pesquisa com a configuração atual.

O sistema apresenta ainda as seguintes desvantagens em relação às demais soluções desenvolvidas:

- a necessidade de desenvolvimento de um *hardware* específico que seja habilitado para o uso de *CUDA* tornando a solução dependente de uma única empresa (NVIDIA);
- a plataforma utilizada apresenta o uso de dissipação ativa (dissipador de calor mais ventilação forçada), indicando aquecimento dos elementos envolvidos. Característica não desejável a sistemas que trabalham em ambiente fechado.

4.3 SISTEMA DE PROCESSAMENTO BASEADO EM *CPU+FPGA*

Devido à necessidade maior de tempo de desenvolvimento para este sistema, a porção do software executada pelo *FPGA* foi desenvolvida por uma equipe externa ao projeto por meio de contratação de serviço especializado.

A integração entre o módulo *FPGA* e o *ARM* deve ser realizada através da configuração das pontes de comunicação existentes no *SoC*. Devido à configuração das pontes de comunicação não ter sido efetuada, somente a porção *FPGA* será testada.

Uma vez que esse sistema deve utilizar o mesmo núcleo de aquisição dos demais sistemas, esta parte do algoritmo será considerada validada. Entretanto, é possível que, devido à existência de apenas dois núcleos de processamento no *ARM*, o algoritmo do software executado por este tenha de ser alterado, uma vez que é executado em, ao menos, três *threads*.

Na porção *FPGA* do sistema devem ser instanciados módulos que são responsáveis por executar a retificação e cálculo do centro de intensidade luminosa da imagem. Como o processamento de uma imagem ocupa muita memória, esses módulos foram desenvolvidos para acessar uma memória externa a ele, podendo esta ser interna ou externa ao *FPGA*.

Cada módulo de processamento instanciado no *FPGA* é dividido em seis máquinas de estado finito. As três primeiras máquinas são responsáveis pelo cálculo da imagem retificada, no momento em que terminam as suas atividades elas enviam para a próxima máquina os dados necessários e iniciam a execução de novos dados.

As máquinas restantes realizam operações referentes a aplicação do filtro de limiar e cálculo do centro de intensidade luminosa.

O resultado da última máquina deve ser acessado pelo *ARM* e a memória correspondente liberada para a utilização por novos blocos de processamento.

Dessa forma vários módulos podem ser instanciados trabalhando de forma paralela, como se houvessem inúmeras *CPU* processando diferentes imagens. Essa é uma solução escalar, a medida que o número de módulos instanciados é dependente do desempenho requerido.

Nesta solução, é o *ARM* quem realiza a conversão dos resultados de pixel para milímetro através do polinômio de calibração.

Este sistema apresenta as seguintes vantagens em relação as demais soluções desenvolvidas:

- determinismo;
- a pesquisa realizada no capítulo 3 indica que sistemas como esse possuem menor consumo de energia;
- a plataforma escolhida não possui dissipadores, indicando menor aquecimento.

As maiores desvantagem deste sistema são o tempo de desenvolvimento e adaptação do *software* e o erro introduzido pela conversão de ponto flutuante já que existem cálculos intermediários que fazem uso desta representação.

4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DESENVOLVIDOS NOS REQUISITOS METROLÓGICOS

Ao analisar os módulos do sistema atual, apresentados na figura 24 e comparar aos módulos dos sistemas desenvolvidos, apresentados na figura 25, é possível observar que os três primeiros elementos permaneceram inalterados. As alterações foram a substituição do computador pelo sistema embarcado e a inclusão da unidade de armazenamento.

Figura 24 - Configuração do sistema atual.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Figura 25 – Configuração básica dos sistemas desenvolvidos.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

A seguir são analisadas as soluções desenvolvidas em relação a influência de cada alteração nos requisitos metrológicos.

4.4.1 Sistema de armazenamento de imagens baseado em ARM

A função do sistema desenvolvido é unicamente de armazenar as imagens adquiridas. Sendo assim a plataforma não realiza alterações na imagem em questão, não inserindo fontes de incerteza à imagem. Entretanto é possível que falhas levem à perda de quadros, dentre elas destaca-se:

- instabilidade do sistema operacional – por se tratarem de sistema operacionais para uso específico, ele não pode ser considerado um sistema isento de falhas. É possível que existam falhas que não tenham sido corrigidas;
- software desenvolvido – assim como o sistema operacional, é possível que existam exceções e falhas não tratadas, ainda presentes no software desenvolvido;
- redução da capacidade computacional – causas diversas podem levar à redução da capacidade computacional, a qual poderia acarretar o mau funcionamento do sistema;
- aquecimento – o superaquecimento do sistema é uma das causas que podem causar a redução da capacidade computacional, além de poder causar o desligamento total do sistema.

É importante reforçar que a ocorrência dos problemas mencionados teria pouca ou nenhuma influência sobre a representação da imagem. Elas são causadoras de perda de quadros representando maior impacto na característica de confiabilidade do sistema.

Ao analisar a incerteza inserida às medições de posição, é possível identificar que além dos problemas já mencionados, que poderiam também causar a perda de dados de posição, existe a possibilidade de que esses dados sejam corrompidos durante a leitura dos registradores. Nesse caso, seriam geradas falsas informações, e o resultado das medições seria alterado, pois a inclinação é utilizada como parâmetro no processamento da imagem e a posição utilizada como referência na montagem do modelo tridimensional do duto.

Também é possível, que esses dados de posição sejam associados à imagem errada, novamente gerando os problemas anteriormente mencionados.

Ao analisar a contribuição da unidade de armazenamento na incerteza, é possível observar que assim como a influência exercida pela plataforma, a sua influência é maior na característica de confiabilidade. Defeitos fariam com que as imagens e dados fossem corrompidos não permitindo a sua leitura pelo computador, sem alterar os dados das medições.

A degradação da unidade de armazenamento faz com que a velocidade de armazenamento seja alterada, além de inserir erros nesta que podem corromper arquivos e gerar as falhas citadas. Além disso, existe a possibilidade de redução da velocidade de gravação devido ao número de arquivos por pasta, sendo que o sistema deve procurar no arquivo de paginação se não existe um nome igual ao utilizado. Também existem relatos de redução de velocidade de gravação devido a ocupação. Ambos os fatores devem ser considerados nos testes de desempenho do sistema.

4.4.2 Sistema de processamento baseado em *CPU+GPU*

Neste sistema, a porção de software executada em *GPU* é a mesma utilizada em computador. Erros devido ao aparecimento de resultados divergentes entre as plataformas são extremamente improváveis, entretanto, uma vez que o sistema operacional e os *drivers* utilizados na plataforma são experimentais, é possível que existam defeitos de software ainda não corrigidos que possam causar o mal funcionamento do conjunto.

Além disso, o software ainda está sujeito ao mal funcionamento geral do sistema pelas causas mencionadas na análise do sistema de armazenamento.

4.4.3 Sistema baseado em *CPU+FPGA*

Uma vez que o *ARM* utilizado possui especificações de hardware menos robustas e o sistema operacional utilizado possui uma característica experimental ainda maior do que o sistema anterior, as características de: instabilidade do sistema operacional, redução da capacidade computacional e superaquecimento, também apresentadas pelo sistema de aquisição de imagens, são de maior importância nesse sistema.

Embora não exista comunicação *SATA* na plataforma Helio, o que faria com que a comunicação entre unidade de armazenamento e plataforma fosse realizada via *USB*, entende-se que essa é uma plataforma de avaliação apenas, em um sistema final essa interface de comunicação seria adicionada eliminando o possível gargalo de comunicação.

A porção *FPGA* do algoritmo foi desenvolvida especialmente para esse sistema, possibilitando a existência de erros e situações ainda não tratadas. Essa possibilidade é reduzida pelo fato de o *FPGA* apresentar características determinísticas muito fortes e o algoritmo geral utilizado para geração do VHDL (Linguagem de descrição de hardware) ter sido exaustivamente testado no software Matlab antes da implementação. São essas características determinísticas que fazem com que a redução da capacidade de processamento das imagens em *FPGA* seja improvável.

A característica mais importante a ser avaliada neste sistema é o erro introduzido aos cálculos devido à conversão dos números de ponto flutuante para ponto fixo. Neste sistema foi utilizada uma conversão através de um *shift register* de 16 bits.

5 AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Para permitir que os sistemas desenvolvidos sejam comparados, foram realizados testes para verificação da capacidade de atendimento do requisito de tempo real e de confiabilidade do sistema.

Na avaliação do requisito de tempo real, foi medido o desempenho do sistema na tarefa de armazenamento ou processamento das imagens. Para esses testes, o desempenho nominal do sistema em teste foi determinado através do valor mínimo medido, sendo necessário que este, esteja acima de 50 Hz.

Na avaliação de confiabilidade, os sistemas desenvolvidos foram submetidos a um ambiente aquecido, onde é esperado que exista uma redução da capacidade computacional do sistema e aparecimento de falhas. Durante esses testes foi analisada a capacidade do sistema de manter o funcionamento esperado.

Devido ao principal requisito deste trabalho, o aumento de autonomia, ser limitado pela alimentação dos sistemas embarcados, foram realizados testes para avaliação da potência consumida. Esta avaliação foi realizada tendo como base os sistemas funcionando em temperatura ambiente e no ambiente aquecido proposto pelo teste de confiabilidade. Esta abordagem permite a estimativa de influência da temperatura sobre o consumo do sistema.

5.1 TESTES DE DESEMPENHO DE ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Esses testes avaliam a velocidade máxima de armazenamento ou processamento das imagens. Para isto, um único quadro, anteriormente capturado pela câmera e armazenado no disco, foi utilizado repetidas vezes. O desempenho dos sistemas foi medido através do tempo necessário para esses atuarem mil vezes sobre a imagem.

Esta abordagem permite que a capacidade máxima do sistema seja medida sem a restrição imposta pela velocidade de aquisição da câmera. Entretanto, não considera se o adaptador de rede utilizado seria capaz de lidar com o fluxo de dados necessário.

5.1.1 Sistema de armazenamento de imagens baseado em *ARM*

Antes de realizar os testes de armazenamento, foi preciso optar pelo formato padrão a ser utilizado pelas imagens armazenadas. Para isso, foram executados cinco testes na taxa de armazenamento e

conversão das imagens geradas pela câmera em PNG, TIFF e BMP, formatos sem perdas. O quadro 4 apresenta o resultado desses testes com a utilização de um *HDD* Samsung 500 GB (SAMSUNG, 2012) e um *SSD* Samsung EVO 840 de 250 GB (SAMSUNG, 2013). A repetibilidade foi calculada através da multiplicação do *t* de Student para 95,45% de confiabilidade e o desvio padrão de 5 medições.

Quadro 4 - Resultados do teste de armazenamento para formatos sem perda.

	<i>HDD</i> [Hz]	<i>SSD</i> [Hz]	Tamanho [kB]
PNG	34,25 ± 0,74	34,77 ± 0,20	239
BMP	82 ± 11	219,4 ± 5,6	1026
TIFF	57,3 ± 4,3	62,2 ± 1,4	229

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

No quadro 4, é possível verificar que somente o formato PNG não seria capaz de atingir o valor mínimo de 50 Hz. Também é possível observar a diferença no tamanho final da imagem após compressão.

No caso do uso do formato BMP, cujas imagens são de aproximadamente 1 MB, seria preciso no mínimo 1 TB para cobrir a distância mínima requerida pelos requisitos de projeto.

Ainda no esforço de definir um formato padrão para o armazenamento das imagens, foram realizados testes no formato JPEG com diferentes qualidades de compressão¹⁰. Uma vez que o formato JPEG possui uma compressão com perdas, as imagens foram processadas em computador e o resultado foi comparado ao resultado gerado por imagens no formato BMP para analisar o impacto da conversão nas medições, o quadro 5 apresenta esses dados.

Quadro 5 - Resultado dos testes de armazenamento com JPEG para diferentes qualidades de compressão.

	100%	95%	90%	80%	70%	60%
<i>HDD</i> [Hz]	50,0 ± 1,5	79,1 ± 3,8	88,1 ± 2,4	91,2 ± 3,0	92,3 ± 1,0	92,6 ± 3,3
<i>SSD</i> [Hz]	48,1 ± 3,2	79,9 ± 1,5	89,94 ± 0,33	91,52 ± 0,58	92,68 ± 0,08	90,92 ± 0,31
Maior desvio [mm]	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,10

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

¹⁰ A qualidade de compressão neste caso, é um estimativa grosseira de qual será o percentual de preservação dos detalhes da imagem (CHAPTER, 2015).

Como é possível observar no quadro 5, a velocidade de conversão não é um fator tão importante quanto à degradação da imagem. No caso de 95% da qualidade original, padrão utilizado pelo OpenCV, houve uma diferença máxima de 0,06 mm entre os resultados. Nem mesmo utilizando uma conversão com “100% da qualidade” foi possível obter o mesmo resultado do formato BMP. Por apresentar impacto nas características metrológicas do sistema o formato JPEG foi rejeitado.

A utilização do formato TIFF parece ser possível, mas, devido ao resultado superior do BMP, este foi escolhido como padrão para as imagens adquiridas pelo perfilômetro, tornando a autonomia altamente dependente do espaço de armazenamento.

Os testes para avaliação do desempenho do sistema de armazenamento de imagens foram executados em duas plataformas, uma equipada com o *SSD* enquanto a outra foi equipada com o *HDD* em que foi utilizada somente uma partição de 250 GB. Esses testes foram conduzidos de forma que permitisse a visualização dos efeitos da ocupação e da quantidade de arquivos por pasta na velocidade de gravação.

Para isso foram executados testes de armazenamento de uma mesma imagem com 1 mil, 5 mil, 10 mil, 25 mil, 50 mil, 75 mil, 100 mil e 221 mil arquivos por pasta, até o limite de 221 mil arquivos (aproximadamente 100% de ocupação). Cada um desses testes foi repetido seis vezes.

É possível observar no quadro 6 que em nenhum dos testes utilizando o *HDD* a velocidade de gravação ficou abaixo do valor mínimo desejado.

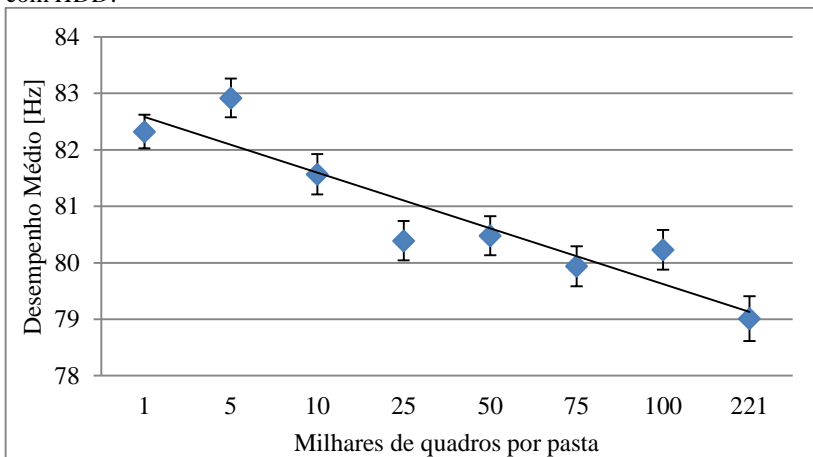
Quadro 6 - Resultados dos testes de armazenamento de imagens com *HDD*.

	Média [Hz]	Desv. Padrão [Hz]	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]
1 k	82,3	4,9	66,6	95,3
5 k	82,9	5,7	67,0	95,9
10 k	81,6	5,9	66,7	97,0
25 k	80,4	5,8	66,3	94,5
50 k	80,5	5,7	65,9	94,8
75 k	79,9	5,9	66,3	95,3
100 k	80,2	5,8	64,0	95,8
221 k	79,0	6,6	60,2	96,1

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Na figura 26 é possível observar uma pequena tendência de queda da velocidade média de armazenamento de acordo com o aumento do número de arquivos por pasta, destacada pela linha de tendência linear. Entretanto, a queda do valor médio não possibilita a distinção de qual o efeito causador e qual a intensidade de cada efeito, não permitindo a avaliação real dos problemas mencionados.

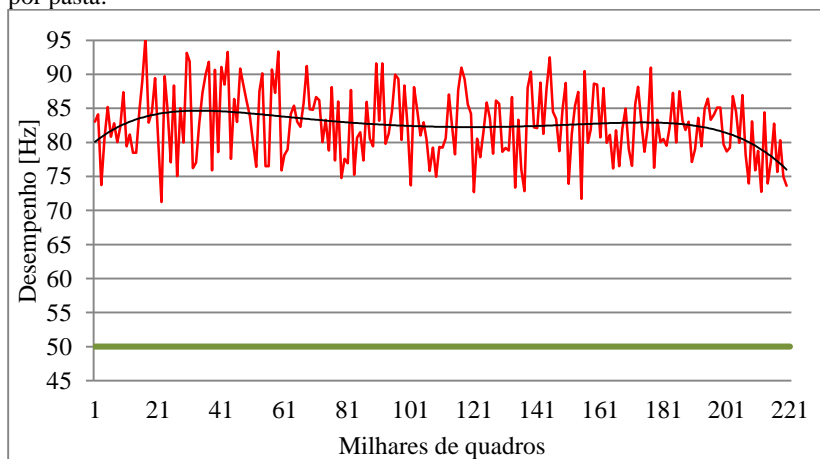
Figura 26 - Gráfico dos resultados dos testes de armazenamento de imagens com *HDD*.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

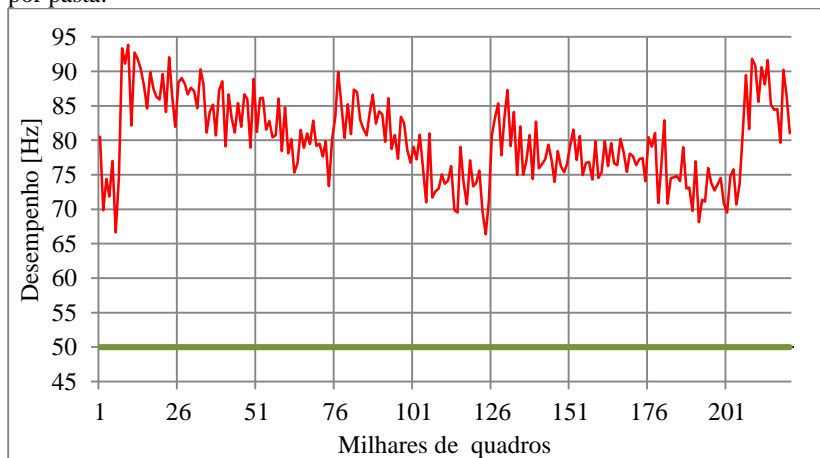
Para que se possa analisar o impacto do preenchimento do *HDD* e do número de arquivos por pasta, é necessário comparar os gráficos gerados através dos testes de armazenamento. Para isso, foram escolhidos: um gráfico de velocidade de armazenamento de mil arquivos por pasta, um de 25 mil arquivos por pasta e um onde os 221 mil arquivos foram armazenados em uma única pasta. Esses gráficos são apresentados nas figuras 27, 28 e 29 respectivamente. A linha verde destaca o resultado mínimo aceitável.

Figura 27 - Gráfico de um teste de armazenamento com *HDD* e mil arquivos por pasta.



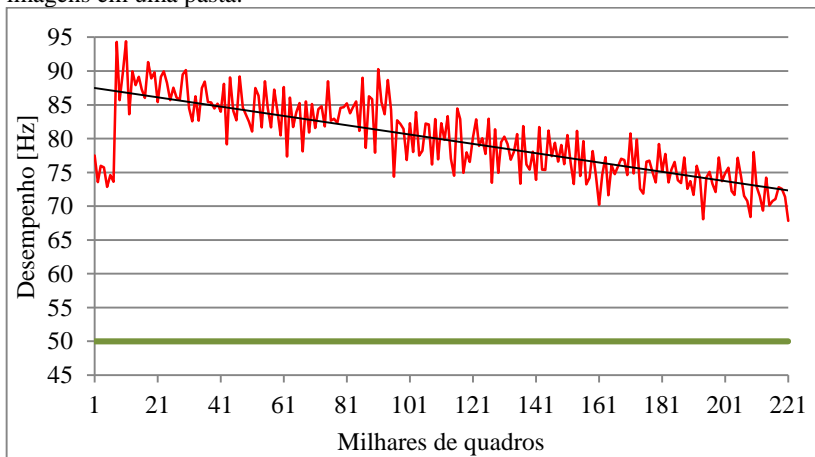
Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Figura 28 - Gráfico de um teste de armazenamento com *HDD* e 25 mil imagens por pasta.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Figura 29 - Gráfico de um teste de armazenamento com *HDD* e todas as imagens em uma pasta.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

No caso de mil arquivos por pasta é possível observar, através da linha de tendência, um possível efeito da ocupação no armazenamento dos arquivos finais, algo que poderia ser facilmente evitado através da reserva de uma parte da capacidade do *HDD*. Nos outros gráficos não foi possível distinguir uma tendência de queda na velocidade de armazenamento devido à ocupação.

A queda de velocidade devido ao número de arquivos por pasta por outro lado, parece possuir maior relevância. É possível observar a acentuada tendência de queda no gráfico da figura 29, onde todos os arquivos estão em uma mesma pasta. O formato semelhante a “dentes de serra” na figura 28, também indica uma tendência de queda da velocidade de armazenamento de acordo com o número de arquivos por pasta, sendo que, embora não ocorram picos de desempenho em todas as alterações de pasta, é possível verificar que os picos que ocorrem parecem ter uma relação com essa troca. Em *HDDs* de maior capacidade, é possível que esse fator se apresente com maior intensidade, especialmente se os arquivos não forem separados em pastas.

Em relação aos testes com o *SSD*, é possível observar no quadro 7 que a velocidade mínima de armazenamento ficou acima do valor mínimo desejado, mas que o desvio padrão no caso do *SSD* é maior do que o encontrado no *HDD*.

Quadro 7 - Resultados dos testes de armazenamento de imagens com *SSD*.

	Média [Hz]	Desv. Padrão [Hz]	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]
1 k	196	37	105	227
5 k	201	28	115	227
10 k	200	28	112	226
25 k	201	26	114	227
50 k	200	27	111	227
75 k	198	28	112	226
100 k	200	26	115	226
221 k	198	25	118	225

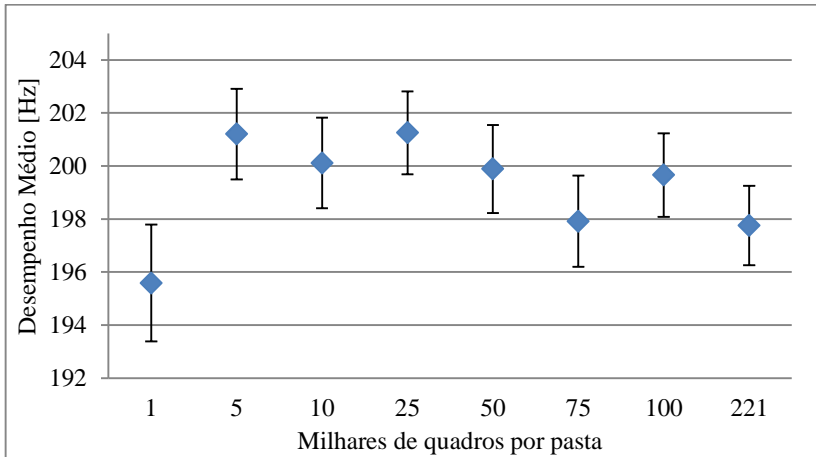
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

No gráfico da figura 30, é possível visualizar que a tendência de queda da média da velocidade de armazenamento de acordo com o número de arquivos por pasta não parece ser válida para o uso de *SSD*.

É possível verificar que o pior caso para o *SSD* parece ser quando são utilizados mil arquivos por pasta, não foi encontrada uma explicação plausível para tal resultado.

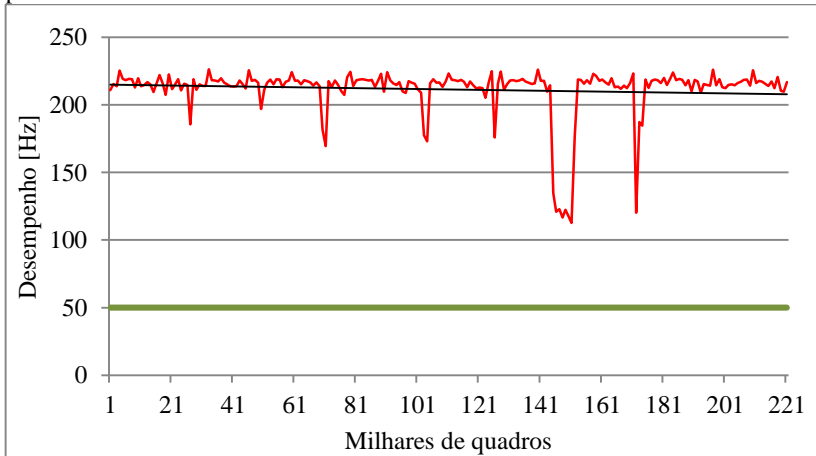
Através dos gráficos das figuras 31, 32 e 33, é possível verificar que a tendência da velocidade de gravação é de permanecer constante e apresentar rápidas quedas de velocidade, as quais não possuem padrão discernível e são responsáveis pelo alto desvio padrão encontrado nas medições. Mesmo considerando essas variações, para qual não foi encontrada uma explicação comprovada metrologicamente, o valor mínimo requerido do armazenamento é inferior ao valor mínimo alcançado. Para o *SSD* também não foi possível verificar redução da velocidade de armazenamento por ocupação.

Figura 30 - Gráfico dos resultados dos testes de armazenamento de imagens com *SSD*.



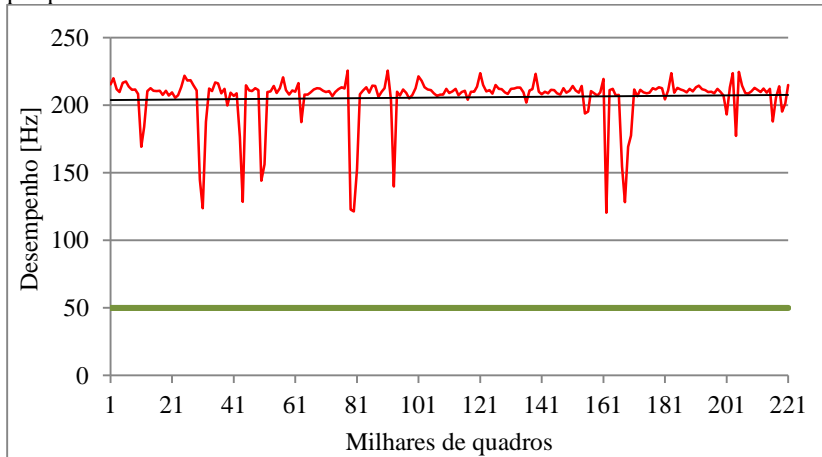
Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Figura 31 - Gráfico de um teste de armazenamento com *SSD* e mil imagens por pasta.



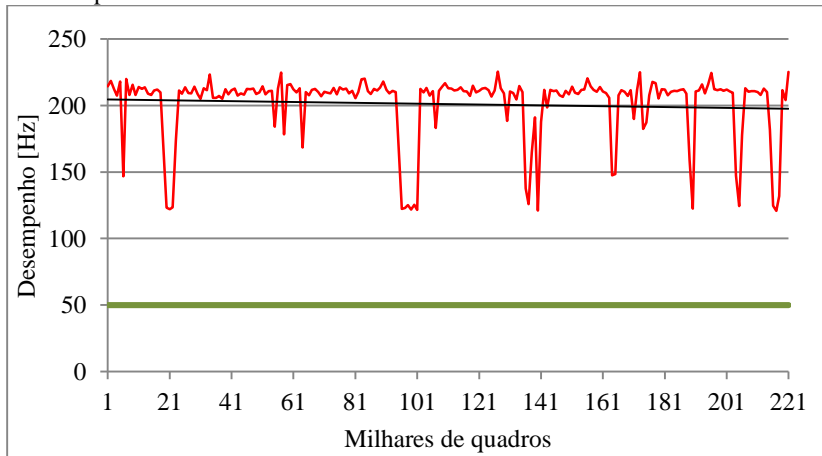
Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Figura 32 - Gráfico de um teste de armazenamento com *SSD* e 25 mil imagens por pasta.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Figura 33 - Gráfico de um teste de armazenamento com *SSD* e todas as imagens em uma pasta.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Por apresentar melhores resultados de velocidade de gravação nos testes, optou-se pela utilização somente do *SSD* nos outros testes. Essa decisão também levou em conta o fato de *SSDs* apresentarem consumo menor do que *HDDs* convencionais e não possuírem partes móveis

como os *HDDs* convencionais, reduzindo assim os problemas causados por vibrações e desgaste mecânico.

Para os testes seguintes deste sistema, optou-se pela utilização da gravação de 5 mil imagens por pasta.

5.1.2 Sistema de processamento baseado em *CPU+GPU*

Os testes do sistema de processamento foram realizados de forma a permitir a avaliação da velocidade máxima de processamento das imagens em *GPU*, para isso uma mesma imagem foi enviada para processamento de forma contínua até que fosse atingido o limite de 1 milhão de imagens. Esse teste foi executado três vezes em cada uma das duas plataformas. O tempo necessário para processamento de cada mil imagens foi utilizado para calcular o número de quadros por segundo. Os resultados do processamento da imagem foram armazenados no *SSD* anteriormente citado.

O quadro 8 apresenta os resultados dos testes de velocidade de processamento em *GPU*. O resultado geral é a análise combinada de todos os dados obtidos.

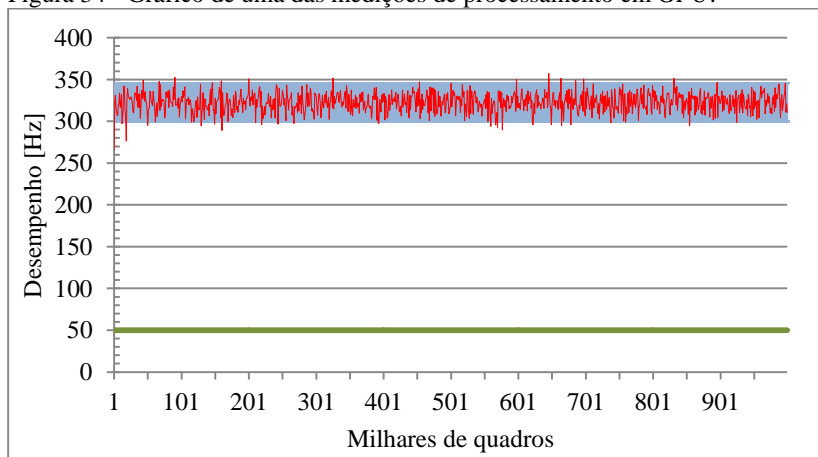
Quadro 8 - Resultado do teste de velocidade de processamento em *GPU*.

	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]
Teste 1	317	12	259	352
Teste 2	323	11	267	357
Teste 3	323	13	267	367
Teste 4	323	12	250	358
Teste 5	324	12	265	360
Teste 6	321	12	285	364
Geral	322	12	250	367

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Analisando o gráfico da figura 34 construído a partir dos dados de um dos testes, é possível verificar que o comportamento do algoritmo de processamento é constante e praticamente, seis vezes mais rápido do que o mínimo requerido. Nesse gráfico a área em azul representa a região de 95,45% de confiabilidade do resultado.

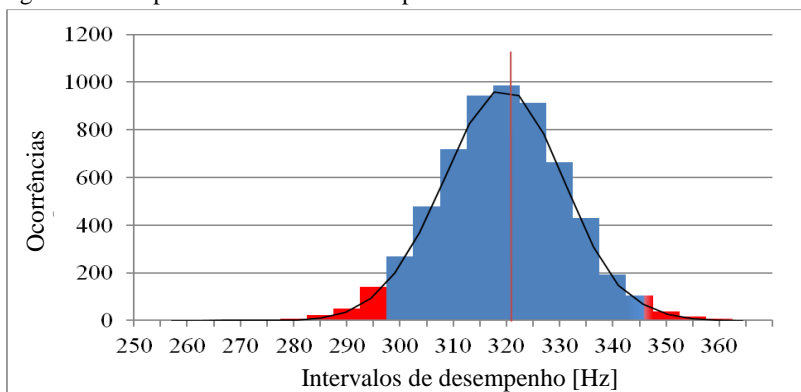
Figura 34 - Gráfico de uma das medições de processamento em *GPU*.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

No histograma da dispersão da velocidade de processamento em *GPU*, figura 35, observa-se que as variações da velocidade de processamento são aleatórias com distribuição muito próxima da normal. Nessa figura, a linha vermelha representa a média e as regiões vermelhas os resultados fora do limite de confiabilidade de 95,45%.

Figura 35 - Dispersão da velocidade de processamento em *GPU*.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Sendo a distribuição de probabilidade dos resultados desse sistema uma distribuição normal, é possível determinar o desempenho do sistema como sendo (322 ± 24) Hz para 95,45% de confiabilidade.

Todavia, como mencionado anteriormente, o valor mínimo obtido foi considerado como valor mais representativo para o desempenho devido à necessidade de processamento em tempo real.

A comparação entre uma mesma imagem processada no computador e em seguida no sistema embarcado desenvolvido retornou resultados com discrepâncias a partir da terceira casa decimal, podendo em alguns casos gerar o máximo de 0,01 mm de desvio devido ao arredondamento para o resultado em duas casas decimais, resultado considerado adequado.

Cada seção processada adiciona aproximadamente 16 kB ao arquivo onde são armazenados os resultados. Uma redução de 64 000%, sendo necessário um espaço de armazenamento de apenas 14 GB para armazenar os novecentos metros requeridos pelo projeto.

5.1.3 Sistema de processamento baseado em *CPU+FPGA*

Como mencionado anteriormente, não foi possível finalizar o desenvolvimento do sistema em questão, por esse motivo o único teste que pode ser realizado foi para verificar a velocidade que o módulo desenvolvido em *FPGA* é capaz de processar os quadros.

FPGA possuem uma importante característica determinística permitindo que dados obtidos a partir de simulação representem de forma satisfatória o desempenho do sistema final. Foram essas simulações que permitiram a elaboração da equação 1 que descreve a capacidade de processamento do sistema em termos de módulos de processamento instanciados e frequência de operação desejada. Esta equação foi obtida através da análise do tempo necessário para um módulo executar o processamento de uma imagem em função da frequência de operação utilizada.

$$Desempenho_{max} = 0.2084 \times f \times n \quad (1)$$

Em que f é a frequência dos módulos em MHz e n é o número de módulos de processamento instanciados.

Para a implantação de cada módulo de processamento é necessário o uso de aproximadamente 7 mil elementos lógicos e mais mil elementos para a lógica de interligações. A plataforma escolhida disponibiliza aproximadamente 110 mil elementos lógicos permitindo a instanciação de treze módulos de processamento na frequência máxima de 200 MHz (segundo os dados da folha de especificações do produto). Possibilitando a máxima velocidade de processamento teórica de

541 Hz. Entretanto, essa velocidade só pode ser alcançada com o uso de memória exclusiva para o *FPGA*. O uso de memória compartilhada com o *ARM*, como acontece na plataforma escolhida, gera competição no acesso a esta, gerando um gargalo não determinístico.

A configuração mais recomendada para esse sistema seria a instanciação de no máximo oito módulos e utilização na frequência de 100 MHz, com o uso de uma memória DDR3 com frequência superior a 800 MHz diretamente no *FPGA* o que traria um comportamento determinístico ao sistema. Nessa configuração seria possível alcançar um desempenho teórico de 166 Hz, um resultado ainda muito superior ao mínimo desejado ao sistema.

Resultados ainda melhores podem ser alcançados com esse mesmo algoritmo em sistemas cuja memória interna seja capaz de lidar com os dados requeridos ou que possuam mais elementos lógicos e possibilitem a utilização de mais controladores de memória.

Uma comparação entre os resultados obtidos pelo *FPGA* e os resultados obtidos pelo sistema atual apresentou diferença máxima no valor do raio medido de 0,17 mm. Esse desvio se dá devido à conversão de ponto flutuante por *shift register* de 16 bits, seria possível reduzir esse desvio através do aumento do número de bits pra 32 bits ou 64 bits. Essa alternativa não foi implementada.

5.2 TESTES DE ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM TEMPERATURA AMBIENTE

Esses testes foram realizados no intuito de verificar a ocorrência de falhas durante a execução dos *softwares* em questão. Para isso, os sistemas de aquisição e processamento de imagens desenvolvidos na plataforma Jetson TK1 foram dispostos de acordo com a figura 36, onde foi utilizado um gerador de função e um circuito desenvolvido para simulação de um sinal de hodômetro com velocidade controlada pela frequência de entrada.

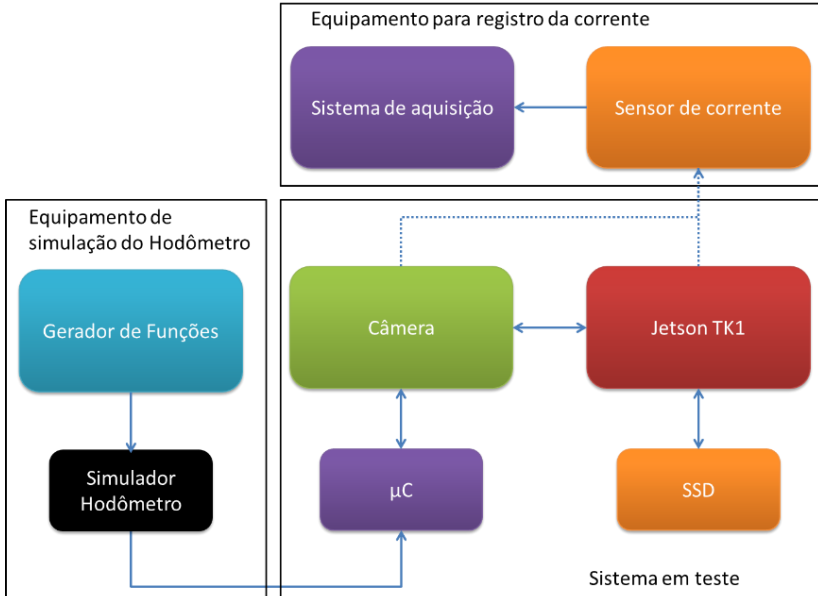
Também pode ser observado na figura 36 que para medição e registro da corrente foi utilizado um equipamento de aquisição de dados equipado com um módulo multiplexador. O sensor de corrente escolhido é baseado no princípio Hall e tem saída em corrente, necessitando de um resistor *shunt*¹¹ para que seja medida a tensão

¹¹ Neste caso o resistor *shunt* pode ser considerado um resistor de valor bem conhecido utilizado para medição de corrente através da tensão proporcional a passagem desta.

proporcional. Esse sistema foi utilizado para medir as correntes do sistema embarcado e da câmera em momentos distintos.

Foram realizadas cinco repetições de 230 mil imagens em cada um dos sistemas. Durante a execução desses testes foi registrada a corrente na entrada da plataforma. A tensão foi considerada constante em $(12,0 \pm 0,5) \text{ V}$, de acordo com os dados do fabricante.

Figura 36 - Montagem do equipamento de testes.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Para todas as medições de corrente o sistema foi configurado da mesma maneira e para o mesmo intervalo de medição. No quadro 9 são apresentados os equipamentos utilizados e as incertezas especificadas.

A incerteza do sistema de medição de corrente foi calculada através da propagação das incertezas e considerada desprezível em comparação aos desvios padrões das medições efetuadas.

Quadro 9 - Equipamento utilizados nas medições de corrente.

	Equipamento	Faixa de medição	Incerteza especificada
Sistema de aquisição	Agilent 34972A ^a	± 1 V	$\pm (0,0040 + 0,0007)$ ^c
Módulo multiplexador	Agilent 34902A ^a		
Sensor de corrente	LA-25 ^b	± 7 A	$\pm 0,025$ A
Resistor <i>shunt</i>	TC2 -100 Ω		$\pm 0,10$ Ω

^a = (AGILENT TECHNOLOGIES, 2012)
^b = (LEM, 2015)
^c = % da leitura + % da faixa

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

5.2.1 Sistema de aquisição e armazenamento de imagens

Esse sistema não apresentou problemas durante nenhum dos testes. As pastas foram verificadas e nenhuma das imagens foi perdida. Os dados de posição e inclinação também foram registrados.

O resumo dos dados de corrente registrados durante esses testes pode ser observado no quadro 10.

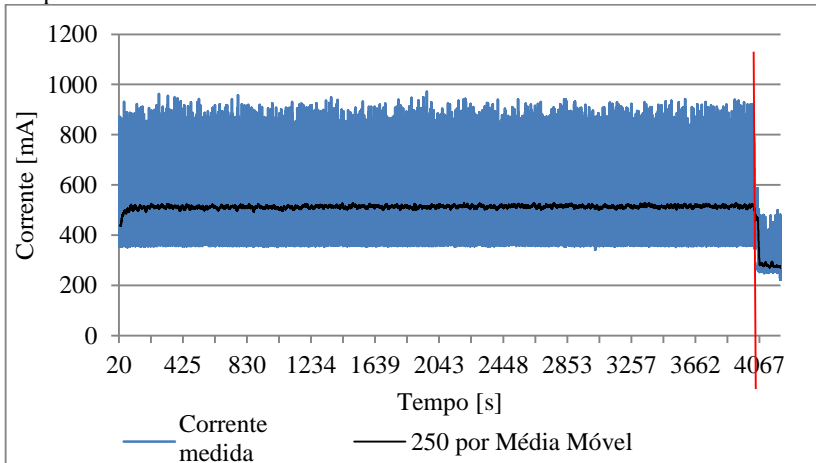
Quadro 10 - Resumo dos dados de corrente do sistema de armazenamento de imagens em temperatura ambiente.

Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
1,04 A	0,341 A	0,53 A	0,12 A

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O gráfico da figura 37 apresenta os dados de corrente em função do tempo obtidos durante um dos testes. É possível observar o momento em que o SSD não possui mais espaço para armazenamento e o programa continua a execução, esse momento é marcado por uma rápida redução na corrente média e destacado pela linha vertical vermelha. Em preto é apresentada a média móvel de 250 pontos, utilizada para melhor visualização da corrente média durante a execução do teste.

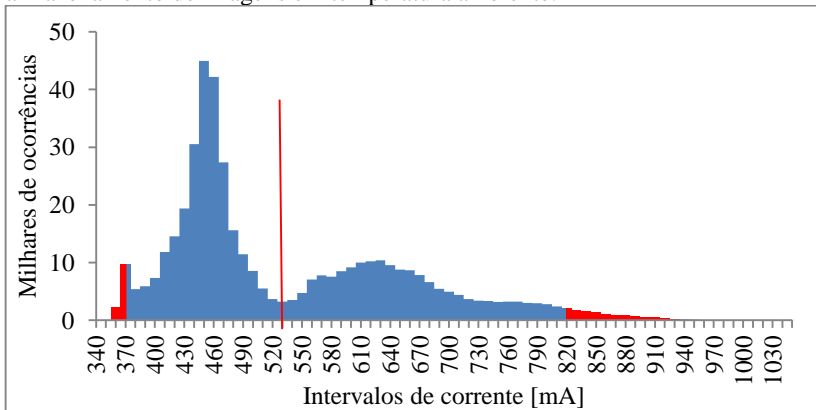
Figura 37 - Gráfico da corrente do sistema de armazenamento de imagens em temperatura ambiente.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

As medições de corrente apresentam uma distribuição de probabilidade conforme o histograma da figura 38. Uma vez que não se trata de uma distribuição normal, o histograma foi utilizado para determinar que a corrente para esse sistema está entre 368 mA e 819 mA com nível de confiança de 95,45%.

Figura 38 - Distribuição de probabilidade da corrente no sistema de armazenamento de imagens em temperatura ambiente.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

A corrente média foi determinada através da média das médias obtidas pelos cinco testes, sendo essa de (530 ± 45) mA.

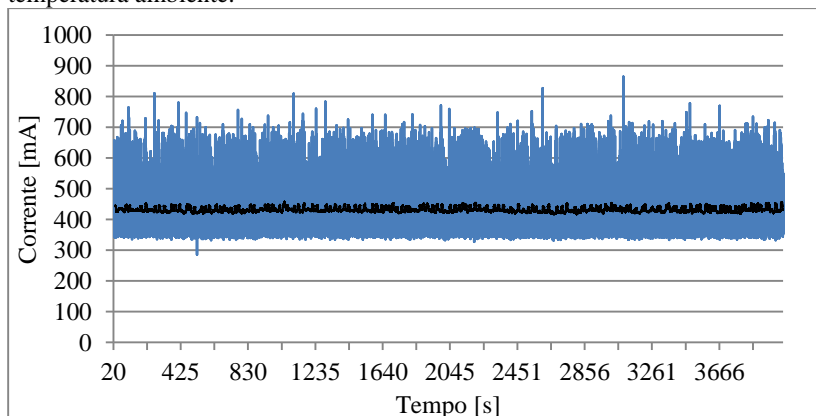
A corrente média é um importante dado para o cálculo do consumo médio do sistema e determinação da autonomia do mesmo. Entretanto, é preciso que o sistema de alimentação escolhido seja capaz de fornecer a corrente especificada em qualquer dado momento. O consumo médio desse sistema é obtido pela multiplicação da corrente média e tensão média, sendo de $(6,36 \pm 0,66)$ Wh.

5.2.2 Sistema de processamento baseado em CPU+GPU

Esse sistema, assim como o anterior, não apresentou problemas durante nenhum dos testes, todos os arquivos foram gerados e os dados adquiridos foram considerados coerentes.

O gráfico da figura 39 apresenta os dados obtidos durante um dos testes, novamente a linha preta representa a medida móvel de 250 pontos.

Figura 39 - Gráfico da corrente do sistema de processamento de imagens em temperatura ambiente.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

O resumo dos dados de corrente registrados durante esses testes pode ser observado no quadro 11.

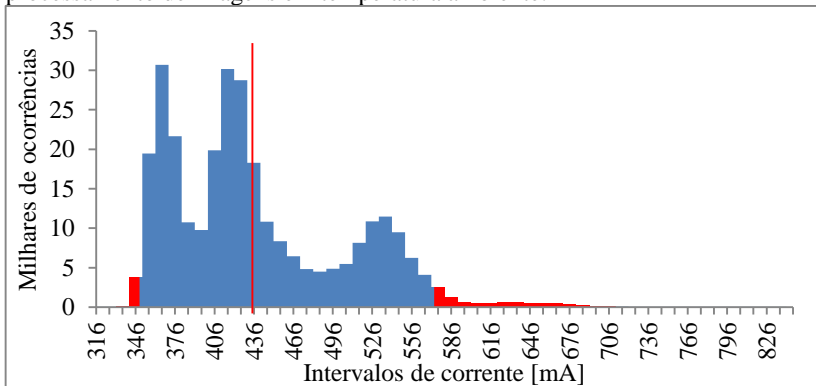
Quadro 11 - Resumo dos dados de corrente do sistema de processamento de imagens em temperatura ambiente.

Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
0,835 A	0,316 A	0,433 A	0,068 A

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Assim como nas medições de corrente do sistema de armazenamento, as medições de corrente do sistema de processamento apresentam uma distribuição de probabilidade não normal. Sendo assim o histograma da figura 40 foi utilizado para determinar que a corrente para esse sistema está entre 349 mA e 574 mA com nível de confiança de 95,45%. A corrente média para esse sistema é de $(433,1 \pm 1,9)$ mA, e o consumo médio $(5,20 \pm 0,32)$ Wh.

Figura 40 - Distribuição de probabilidade da corrente no sistema de processamento de imagens em temperatura ambiente.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

5.3 TESTES DE ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM AMBIENTE AQUECIDO

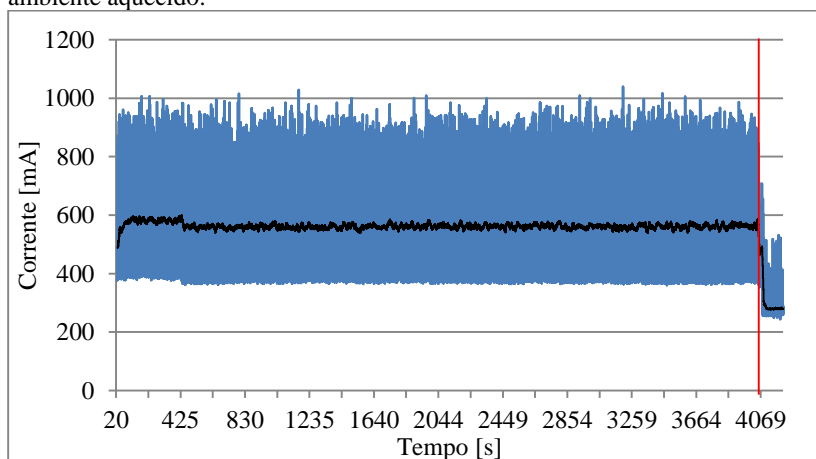
Nesses testes, os sistemas foram inseridos em uma estufa com temperatura controlada em (47 ± 3) °C, temperatura escolhida devido a máxima temperatura de operação da plataforma Jetson TK1 ser de 50 °C. Novamente foram executados cinco testes com a aquisição e processamento de 230 mil imagens utilizando a mesma montagem apresentada na figura 36, sendo somente a plataforma e o SSD inseridos na estufa.

5.3.1 Sistema de aquisição e armazenamento de imagens

Assim como em temperatura ambiente, esse sistema não apresentou problemas ou perda de desempenho observáveis durante nenhum dos testes, as pastas foram verificadas e nenhuma das imagens foi perdida, os dados de posição e inclinação também foram registrados.

O gráfico da figura 41 apresenta os dados de corrente obtidos durante um dos testes, é possível observar um comportamento bastante similar ao apresentado na figura 37.

Figura 41 - Gráfico da corrente do sistema de armazenamento de imagens em ambiente aquecido.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

O resumo dos dados de corrente registrados durante esses testes pode ser observado no quadro 12.

Quadro 12 - Resumo dos dados de corrente do sistema de armazenamento de imagens em ambiente aquecido.

Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
1,09 A	0,36 A	0,57 A	0,12 A

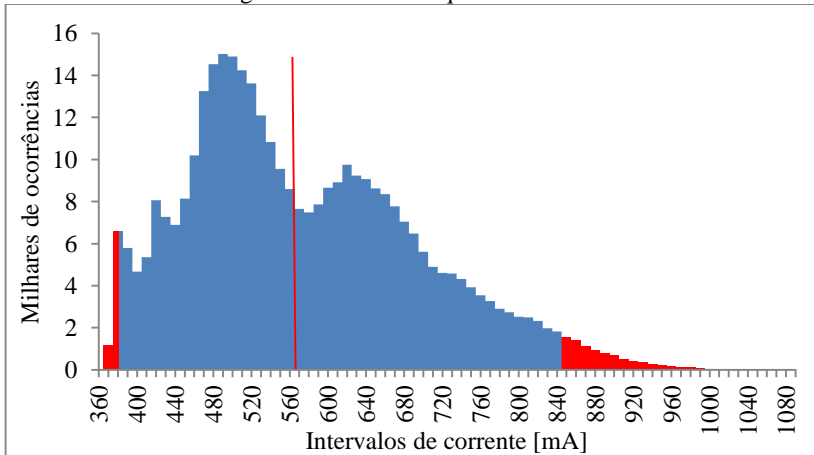
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A corrente do sistema de armazenamento operando em ambiente aquecido tem um comportamento semelhante ao apresentado quando operando em temperatura ambiente. Sendo assim, o histograma da

figura 40 foi utilizado para determinar que a corrente para esse sistema está entre 381 mA e 844 mA.

A corrente média para esse sistema é de (570 ± 54) mA, e o consumo médio $(6,85 \pm 0,77)$ Wh. O teste de hipóteses indica que não é possível afirmar com 95,45% de confiabilidade que este resultado é diferente dos $(6,36 \pm 0,66)$ Wh de consumo do sistema em temperatura ambiente.

Figura 42 - Distribuição de probabilidade da corrente do sistema de armazenamento de imagens em ambiente aquecido.



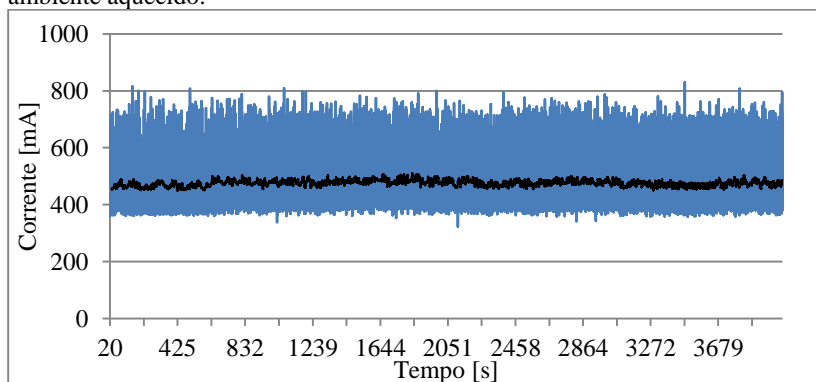
Fonte: Desenvolvida pelo autor.

5.3.2 Sistema de processamento baseado em *CPU+GPU*

Novamente, não foram registrados problemas ou perda de desempenho observáveis durante nenhum dos testes, todos os arquivos foram gerados e os dados adquiridos são consistentes.

O gráfico da figura 43 apresenta os dados obtidos durante um dos testes, é possível observar um comportamento bastante similar ao apresentado na figura 39.

Figura 43 - Gráfico da corrente do sistema de processamento de imagens em ambiente aquecido.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

O resumo dos dados de corrente registrados durante esses testes pode ser observado no quadro 13.

Quadro 13 - Resumo dos dados de corrente do sistema de processamento de imagens em ambiente aquecido.

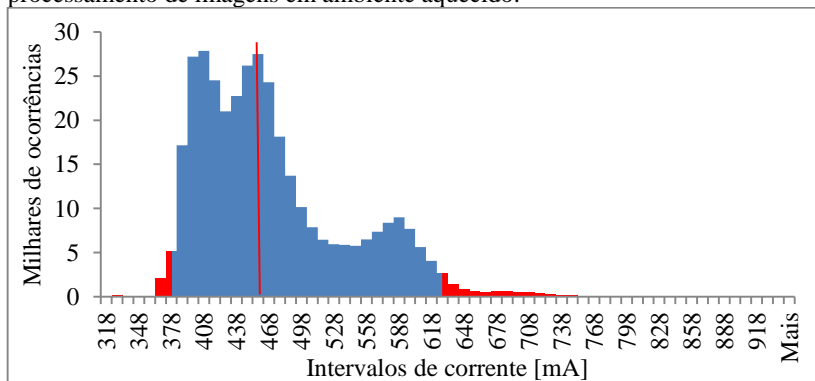
Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
0,931 A	0,318 A	0,466 A	0,070 A

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A corrente do sistema de processamento operando em ambiente aquecido apresenta um comportamento semelhante ao comportamento quando operando em temperatura ambiente. Sendo assim, o histograma da figura 44 foi utilizado para determinar que a corrente para esse sistema esta entre 379 mA e 623 mA.

A corrente média para esse sistema é de (466 ± 19) mA, e o consumo médio $(5,59 \pm 0,41)$ Wh, também não é possível afirmar que este resultado é diferente dos $(5,20 \pm 0,32)$ Wh consumidos pelo sistema em temperatura ambiente.

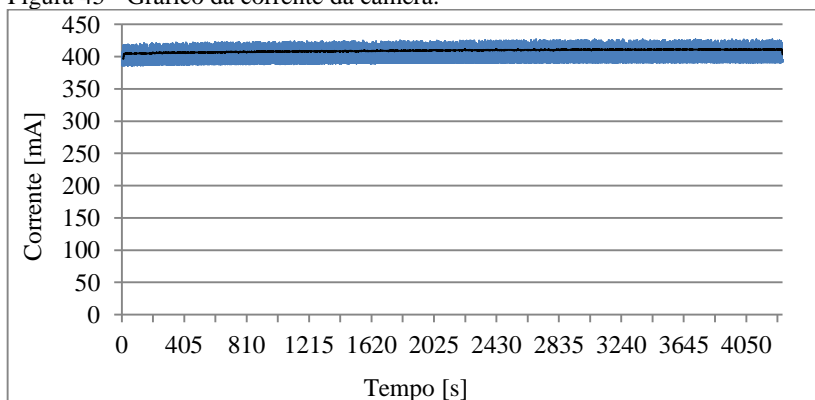
Figura 44 - Distribuição de probabilidade da corrente do sistema de processamento de imagens em ambiente aquecido.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A medição da corrente da câmera foi realizada apenas para um dos sistemas. A forma que as imagens são tratadas após aquisição não exerce influência sobre o funcionamento da câmera e essa não foi inserida na estufa, o que poderia alterar seu consumo médio. O quadro 14 apresenta o resumo das medições e o gráfico da figura 45 o comportamento do consumo médio ao longo da execução.

Figura 45 - Gráfico da corrente da câmera.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

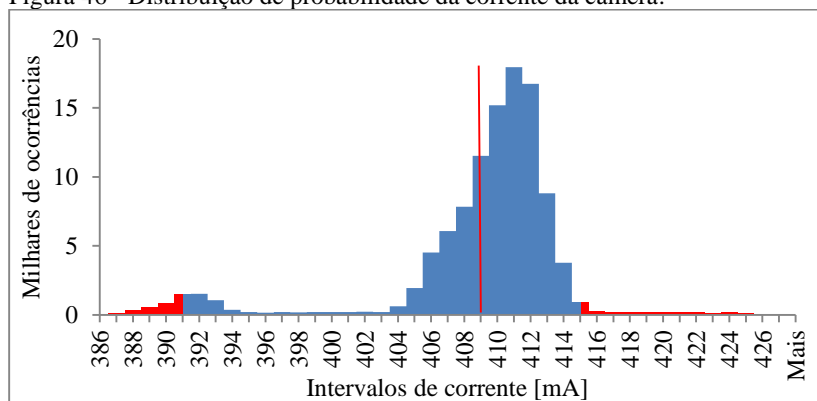
Quadro 14 - Resumo dos dados de corrente da câmera.

Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
0,427 A	0,386 A	0,409 A	0,005 A

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O comportamento da corrente da câmera também não pode ser descrito através de uma distribuição de probabilidade normal, por esse motivo o histograma da figura 46 foi utilizado na determinação da corrente da câmera como sendo entre 391 mA e 415mA. A corrente média para a câmera é de $(409,0 \pm 1,2)$ mA e o consumo $(4,91 \pm 0,30)$ Wh.

Figura 46 - Distribuição de probabilidade da corrente da câmera.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

6 ANÁLISE DOS SISTEMAS

Para que possa ser definido o sistema que apresenta maior viabilidade para implantação é preciso que seja realizado um levantamento das alterações necessárias para a implantação de cada uma das soluções desenvolvidas. Em seguida, através das características destas soluções e dos resultados obtidos através dos testes é possível compará-las.

6.1 ALTERAÇÕES PARA IMPLANTAÇÃO

Para que o núcleo comum, responsável pela aquisição das imagens em todos os sistemas, seja considerado finalizado, é preciso implementar:

- um número maior de verificações de erro e consistência de dados, as principais fontes de erro foram tratadas, mas ainda existem problemas potenciais que não foram;
- melhores práticas de utilização de *threads*;
- funções de configuração e comunicação com o μ C que foram negligenciadas por serem funções para captação de informação e controle de periféricos não importantes ao funcionamento do sistema principal;
- execução automática ao ligar o sistema;
- interface com o usuário.

Essas melhorias são necessárias a todos os sistemas, as alterações de *software* e *hardware* específicas a cada sistema podem ser observadas a seguir.

6.1.1 Sistema de aquisição de imagens

Para esse sistema seria preciso desenvolver um hardware específico tendo em vista que a plataforma comercial utilizada não possui dimensões adequadas para utilização nos protótipos desenvolvidos.

Devido as dimensões atuais do perfilômetro, seria preciso que o *hardware* a ser desenvolvido fosse inserido em uma área circular de diâmetro 100 mm no caso do protótipo de (8-10)'' ou em uma área circular de diâmetro 60 mm nos demais protótipos.

É considerada a possibilidade de utilização de uma estrutura mecânica específica para o sistema embarcado, a qual seria conectada ao sistema principal através de um eixo flexível, sem que houvesse prejuízo ao raio de curvatura mínimo de passagem e de medição do perfilômetro. Essa alternativa não altera as dimensões necessárias para o sistema embarcado, somente aumenta o espaço disponível para inserção de baterias e unidades de armazenamento.

Ainda em relação às alterações de hardware, seria preciso aumentar o número de portas *SATA* disponíveis para que possam ser utilizados mais *SSDs*, reduzindo a restrição de autonomia imposta pelo formato de imagens escolhido.

Por somente fazer uso do *ARM*, não necessitando da *GPU* presente na plataforma, é possível que um hardware com essas características seja encontrado comercialmente, dispensando a necessidade de desenvolvimento.

6.1.2 Sistema de processamento de imagens baseado em *CPU+GPU*

Uma vez que os algoritmos de processamento foram validados e se encontram em uma fase de maturação avançada, não é preciso uma grande atenção em relação ao *software* a ser utilizado por esse sistema. É preciso, no entanto, revisar os métodos usados na gravação dos dados, os quais podem ser otimizados de forma a minimizar os acessos a unidade de armazenamento e reduzir a necessidade de processamento.

Em relação ao *hardware* desta solução, é preciso realizar o desenvolvimento de uma plataforma customizada.

Como mencionado anteriormente, ainda não existem outras opções baseadas na mesma configuração da plataforma que foi utilizada. O *hardware* em questão pode ser desenvolvido através da remoção de recursos desnecessários e miniaturização da plataforma.

É preciso levar em consideração o fato de que esta plataforma faz uso de dissipação ativa, através de ventilação forçada. Esta configuração não é desejável no sistema final, seria preciso desenvolver uma alternativa de dissipação passiva capaz de atender as necessidades.

6.1.3 Sistema de processamento de imagens baseado em *CPU+FPGA*

Uma vez que esse sistema não foi finalizado é preciso completar o desenvolvimento do mesmo, realizando a configuração das pontes de comunicação e teste do desempenho considerando as tarefas do *ARM*.

Como mencionado anteriormente, seria necessário aumentar a precisão da conversão das variáveis para redução do erro obtido nos resultados das medições.

A redução da velocidade de processamento causada por essa modificação poderia ser amenizada pelo uso de um algoritmo ligeiramente diferente, onde as imagens retificadas seriam processadas de forma setorizada, semelhante ao algoritmo utilizado em *CUDA*. A mesma estratégia pode ser aplicada ao cálculo do centro de intensidade luminosa.

Esse sistema é especialmente crítico em relação à configuração de *hardware*, seria preciso desenvolver um novo sistema não apenas nas dimensões desejadas, mas que também adicionasse ao sistema atual:

- ao menos uma porta de comunicação *SATA*;
- memórias diretamente ligadas a porção *FPGA* do *SoC*;
- saída de vídeo para que possa ser realizada a configuração do sistema no local da medição.

Este sistema, diferentemente dos anteriores, não faz uso de qualquer sistema de dissipação de calor, demonstrando uma tendência menor de aquecimento.

6.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS SISTEMAS DESENVOLVIDOS

Para definição do sistema que apresenta maior potencial de implantação foi realizada uma comparação levando em conta o atendimento dos requisitos apresentados no capítulo 3. No quadro 15 pode ser observado o resumo dos resultados e características dos sistemas em relação a esses requisitos.

Os resultados em **negrito** destacam os melhores resultados para cada característica, sendo possível observar que o sistema de processamento baseado em *CPU+GPU*, apresenta o maior número de características de destaque.

Quadro 15 - Resumo do atendimento aos requisitos.

Sistema \ Item	Armazenamento em <i>CPU</i>	<i>CPU + GPU</i>	<i>CPU + FPGA</i>
Desempenho [Hz]	115 ¹	250 ¹	167 ²
Tamanho	A desenvolver	A desenvolver	A desenvolver
Consumo [Wh]	(6,85 ± 0,55) ³	(5,59 ± 0,52) ³	Não testado
Tempo de desenvolvimento	Médio	Médio	Alto
Custo de operação	Alto	Baixo	Baixo
Custo de desenvolvimento	Baixo	Médio	Médio
Confiabilidade	Média	Alta	Alta
Manutenção	Fácil	Fácil	Dificultada
¹ Utilizado o valor mínimo medido. ² Estimado a partir de simulação. ³ Utilizado o valor para ambiente aquecido.			

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

No quesito desempenho todos os sistemas apresentaram resultados dentro do esperado, cumprindo o requisito mínimo de 50 Hz.

O sistema de processamento em *CPU+GPU* apresenta desempenho acima do esperado, tornando possível a utilização de câmeras com taxas de aquisição de até 250 Hz. Nesse caso, seria preciso adicionar ao *hardware*, a interface de comunicação utilizada por essas câmeras e verificar se o *ARM* é capaz de suportar o tráfego de dados necessário.

Em relação ao tamanho, todos os sistemas necessitam de desenvolvimento específico. O sistema de aquisição é o que apresenta maior simplicidade em relação a este desenvolvimento. O sistema de processamento *CPU+FPGA* também possui a interessante característica de não apresentar a necessidade de dissipador, algo que pode reduzir o tamanho do sistema final.

A autonomia desses sistemas é limitada pelo consumo, por isso, essa é uma característica chave para a escolha do sistema.

Somente foram analisadas as características de consumo dos sistemas desenvolvidos através da plataforma Jetson TK1.

Para melhor comparar esses sistemas foi considerado o consumo do sistema e da câmera como sendo alimentados pela mesma bateria. Esse consumo foi transformado em autonomia de funcionamento considerando uma bateria de lítio 12 V e 6800 mAh. Essa bateria foi escolhida por apresentar dimensões dentro do especificado e ser de fácil reposição.

Os resultados podem ser observados no quadro 16. Este resultado é estimado, à medida que os testes foram realizados com 55 Hz e a autonomia calculada para 45 Hz, frequência de aquisição especificada para os perfilômetros de 4" e 6". Não foi considerado o consumo do μC e dos periféricos a ele ligados, além disso, foi considerada a capacidade energética da bateria especificada pelos fabricantes sem uma incerteza associada. Essa abordagem não é a ideal, visto que é uma característica que depende de vários fatores e possui alta variabilidade. Entretanto, na falta de acesso a uma alternativa melhor, a informação adquirida através dessa abordagem possibilita a comparação entre os sistemas.

Quadro 16 - Autonomia dos sistemas desenvolvidos.

	Consumo [Wh]	Autonomia [h]	Autonomia [m]*
Aquisição	(11,76 \pm 0,83)	(6,94 \pm 0,49)	(1124 \pm 79)
Processamento	(10,50 \pm 0,51)	(7,77 \pm 0,38)	(1258 \pm 61)

* Foi considerada a taxa de aquisição máxima especificada de 45 Hz

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Através de um teste de hipóteses não seria possível afirmar com 95,45% de certeza que os resultados da autonomia dos sistemas analisados são diferentes. Entretanto, o sistema de armazenamento também tem sua autonomia limitada pela unidade de armazenamento, atualmente SSD de 1 TB tem um alto custo no mercado, sendo preciso um destes a cada 900m. Para o sistema de processamento cada seção medida representa apenas 16 kB de informação, ao invés dos 1024 kB do sistema de armazenamento.

O tempo de desenvolvimento é maior para o sistema de processamento em *CPU+FPGA* por ser necessário um longo período de desenvolvimento de *software* antes de chegar à etapa que os outros sistemas se encontram.

No custo, foram consideradas duas variáveis: o custo de operação e o custo de desenvolvimento.

O sistema de armazenamento é o que apresenta o menor custo de desenvolvimento uma vez que é possível encontrar *hardwares* comerciais, e mesmo que o desenvolvimento seja necessário, a

complexidade e custo dos componentes é menor. Esse é também o sistema com maior custo de operação. É preciso utilizar *SSDs* de alta capacidade de armazenamento, os quais possuem alto custo de aquisição, e, uma vez que o volume de escrita é grande, o desgaste dos mesmos se dá de forma acelerada, fazendo com que a necessidade de reposição seja constante.

Os sistemas de processamento em *FPGA* e *GPU* possuem custo de desenvolvimento similar e baixo custo de operação.

Em relação à confiabilidade os dois sistemas testados apresentaram ser adequados ao proposto. Entretanto, o sistema de armazenamento é altamente influenciado pelo desempenho da unidade de armazenamento utilizada.

A característica de manutenção do sistema é especialmente importante em relação a atualizações. O sistema em *FPGA* apresenta uma dificuldade maior na implantação de atualizações de software por necessitar que a porção de software do *FPGA* seja sintetizada e inserida no *FPGA* através de uma interface de programação específica.

Nos outros dois sistemas uma atualização pode ser disponibilizada através de mídia móvel, nos próprios *SSDs*, ou até pela internet.

Ainda é preciso levar em conta a linha de trabalho seguida pelo perfilômetro atual, em que, o processamento é feito em computador equipado com *GPU* habilitada para *CUDA*, facilitando o desenvolvimento de atualizações para o sistema de processamento em *CPU+GPU*.

Em relação a manutenções mecânicas ou elétricas os três sistemas podem ser considerados similares.

A operação do sistema de armazenamento de imagens é mais complexa do que os sistemas de processamento. Após as medições, seria preciso realizar a inserção do *SSD* utilizado em um computador, só então seria possível realizar o processamento. Esse processo aumenta o tempo total para obtenção das medições, mas traz a vantagem de possibilitar a visualização do duto, permitindo que o operador esclareça possíveis erros através da inspeção visual das imagens adquiridas.

Por apresentar maior praticidade de operação, atualização do sistema e conclusão do desenvolvimento do mesmo, o sistema de processamento de imagens em arquitetura *CPU+GPU* foi considerado o sistema embarcado mais viável para a implantação no perfilômetro em desenvolvimento pelo projeto PEROLA e por conseguinte a melhor alternativa para o aumento da característica de autonomia desse perfilômetro.

6.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO SISTEMA DESENVOLVIDO FRENTE À SOLUÇÃO ATUAL

Todos os testes expostos até o momento foram realizados para que fosse determinada uma solução adequada para o aumento da autonomia do perfilômetro. Estes testes indicaram, como a melhor alternativa para o alcance do objetivo proposto, o uso de um sistema embarcado de arquitetura *CPU+GPU* para processamento das imagens.

Uma vez que todos os testes anteriores foram realizados em bancada, sem a efetiva medição de dutos, se faz necessária a validação do sistema desenvolvido através de medições reais e comparação destas com medições do sistema atualmente utilizado.

Nos testes de validação do sistema embarcado escolhido, foi utilizado um duto de testes, no qual o perfilômetro foi inserido. Este duto possui um perfil removível no qual foram inseridos defeitos artificiais usados na avaliação do sistema de perfilometria. A figura 47 mostra o PEROLA-I 6” inserido no duto, a figura 48 apresenta o perfil removível em detalhes.

Foram realizadas cinco medições do perfil interno deste duto com o uso do sistema embarcado e mais cinco medições com o uso de um computador. Estas medições foram realizadas com frequência de aquisição máxima de 45 Hz.

Somente foram realizadas medições em uma direção e nenhuma etapa de pós-processamento foi aplicada aos dados. Esta abordagem retornou medições com a formação de regiões de sombra, efeito explicado no capítulo 2.

Figura 47 - Duto utilizado na avaliação do sistema de perfilometria.



Fonte: Desenvolvida pelo autor

Figura 48 - Perfil de testes.



Fonte: Desenvolvida pelo autor

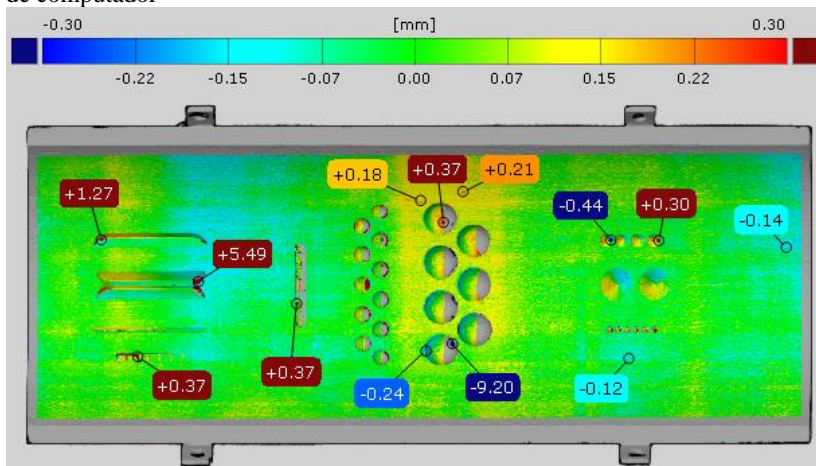
Para avaliação dos resultados obtidos nos testes, a região da medição correspondente ao perfil de avaliação foi isolada e comparada a um padrão digital deste mesmo perfil, o qual foi obtido com o uso de um equipamento de medição por projeção de franjas de incerteza igual a $\pm 0,03$ mm.

As medições foram comparadas com o uso do programa GOM *Inspect V8* (MBH, 2015), o qual possibilita a comparação entre um modelo tridimensional e uma superfície digitalizada. Para isso o perfil padrão foi convertido em um sólido tridimensional e comparado às superfícies geradas pelas medições. A figura 49, mostra uma das medições geradas pelo uso do computador e a figura 50 uma medição do sistema embarcado desenvolvido.

É possível verificar através dos mapas de cores, que na maior parte do perfil, os erros estão em $\pm 0,15$ mm, em uma medição final este erro é reduzido pelo uso de pós-processamento. Alguns pontos foram escolhidos para representação do valor numérico desses erros, foram preteridos, os pontos de maior representatividade para os resultados.

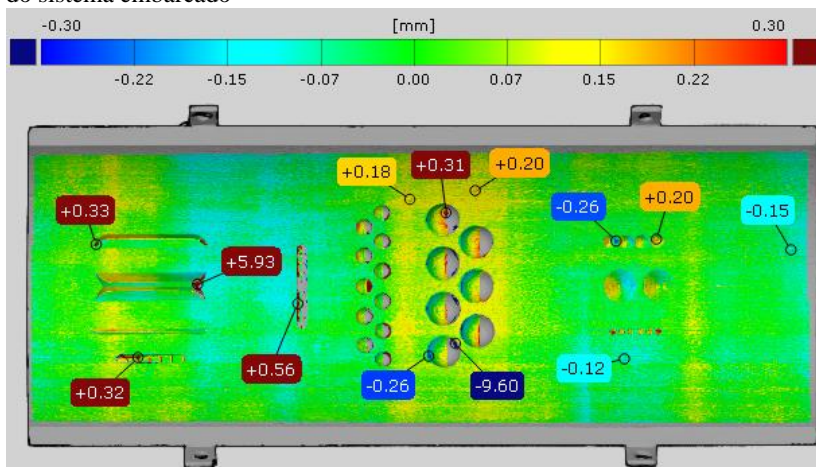
Nas figuras 49 e 50 é possível observar que, embora o resultado obtido com o uso do sistema embarcado se assimila bastante ao apresentado pelo computador, nas duas medições existem erros superiores a $\pm 0,3$ mm, incerteza de medição especificada no capítulo 2. Estes erros podem ser explicados pelo procedimento de comparação.

Figura 49 - Comparação de uma das medições do perfil de avaliação com o uso de computador



Fonte: Desenvolvida pelo autor

Figura 50 - Comparação de uma das medições do perfil de avaliação com o uso do sistema embarcado

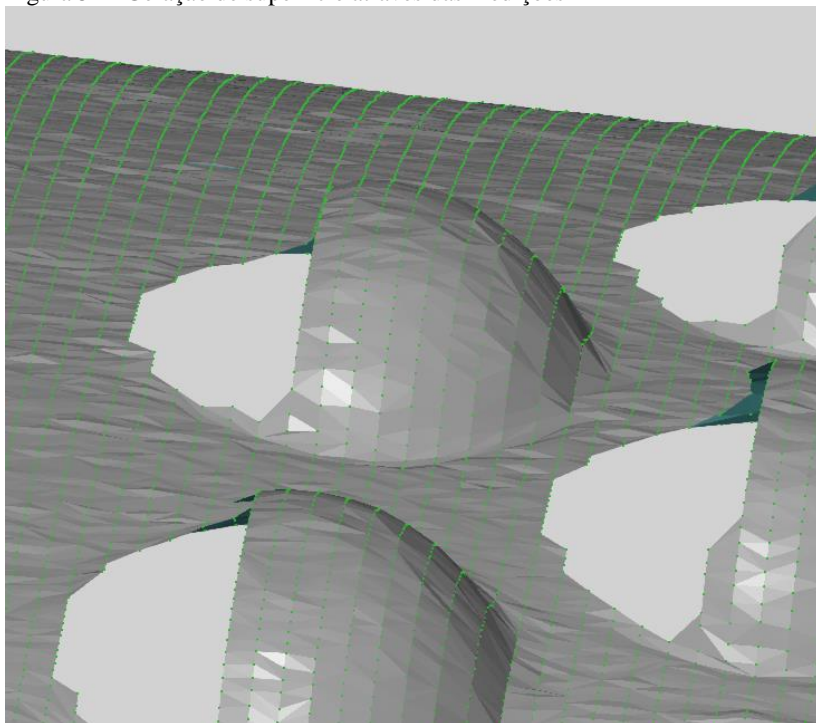


Fonte: Desenvolvida pelo autor

Uma vez que as medições são comparadas através da geração de superfícies, a extrapolação destas insere erros quando existem grandes deformações entre duas medições, especialmente entre duas seções, uma vez que a resolução longitudinal utilizada é de 1 mm.

Entre medições o software calcula uma possível superfície, que em alguns casos não corresponde a realidade. Por este motivo é possível observar que a maior parte dos erros superiores a 0,2 mm estão nos contornos dos defeitos artificiais, ou em regiões de sombra que foram erroneamente consideradas. A figura 51 demonstra como se formam estes erros, os pontos verdes são as medições, e a superfície cinza foi gerada a partir destes pontos, é possível perceber a influência da resolução longitudinal sobre a formação da imagem.

Figura 51 - Geração de superfície através das medições



Fonte: Desenvolvida pelo autor

Foram realizadas também comparações entre medições para que a variabilidade dos resultados pudesse ser verificada. Estas comparações foram realizadas a cada par de medições, os resultados obtidos correspondem a média destes desvios.

A comparação entre medições realizadas com o computador retornou um desvio médio de $(0,028 \pm 0,002)$ mm, entre medições

realizadas com o sistema embarcado um desvio médio de $(0,021 \pm 0,003)$ mm e a comparação entre os resultados dos dois sistemas apresentou desvio médio de $(0,025 \pm 0,003)$ mm.

Através dos resultados de desvio médio é possível observar que o sistema desenvolvido apresenta comportamento semelhante ao sistema em uso atualmente. Mostrando que o sistema desenvolvido é capaz de substituir o uso de computadores sem que exista prejuízo às características metrológicas do sistema.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho contribuiu para apontar cominhos que levarão ao aumento da autonomia do perfilômetro desenvolvido em parceria entre LABMETRO e Petrobras através do projeto PEROLA.

Um estudo de viabilidade técnica determinou que a opção de maior potencial para o aumento da autonomia do perfilômetro é a remoção da necessidade do uso de computadores e implantação de um sistema embarcado.

A seguir são ressaltadas as principais características dos sistemas desenvolvidos e a comparação entre eles para determinação do melhor sistema a ser implementado no perfilômetro.

7.1 DOS SISTEMAS EMBARCADOS DESENVOLVIDOS

Foram estudadas diversas tecnologias utilizadas em sistemas embarcados para determinação do sistema que melhor atenderia às necessidades do perfilômetro. Essa pesquisa retornou três possíveis alternativas divididas em dois paradigmas diferentes.

As alternativas consideradas promissoras foram parcialmente desenvolvidas tendo em vista a validação de seu funcionamento com o perfilômetro. Uma das alternativas é o armazenamento das imagens e dados para processamento *a posteriori*. As outras duas alternativas seriam sistemas de processamento baseados em *CPU+GPU* e *CPU+FPGA*.

O sistema de armazenamento de imagens capta as imagens da câmera e as armazena em um *SSD*. O formato escolhido para as imagens armazenadas foi o formato *BMP*, por ser um formato sem perdas e que não requer grande atividade computacional em sua conversão. A utilização desse sistema é limitada pelo espaço de armazenamento em disco.

Em relação aos sistemas de processamento, ambos funcionam de forma similar. O *ARM* é utilizado na captura das imagens e então a *GPU* ou o *FPGA* são responsáveis pelo processamento dessas, retornando os resultados ao *ARM* para armazenamento em disco. Para esses sistemas a maior limitação é o consumo, pois não há restrições com a capacidade de armazenamento uma vez que somente os resultados são salvos, reduzindo drasticamente o volume de dados que precisam ser armazenados.

7.2 DAS COMPARAÇÕES ENTRE OS SISTEMAS DESENVOLVIDOS

Embora o sistema de armazenamento de imagens tenha se demonstrado capaz de realizar o proposto, o sistema de processamento baseado em *GPU* apresenta melhor resultado em relação à capacidade de aumento da velocidade de aquisição e praticidade de uso. Esse sistema ainda apresenta compatibilidade com a linha de pesquisa atual tornando-o a opção de maior viabilidade para desenvolvimento orientado a implantação.

O sistema de processamento em *GPU* apresenta o dobro de desempenho médio em relação ao sistema de armazenamento de imagens. Apresenta também um desempenho aproximadamente 67% superior ao desempenho esperado para o sistema de processamento baseado em *FPGA*.

Em relação ao consumo, o sistema de processamento em *FPGA* não foi testado por não ter sido concluído em tempo, mas os sistemas de processamento e armazenamento apresentam consumos similares.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora o sistema desenvolvido tenha apresentado potencial de resolução do problema proposto é preciso ainda realizar a melhoria de alguns pontos, dentre eles:

- realizar o desenvolvimento de um hardware especializado e reduzido. O hardware atualmente utilizado está fora das dimensões necessárias para a implantação física no perfilômetro;
- realizar experimentos com câmeras de maior frequência de aquisição, o sistema apresenta capacidade de processamento suficiente para utilização de câmeras com taxas de aquisição de até 250 Hz;
- existem tratamentos de erros e exceções que ainda não foram implementados. É necessário desenvolver funções para tratamento dessas situações;
- o desenvolvimento de uma interface de visualização e configuração remota através de comunicação sem fio;
- o sistema de processamento somente armazena dados processados e finalizados. O desenvolvimento de uma função

adicional que salva também imagens ou até vídeos do duto real, possibilitando uma inspeção visual mesmo que com menor resolução, adicionaria uma importante funcionalidade ao sistema.

Além disso, existem características relevantes dos outros sistemas que poderiam ser melhoradas possibilitando uma nova comparação. São algumas delas;

- no sistema de processamento *CPU+FPGA* seria possível finalizá-lo e realizar melhorias de desempenho e precisão da conversão dos cálculos envolvidos de 16 bits para 32 bits ou 64 bits;
- no sistema de armazenamento de imagens seria possível realizar testes com o formato TIFF cujo tamanho das imagens é menor.

REFERÊNCIAS

AGILENT TECHNOLOGIES. **Agilent 34970A/34972A Data Acquisition / Switch Unit: Service Guide**. Malasia: Agilent, 2012. 194 p. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/34972-90010.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

ALTERA. **FPGAs**. 2014. Disponível em: <<http://www.altera.com/products/fpga.html>>. Acesso em: 1 dez. 2014.

BENEDET, Mauro Eduardo. **Desenvolvimento de um sistema de comunicação dinâmica sem fio através de paredes metálicas**. 2014. 187 p. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/122687>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

BUSCHINELLI, Pedro D.v. et al. A GPU based real-time image processing for an axis-symmetrical optical laser triangulation system. In: OPTICS AND PHOTONICS FOR INFORMATION PROCESSING, 6, 2012b, San Diego. **Proceedings**. San Diego: Spie, 2012. p. 1 - 10. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1381102>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

BUSCHINELLI, Pedro D.v. et al. Perfilometria Óptica de Dutos Sujeitos à Corrosão: Princípios e Recentes Progressos. In: INTERCORR 2012, 32., 2012a, Salvador. **Anais**. Rio de Janeiro: Abraco, 2012. p. 1 - 12.

BUSCHINELLI, Pedro D.v.. **Desenvolvimento de um Sistema Óptico por Triangulação Cônica para Inspeção do Perfil Interno de Duto**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/90648>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

BUSCHINELLI, Pedro D.v.; ALBERTAZZI JUNIOR, Armando; FANTIN, Analúcia Vieira. Desenvolvimento de um Sistema Óptico por Triangulação Cônica para a Inspeção do Perfil Interno de Du. In: CONGRESSO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 4., 2007, Campinas. **Anais**. Campinas: Abpg, 2007. p. 1 - 12.

CEPA (Canadá). **Why Pipelines are Needed**. 2014. Disponível em: <<http://www.cepa.com/about-pipelines/why-pipelines>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

CHAPTER 7. Using Compression Library Algorithms. Disponível em: <http://techpubs.sgi.com/library/dynaweb_docs/0530/SGI_Developer/books/Ind2IMCpres_PG/sgi_html/ch07.html>. Acesso em: 9 fev. 2015.

CORDELL, Jim; VANZANT, Hershel. **The Pipeline Pigging Handbook**. 3. ed. Houston: Clarion Technical Publishers And Scientific Surveys Ltd, 2003. 243 p.

COSTA, Eduard Montgomery Meira. **ELETROMAGNETISMO: TEORIA, EXERCÍCIOS RESOLVIDOS E EXPERIMENTOS PRÁTICOS**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2009. 488 p.

CULLINAN, Christopher; WYANT, Christopher; FRATTESE, Timothy. **Computing Performance Benchmarks among CPU, GPU, and FPGA: MathWorks**. 2013. 113 p. Disponível em: <http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-030212-123508/unrestricted/Benchmarking_Final.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2015.

DECUSATIS, Casimer. **Handbook of Fiber Optic Data Communication**. 4. ed. San Diego: Elsevier Inc., 2014. 468 p.

DOBOLI, Alex; CURRIE, Edward H.. **Introduction to Mixed-Signal, Embedded Design**. New York: Springer, 2011. 472 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-7446-4>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

ELLENBERGER, Philip. **Piping and Pipeline Calculations Manual**. Burlington: Elsevier Inc., 2010. 361 p.

FURBER, Steve. **ARM System-on-Chip Architecture**. 2. ed. Harlow: Addison-wesley Professional, 2000. 432 p

FYKSE, Egil. **Performance Comparison of GPU, DSP and FPGA implementations of image processing and computer vision algorithms in embedded systems**. 2013. 76 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master Of Science In Electronics, Department Of Electronics And Telecommunications, Norwegian University Of Science And Technology, Trondheim, 2013. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:653080/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2015.

GOLDSMITH, Andrea. **Wireless Communications**. New York: Cambridge University Press, 2005. 561 p.

GOPRO. **Capture + share your world**. Disponível em: <<http://pt.gopro.com/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

HUANG, Zecai et al. A Real-Time Embedded Vision System for Multitouch Operation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCE AND DIGITAL CONTENT TECHNOLOGY (ICIDT), 8., 2012, Jeju. **Proceedings**. Jeju: Ieee, 2012. p. 113 - 116. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6269238&tag=1>. Acesso em: 2 fev. 2015.

INSTRUMENTS, National. **Convert Algorithms from Floating-Point to Fixed-Point in LabVIEW Communications**. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/52508/en/>>. Acesso em: 5 fev. 2015.

INTEL. **Programa de Plataformas de Avaliação da Intel**. 2013. Disponível em: <<http://www.intel.com.br/content/www/br/pt/intelligent-systems/evaluation-platforms/evaluation-platforms.html>>. Acesso em: 09 out. 2013.

ITSEEZ. **About**. Disponível em: <<http://opencv.org/about.html>>. Acesso em: 21 mar. 2015.

JERRAYA, Ahmed Amine; WOLF, Wayne. **Multiprocessor Systems-on-chips**. San Francisco: Elsevier Inc., 2005. 608 p.

JIMENEZ, Manuel; PALOMERA, Rogelio; COUVERTIER, Isidoro. **Introduction to Embedded Systems: Using Microcontrollers and the MSP430**. New York: Springer, 2013. 648 p.

KESTUR, Srinidhi; DAVIS, John D.; WILLIAMS, Oliver. BLAS Comparison on FPGA, CPU and GPU. In: IEEE COMPUTER SOCIETY SYMPOSIUM ON VLSI, 1., 2010, Lixouri. **Proceedings**. Lixouri: Ieee, 2010. p. 288 - 293. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5572788&tag=1>. Acesso em: 5 fev. 2015.

KENNEDY, William P. **The Basics of Triangulation Sensors**. Disponível em: <<http://archives.sensorsmag.com/articles/0598/tri0598>>. Acesso em: 9 fev. 2015.

KIRK, David B.; HWU, Wen-mei W.. **Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach**. 2. ed. Burlington: Elsevier Inc., 2012. 514 p. (Applications of GPU Computing Series).

LEM. **Current Transducer LA 25-NP**. 2015: Lem, . 2 p. Disponível em: <<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/lem/LA25-NP.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

LI, Nai-jen et al. The people number estimation based on the embedded DSP system with surveillance camera. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCE AND ENGINEERING (ICSSE), 2013, Budapest. **Proceedings**. Budapest: Ieee, 2013. p. 57 - 61. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6614633>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

MALINOWSKI, Aleksander; YU, Hao. Comparison of Embedded System Design for Industrial Applications. In: IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 1., 2011, Peoria. **Anais**. Peoria: Ieee, 2011. v. 7, p. 244 - 254. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5755132&tag=1>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

MBH, Gom. **GOM Inspect**. 2015. Disponível em: <<http://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>>. Acesso em: 9 fev. 2015.

MELO, João Ricardo Castro. **Contribuições ao Desenvolvimento de um Perfilômetro Óptico a LASER para Medição e Visualização da Geometria Interna de Dutos**. 2012. 157 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/103435/316862.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

MERRIAM-WEBSTER. Britannica Company. **Tunnel Vision**. Disponível em: <[http://www.merriam-webster.com/dictionary/tunnel vision](http://www.merriam-webster.com/dictionary/tunnel%20vision)>. Acesso em: 4 fev. 2015.

MOOG. **Proven Slip Rings**. Disponível em: <<http://www.moog.com/products/slip-rings/>>. Acesso em: 04 fev. 2015.

MPRESSION. **Reference Manual: Mpression Helio Board**. 1.0, 2013. 43 p. Disponível em: <<http://www.macnica-na.com/helio-reference-manual>>. Acesso em: 3 fev. 2015.

MU, Qian; DONG, Ji-xian. The Application of Coal Cleaning Detection System based on Embedded Real-time. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASURING TECHNOLOGY AND MECHATRONICS AUTOMATION (ICMTMA), 5., 2013, Hong Kong. **Proceedings**. Hong Kong: Ieee, 2013. p. 1125 - 1127. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6493927>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

NVIDIA. **CUDA Programação paralela facilitada**. 2014b. Disponível em: <http://www.nvidia.com.br/object/cuda_home_new_br.html>. Acesso em: 2 dez. 2014.

NVIDIA. **NVIDIA Jetson TK1: Bringing GPU-accelerated computing to Embedded Systems**. 1.0, 2014a. 15 p. Disponível em: <http://developer.download.nvidia.com/embedded/jetson/TK1/docs/Jetson_platform_brief_May2014.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2015.

NVIDIA. **Jetson TK1 Development Kit Specification**. Santa Clara: Nvidia, 2014c. 34 p. Disponível em: <http://developer.download.nvidia.com/embedded/jetson/TK1/docs/3_HWDesignDev/JTK1_DevKit_Specification.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2015.

OPENMP. **About the OpenMP ARB and OpenMP.org**. Disponível em: <<http://openmp.org/wp/about-openmp/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

OSHANA, Robert. **DSP Software Development Techniques for Embedded and Real Time Systems**. Burlington: Elsevier Inc., 2006. 608 p.

RAIHAN, Kawser Jahan et al. Raspberry Pi Image Processing Based Economical Automated Toll System. **Global Journal Of Researches In Engineering: Electrical and Electronics Engineering**. p. 34-42. 2013. Disponível em: <<http://www.engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/893/825>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

SAMSUNG. **Samsung SSD 840 EVO**. 2013. Disponível em: <http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/minisite/SSD/downloads/document/Samsung_SSD_840_EVO_Data_Sheet_rev_1_1.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2015.

SAMSUNG. **Spinpoint M8: Mobile SATA**. 2012. Disponível em: <<http://samsunghdd.seagate.com/includes/spinpoint-m8-ds.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2015.

SHELL. **Role of Pipeline**. 2014. Disponível em: <<http://www.shell.us/products-services/solutions-for-businesses/pipeline/pipeline-america/role.html#>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

SICK SENSOR INTELLIGENCE. **Smart cameras: IVC - Industrial vision cameras for flexible and powerful stand-alone solutions**. 2015. Disponível em: <http://www.sick.com/group/EN/home/products/product_portfolio/vision/Pages/smart_cameras.aspx>. Acesso em: 11 abr. 2015.

SPURGEON, Charles E.; ZIMMERMAN, Joann. **Ethernet the definitive guide**. 2. ed. Sebastopol: O'reilly Media Inc., 2014. 483 p.

TOLEDO, Javier; MARTÍNEZ, Javier; FERRÁNDEZ, Manuel. FPGA-Based Platform for Image and Video Processing Embedded Systems. In: SOUTHERN CONFERENCE ON PROGRAMMABLE LOGIC, 3., 2007, Mar del Plata. **Proceedings**. Mar del Plata: Ieee, 2007. p. 171 - 176. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4234340>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

TOY, Mehmet. **Networks and Services**. Nova Jersey: Wiley, 2012. 414 p.

VICTORETTE, Milena Won Dias. **Correção de erros de medição da geometria interna de tubos provocados pelas rodas de um perfilômetro óptico**. 2014. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

WOODS, Roger et al. **FPGA - based Implementation of Signal Processing Systems**. Chichester: Wiley, 2008. 382 p.

XILINX. **Field Programmable Gate Array (FPGA)**. 2014. Disponível em: <<http://www.xilinx.com/training/fpga/fpga-field-programmable-gate-array.htm>>. Acesso em: 01 dez. 2014.

ZHANG, Huilin; XUE, Huifeng; WANG, Wei. System Design of Image Gathering and Saving Based on Embedded Technology. In: INTERNACIONAL CONFERENCE OF INFORMATION SCIENCE AND MANAGEMENT ENGINEERING (ISME), 2010, Xi'an. **Proceedings**. Xi'an: Ieee, 2010. p. 131 - 134. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5573764>. Acesso em: 2 fev. 2015.