

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Rodrigo Dias Flores

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RECEPÇÃO  
DE IMAGENS DE SATÉLITE METEOROLÓGICO E  
CORREÇÃO AUTOMÁTICA DAS IMAGENS TIPO LRPT**

Santa Maria, RS  
2018

**Rodrigo Dias Flores**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RECEPÇÃO  
DE IMAGENS DE SATÉLITE METEOROLÓGICO E  
CORREÇÃO AUTOMÁTICA DAS IMAGENS TIPO LRPT**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência da Computação**.

Orientador: Prof. Dr. Renato Machado

Santa Maria, RS  
2018

Dias Flores, Rodrigo

Desenvolvimento de um Sistema de Recepção de Imagens  
de Satélite Meteorológico e Correção Automática das  
Imagens tipo LRPT / Rodrigo Dias Flores.- 2018.

84 p.; 30 cm

Orientador: Renato Machado

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Ciência da Computação, RS, 2018

1. Sensoriamento Remoto 2. Retoque Digital 3. LRPT 4.  
RTL-SDR 5. GNU Radio I. Machado, Renato II. Título.

**Rodrigo Dias Flores**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RECEPÇÃO  
DE IMAGENS DE SATÉLITE METEOROLÓGICO E  
CORREÇÃO AUTOMÁTICA DAS IMAGENS TIPO LRPT**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência da Computação**.

**Aprovado em 23 de fevereiro de 2018:**

---

**Renato Machado, Dr. (ITA)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Eno Darcy Saatkamp, Dr. (UFSM)**

---

**José Valentin Bageston, Dr. (INPE)**

Santa Maria, RS  
2018

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a concretização dessa pesquisa e, de uma maneira especial, agradeço:

- ao meu orientador Renato Machado, pelas oportunidades concedidas, pela confiança depositada em mim, e pela pessoa incentivadora, compreensiva e dedicada, grato pela orientação;
- à minha esposa Simone, pelo incentivo, apoio, compreensão e companheirismo em todos os momentos dessa jornada;
- aos professores Eno e Jaime pelos encontros e aulas muito inspiradoras dentro do grupo GLONASS e pelo exemplo de profissionalismo e dedicação em todas as atividades;
- ao professor Lúcio pelo empréstimo do excelente material técnico utilizado na pesquisa;
- ao grupo GLONASS pela infraestrutura, apoio financeiro, e a todos os seus integrantes, professores e alunos, pelo acolhimento e dedicação que contribuem para o desenvolvimento da pesquisa no Brasil;
- à UFSM, Universidade pública e gratuita, pela oportunidade de desenvolver e concretizar essa dissertação de mestrado.

## RESUMO

### DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RECEPÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE METEOROLÓGICO E CORREÇÃO AUTOMÁTICA DAS IMAGENS TIPO LRPT

AUTOR: RODRIGO DIAS FLORES  
ORIENTADOR: RENATO MACHADO

Esse trabalho apresenta o projeto de uma estação terrestre capaz de rastrear, demodular e decodificar sinais de imagens do satélite meteorológico russo Meteor-M N2 no formato *Low-rate Picture Transmission* (LRPT). A solução proposta apresenta a construção de uma antena QFH, o uso de rádio definido por software (RTL-SDR) e um computador pessoal que decodifica as imagens utilizando programas e a plataforma de desenvolvimento *GNU Radio Companion*. É também proposto um conjunto de melhorias e correções das imagens LRPT, como a restauração baseada em retoque digital, ajuste de contraste e composição RGB de imagens. A automatização é realizada por um conjunto de *scripts* implementados na linguagem de programação Python que também identifica automaticamente as regiões danificadas das imagens LRPT. Por fim, dois métodos de avaliação de qualidade de imagens, Erro Quadrático Médio e o Índice de Similaridade Estrutural, são aplicados nos conjuntos de imagens LRPT brutas e restauradas, permitindo realizar uma avaliação de desempenho das técnicas de correção consideradas no estudo realizado.

**Palavras chave:** Sensoriamento Remoto, Retoque Digital, LRPT, RTL-SDR, *GNU Radio*.

## **ABSTRACT**

### **DEVELOPMENT OF A WEATHER SATELLITE IMAGE RECEPTION SYSTEM AND AUTOMATIC LRPT IMAGE CORRECTION**

AUTHOR: RODRIGO DIAS FLORES  
ADVISOR: RENATO MACHADO

This study presents the design of a ground station capable of tracking, demodulating and decoding image signals from the Meteor-M N2 Russian weather satellite in the Low-rate Picture Transmission (LRPT) format. The proposed solution presents the construction of a QFH antenna, the use of software-defined radio (RTL-SDR) and a personal computer that decodes the images using programs and the GNU Radio Companion platform. A set of improvements and image enhancements is proposed, such as, restoration based on inpainting, contrast enhancement and RGB image composition. The automation is performed by a set of scripts implemented in the Python programming language that also identifies the damaged regions of the LRPT images automatically. Finally, two methods of image quality assessment, the Mean Squared Error and the Structural Similarity Index are applied to the raw and restored LRPT image sets, and used to assess the performance obtained with the techniques considered in this study.

**Keywords:** Remote Sensing, *Inpainting*, LRPT, RTL-SDR, GNU Radio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Obtenção de imagens por sensoriamento remoto.....	16
Figura 2.2 – Espectro e alguns comprimentos de onda, com destaque ao espectro visível.....	18
Figura 2.3 – Sequência da trajetória da radiação eletromagnética indicada pelos números de 1 a 4, da fonte ao sensor .....	20
Figura 2.4 – Ilustração de órbita polar e geoestacionária .....	22
Figura 2.5 – Sistema de um radiômetro de varredura .....	23
Figura 2.6 – Trajetória de um satélite em órbita polar .....	24
Figura 2.7 – Satélite meteorológico russo Meteor-M N2 lançado em 2014. Em detalhe a antena de transmissão QFH utilizada para transmissão do sinal no formato LRPT .....	26
Figura 2.8 – (a) Imagem do Canal 1 (VIS), (b) Imagem do Canal 2 (VNIR), (c) Imagem do Canal 5 (TIR) .....	27
Figura 2.9 – Exemplo de defeitos encontrados em imagens LRPT.....	28
Figura 3.1 – Exemplo de Imagem original e restaurada por retoque digital .....	30
Figura 3.2 – Princípio do algoritmo de <i>Inpainting</i> .....	32
Figura 3.3 – Estrutura de propagação do algoritmo baseado em exemplares .....	33
Figura 3.4 – Ilustração do resultado dos algoritmos de Criminisi (2004) e Buysens (2015) .....	34
Figura 3.5 – Características dos histogramas de diferentes tipos de imagens. (a) alta radiância, (b) baixa radiância, (c) baixo contraste, (d) alto contraste. ....	37
Figura 3.6 – Esquema para mostrar uma ampliação de contraste de uma imagem .....	37
Figura 3.7 – Efeito visual de contraste antes e após a manipulação do histograma da imagem original LRPT .....	38
Figura 3.8 – Processo aditivo de formação de cores.....	39
Figura 3.9 – Composição colorida multiespectral padrão RGB .....	40
Figura 3.10 – Composições LRPT mais tradicionais .....	41
Figura 4.1 – Área de captura ideal para satélites de órbitas polares .....	43
Figura 4.2 – Antenas para recepção meteorológica. (a) <i>Turnstile</i> , (b) DCA e (c) QFH.....	44
Figura 4.3 – Diagrama de irradiação das antenas <i>Turnstile</i> , DCA e QFH.....	44
Figura 4.4 – Arquitetura típica de um Rádio Definido por Software .....	47
Figura 4.5 – Diagrama de blocos do sistema de hardware da estação proposta.....	48
Figura 4.6 – (a) Foto da antena QFH construída, (b) Resposta em frequência da antena QFH – Curva de reflexão do coeficiente S11 .....	49
Figura 4.7 – Foto do circuito interno do rádio RTL-SDR.....	50
Figura 4.8 – Arquitetura do rádio RTL-SDR <i>R820T/RTL2832U</i> .....	51
Figura 4.9 – Foto da estação receptora configurada para recepção de imagens meteorológicas .....	52
Figura 4.10 – Diagrama de funcionamento da estação receptora .....	53
Figura 4.11 – Programa de rastreamento de satélites <i>Gpredict</i> .....	54
Figura 4.12 – Programa de demodulação LRPT desenvolvido no ambiente gráfico do GRC .....	55
Figura 4.13 – Três primeiros blocos do programa de demodulação QPSK no GRC .....	56
Figura 4.14 – Segunda parte do programa de demodulação QPSK .....	57
Figura 4.15 – Terceira parte da demodulação QPSK .....	57
Figura 4.16 – Programa <i>LRPTOfflineDecoder</i> de decodificação de imagens LRPT .....	58
Figura 5.1 – Histogramas dos canais de uma imagem bruta LRPT. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 5.....	60
Figura 5.2 – (a) Imagem resultante da limiarização nº 2. (b) Imagem LRPT bruta do canal 1.....	62
Figura 5.3 – Ilustração de aplicação do algoritmo de inundação.....	63
Figura 5.4 – (a) Imagem resultante do algoritmo de inundação aplicado à Figura 5.2(a). (b) Imagem inundada de cor invertida. (c) Imagem resultante da combinação das imagens da Figura 5.2(a) e da Figura 5.4(b). (d) Imagem resultante da inversão de cores da imagem da Figura 5.4(c).....	64
Figura 5.5 – Diagrama de fluxo do algoritmo proposto de geração de máscaras .....	65
Figura 5.6 – (a) Máscara final de retoque. (b) Imagem LRPT bruta do canal 1 .....	66

Figura 5.7 – (a) Máscara final de uma imagem IR (Canal 5). (b) Imagem IR bruta. (c) Histograma da imagem IR bruta.....	67
Figura 5.8 – (a) Trecho da imagem A Canal 1 ampliada. (b) Imagem restaurada e ampliada ( <i>Fast Marching</i> ). (c) Imagem restaurada e ampliada ( <i>Exemplar-based</i> ).....	69
Figura 5.9 – Esquema de inserção de falhas em imagens LRPT.....	71
Figura 5.10 – Imagem F Canal 2 bruta e restaurada com histogramas .....	73
Figura 5.11 – Trecho do código em Python para a geração de imagens coloridas multiespectrais LRPT .....	74
Figura 5.12 – Resultado da composição colorida. (a) RGB122 tradicional. (b) RGB122 amarronzado. (c) RGB122 esverdeado. (d) RGB125 .....	75
Figura 5.13 – Composição RGB122 tradicional de um trecho da imagem C com o círculo vermelho destacando a região metropolitana de Buenos Aires.....	76

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Algumas das principais faixas espectrais utilizadas para SR da Terra .....	17
Tabela 2.2 – Canais e resoluções do sensor radiômetro MSU-MR.....	26
Tabela 5.1 – Limiarização aplicada em cada canal de uma imagem LRPT .....	61
Tabela 5.2 – Pseudocódigo recursivo do algoritmo de inundação .....	63
Tabela 5.3 – Informações sobre a recepção e as imagens LRPT brutas decodificadas pela estação	68
Tabela 5.4 – Comparativo de valores de MSE e SSIM entre imagens com falhas e imagens restauradas pelos algoritmos de Telea (2004) e Buysens (2015). ....	70
Tabela 5.5 – Comparativo de valores de MSE e SSIM entre imagens sem falhas e restauradas por algoritmos de retoque.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog-to-digital Converter
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-broadcast
AGC	Active Gain Control
AM	Amplitude Modulation
APT	Automatic Picture Transmission
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
DCA	Double Cross Antenna
DSP	Digital Signal Processor
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
EDP	Equações Diferenciais Parciais
FM	Frequency Modulation
FPGA	Field-programmable Gate Array
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPP	General-purpose Processor
GRC	GNU-Radio Companion
GSM	Global System for Mobile Communications
HRPT	High Resolution Picture Transmission
I2C	Inter-integrated Circuit
IQ	In-phase and Quadrature
IR	Infrared
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LRPT	Low-rate Picture Transmission
MSE	Mean Squared Error
NCO	Numerically Controlled Oscillator
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
POES	Polar Operational Environmental Satellites
QFH	Quadrifilar Helical Antenna
QPSK	Quadrature Phase-shift Keying
RDS	Rádio Definido por Software
RF	Radio Frequency
RGB	Red-Green-Blue
RHCP	Right Handed Circular Polarization
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SR	Sensoriamento Remoto
SSIM	Structural Similarity Index
TIR	Thermal Infrared
TLE	Two-line Element
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus
VCO	Voltage-controlled Oscillator
VHF	Very High Frequency
VIS	Visible
VNIR	Visible and Near-infrared

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	12
<b>2</b>	<b>SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	15
2.1	INTERAÇÃO DA ENERGIA COM A SUPERFÍCIE .....	18
2.2	RESOLUÇÃO DOS SISTEMAS IMAGEADORES .....	20
2.3	SATÉLITES METEOROLÓGICOS.....	21
2.3.1	<b>Sistema de imagens de satélites polares meteorológicos .....</b>	22
2.3.2	<b>O satélite Meteor-M N2.....</b>	25
<b>3</b>	<b>RESTAURAÇÃO E MELHORAMENTO DE IMAGENS .....</b>	29
3.1	RESTAURAÇÃO DE IMAGENS .....	29
3.1.1	<b>Retoque digital .....</b>	29
3.1.2	<b>Avaliação da qualidade das imagens restauradas.....</b>	34
3.2	TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE IMAGENS .....	36
3.2.1	<b>Realce de contraste .....</b>	36
3.2.2	<b>Composição de imagens .....</b>	38
<b>4</b>	<b>ESTAÇÃO DE RECEPÇÃO DE IMAGENS METEOROLÓGICAS.....</b>	42
4.1	ANTENAS PARA RECEPÇÃO DE IMAGENS METEOROLÓGICAS .....	42
4.2	RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE.....	45
4.3	DESCRÍÇÃO DO HARDWARE.....	47
4.3.1	<b>Projeto da antena QFH.....</b>	48
4.3.2	<b>O Rádio RTL-SDR.....</b>	49
4.4	DESCRÍÇÃO DO SOFTWARE .....	52
4.4.1	<b>Rastreamento de satélites .....</b>	53
4.4.2	<b>Demodulação de Imagens LRPT.....</b>	54
4.4.3	<b>Decodificação de imagens LRPT .....</b>	57
<b>5</b>	<b>CORREÇÃO DE IMAGENS LRPT .....</b>	59
5.1	GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MÁSCARAS.....	59
5.1.1	<b>Algoritmo de limiarização.....</b>	61
5.1.2	<b>Algoritmo de inundação .....</b>	62
5.1.3	<b>Algoritmo de geração de máscaras.....</b>	65
5.2	RESTAURAÇÃO POR INPAINTING.....	67
5.2.1	<b>Comparação de imagens .....</b>	70
5.3	IMAGENS LRPT COLORIDAS .....	73
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	77
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	79
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	80

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o primeiro satélite meteorológico lançado em 1960, os sensores remotos a bordo de satélites artificiais, que orbitam a terra, tem sido ferramentas muito utilizadas para a construção de conjuntos de dados ambientais em escala global. O número crescente de satélites tem possibilitado a aquisição de imagens de qualquer ponto da Terra, mesmo em locais de acessibilidade reduzida e independentemente de fronteiras geopolíticas. As estações terrestres recebem um fluxo contínuo de dados provenientes de diversos satélites. Esses, são designados no monitoramento de elementos ambientais específicos, tais como, a temperatura da superfície terrestre, padrões de nuvens, ciclones e muitos outros (PATIL, 2016).

A série de satélites meteorológicos denominada NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), por exemplo, possui um sinal de transmissão denominado APT (*Automatic Picture Transmission*), muito popular entre meteorologistas e radioamadores, que o utiliza para receber imagens usadas para diversos fins, como também para a previsão do tempo. O sistema de transmissão APT é analógico e transmite com modulação FM (*Frequency Modulation*). Esse formato tem sido utilizado desde a década de 1963 por estações receptoras terrestres que possuem baixos custos de implementação (GOODRUM, 1999). Por estar disponível na banda 137-138 MHz, simples dispositivos e programas são capazes de decodificar o sinal APT, principalmente com o surgimento de diversos Rádios Definidos por Software (RDS) de baixo custo como por exemplo, o RTL-SDR. Entretanto, o formato APT possui muitas características que, devido ao avanço da tecnologia, se encontram defasadas quando comparadas a novos formatos. A resolução espacial de 4 km e a baixa imunidade a ruídos devido ao tipo de modulação utilizado, FM/AM, são exemplos de desvantagens deste tipo de recepção (MIJIA, 2017).

Imagens da superfície da Terra com maior qualidade e resolução espacial (1 km) podem ser obtidas por meio do formato LRPT (*Low-rate Picture Transmission*), o qual foi adotado pelo conjunto de satélites de órbitas polares MetOp e Meteor-M (DASCAL, 2015). Este formato é utilizado pela Organização Meteorológica Mundial para a transmissão digital de imagens da Terra a partir de satélites meteorológicos de baixa órbita nas bandas entre 137-138 MHz – a mesma banda do sinal APT – e com uma largura de banda máxima de 150 kHz. Além disso, o equipamento necessário

para a decodificação de imagens LRPT não é muito diferente do equipamento de recepção do sinal APT, exceto pelos programas e algoritmos de decodificação e processamento de sinais utilizados que são mais complexos.

Na última década verificou-se um crescente interesse em aplicações diversas inseridas nas áreas de sensoriamento remoto e processamento de imagens. Um tema com aplicações importantes, impulsionado por essa ascensão, é o de restauração e melhoramento de imagens digitais. Técnicas de restauração, como por exemplo o retoque digital, é considerado um problema desafiador da computação gráfica e do processamento de imagens. Trabalhos de Late (2016) e Desai (2012) aplicaram o retoque digital em imagens obtidas pelo sensoriamento remoto de diversos satélites, mas nenhum aplicado diretamente às imagens do sinal LRPT, que é considerado o sucessor do popular sinal APT.

Por todos esses motivos e ainda pela carência de pesquisas nesses temas no âmbito brasileiro e da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), essa dissertação de mestrado tem como objetivo principal abordar a teoria e a prática do sensoriamento remoto de imagens LRPT meteorológicas do satélite russo Meteor-M N2, aplicando técnicas de processamento de sinais e imagens para obter a correção automática de imagens decodificadas. Por correção automática, entende-se como sendo a aplicação de técnicas de retoque digital, realce de contraste e composição colorida nas imagens decodificadas e sem a intervenção manual, pois esta é realizada automaticamente pelo software desenvolvido para a estação receptora construída no decorrer desse trabalho. Como objetivos específicos desta pesquisa, pode-se citar os seguintes: a construção de uma estação receptora que realiza a decodificação de imagens LRPT; a geração automática de máscaras de retoque; a aplicação de técnicas de correção de imagens e o comparativo entre dois algoritmos de retoque, *Fast Marching* (TELEA, 2004) e *Exemplar-based* (CRIMINISI, 2004; BUYSSENS, 2015), nas imagens LRPT.

Como principal motivação para essa pesquisa, destaca-se o fato desse estudo possibilitar a investigação de temas como rádio definido por software, sensoriamento remoto, processamento de imagens, além da implementação de um sistema completo de recepção, demodulação, decodificação e pós processamento de imagens do mais moderno satélite meteorológico de órbita polar russo, Meteor-M N2. Deste modo, outro fator motivador desta pesquisa é o fato dessa situar-se na concepção de tecnologias contemporâneas, bem como contribuir com novos conhecimentos ao Grupo de

Pesquisa GLONASS da UFSM. Por se tratar de uma pesquisa multidisciplinar, essa dissertação está organizada da seguinte forma.

No Capítulo 2 são introduzidos os fundamentos do sensoriamento remoto, a apresentação do satélite Meteor-M N2, e elencadas as características do sinal e das imagens LRPT.

O Capítulo 3 aborda o tema de restauração e melhoramento de imagens, trazendo alguns conceitos e a descrição dos algoritmos de retoque digital, avaliação da qualidade de imagens e técnicas de realce de contraste e composição.

O Capítulo 4 inicia-se apresentando alguns tipos de antenas para recepção meteorológica e os fundamentos do rádio definido por software, destacando o rádio RTL-SDR. Na sequência, descreve-se a estação receptora proposta, bem como a confecção da antena QFH (*Quadrifilar Helical Antenna*), os dispositivos de hardware e o funcionamento do software, que é dividido em: rastreamento de satélites, demodulação na plataforma de desenvolvimento *GNU Radio Companion* e decodificação das imagens.

O Capítulo 5 apresenta, inicialmente, uma proposta de geração automática das máscaras de retoque e em seguida os resultados do melhoramento e da composição multiespectral colorida das imagens LRPT. Dois tipos de algoritmos de retoque são utilizados na restauração e seus resultados são avaliados quanto a qualidade das imagens geradas.

Finalmente, no Capítulo 6, a dissertação é finalizada com algumas considerações e conclusões finais em relação ao conteúdo apresentado.

## 2 SENSORIAMENTO REMOTO

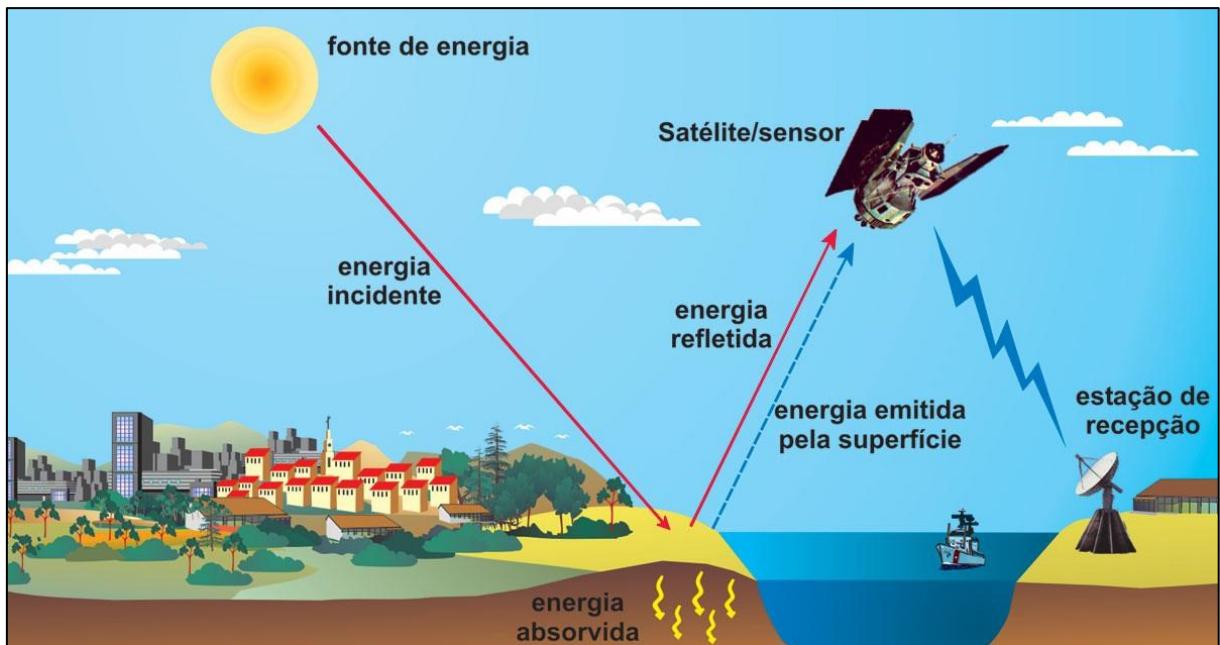
Sensoriamento Remoto (SR) é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre por meio da captação e do registro da energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície (FLORENZANO, 2001). O autor Schowengerdt (2006) define SR como a medição das propriedades de objetos na superfície da Terra, utilizando dados adquiridos de aeronaves ou satélites. Entretanto, segundo Lorenzetti (2015), a definição de SR está sujeita a diferentes interpretações. Em um conceito mais amplo, SR pode ser definido como a aquisição de informação sobre alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, sem contato físico com ele. Independentemente desses conceitos, o aspecto chave da definição de SR é o uso de sensores sensíveis a radiação eletromagnética para inferir propriedades de objetos da superfície terrestre (NOVO, 2010). Há diferentes tipos de sensores que são sensíveis a diferentes faixas espectrais. A escolha de um determinado sensor dependerá do tipo de informação que se quer extrair de uma dada área a ser observada.

Os sistemas de sensoriamento remoto – particularmente aqueles por satélite – fornecem dados repetitivos e consistentes da Terra. Esses dados são muito úteis não apenas para o monitoramento de mudanças na natureza, mas também para o monitoramento das alterações na biosfera causadas por ações antrópicas. Dentre as diversas aplicações, podem-se destacar:

- Monitoramento atmosférico: dinâmica da atmosfera, temperatura, concentração de gases, meteorologia, etc;
- Monitoramento da superfície terrestre: geologia, planejamento urbano, agricultura, etc;
- Monitoramento dos oceanos: temperatura da superfície do mar, cor e poluição do oceano, topografia de correntes e marés, etc;
- Monitoramento de atividades ilegais, e.g., desmatamento ilegal;
- Aplicações na área de defesa, como por exemplo: identificação de alvos, minas terrestres, atividades de tráfico, etc.

A Figura 2.1 ilustra o processo de aquisição de informação sobre um alvo na superfície terrestre por meio de SR.

Figura 2.1 – Obtenção de imagens por sensoriamento remoto



Fonte: Florenzano (2011).

Na Figura 2.1 pode-se verificar que a energia proveniente do Sol é refletida pela superfície da Terra em direção ao sensor radiômetro do satélite, onde é captada e, posteriormente, registrada em um receptor elétrico-eletrônico. Na sua trajetória, a energia atravessa a atmosfera e é retroespalhada antes de ser percebida pelo sensor do satélite. Esse retroespalhamento será maior para altitudes maiores, como é o caso de satélites em órbitas terrestres altas. Em locais com presença de muitas nuvens, a energia pode ser quase imperceptível para o sensor. Alguns sensores a bordo de satélites meteorológicos, por exemplo, são denominados sensores imageadores, ou seja, os dados captados por eles são diretamente convertidos em imagens e transmitidos para estações de recepção na Terra, que são equipadas com antenas adequadas para a recepção do sinal.

Para alcançar as necessidades de diferentes usuários, muitos sistemas de sensoriamento remoto têm sido lançados, oferecendo, assim, uma grande gama de parâmetros espaciais, espectrais e temporais. Para o uso de SR na meteorologia, algumas aplicações requerem uma cobertura constante; todavia, com uma resolução espacial relativamente baixa.

A energia eletromagnética usada em SR é dividida em faixas espectrais que são classificadas em termos de bandas de frequência ou comprimentos de onda. Algumas dessas faixas são mostradas na Tabela 2.1.

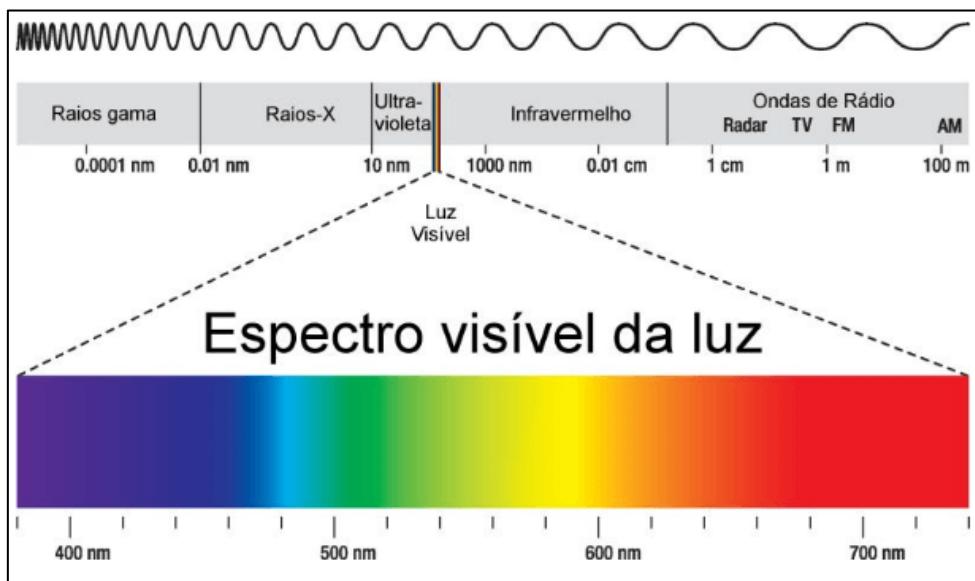
Tabela 2.1 – Algumas das principais faixas espectrais utilizadas para SR da Terra

	<b>Comprimento de onda</b>	<b>Fonte de radiação</b>	<b>Propriedade de interesse</b>
Visível (V)	0,4 - 0,7μm	Solar	Reflectância
Infravermelho próximo (NIR)	0,7 - 1,1μm	Solar	Reflectância
Infravermelho médio (MWIR)	3 - 4μm	Solar	Reflectância
Infravermelho termal (TIR)	10 - 14μm	Termal	Temperatura

Fonte: Meneses (2012).

A região do visível é a faixa do espectro que é sensível ao olho humano. Ela é muito utilizada em SR, pois interage com os minerais e vegetações, dando origem às suas cores e pigmentos (MENESES, 2012). A Figura 2.2 ilustra as faixas espectrais de acordo com o comprimento de onda, destacando a região da faixa visível. O conteúdo espectral ilustrado na Figura 2.2 abrange desde curtos comprimentos de onda, como os raios gama, até longos comprimentos de onda, como as ondas de rádio de baixa frequência. Algumas faixas espectrais já são conhecidas pelos pesquisadores da área de sensoriamento remoto em função das possíveis aplicações. Por exemplo, na faixa do infravermelho, os comprimentos de onda mais longos do IR médio provaram ser úteis em várias aplicações geológicas (SCHOWENGERDT, 2006). Já as regiões do infravermelho termal, têm provado serem muito úteis para monitorar um amplo conjunto de aplicações que vão desde o monitoramento de incêndio, até estudos sobre a concentração/distribuição de animais e condições de umidade do solo. Existem várias outras faixas do espectro eletromagnético importantes para o SR que não serão apresentadas nesse trabalho, pois fogem do escopo dessa dissertação de mestrado.

Figura 2.2 – Espectro e alguns comprimentos de onda, com destaque ao espectro visível



Fonte: Furian (2016).

## 2.1 INTERAÇÃO DA ENERGIA COM A SUPERFÍCIE

A energia que chega à superfície do planeta interage com a vegetação, água, solo e com todos outros objetos presentes na superfície. Dessa interação, a energia pode ser fracionada em três partes: absorvida, transmitida e refletida.

A fração absorvida é resultado da transferência de energia da radiação para o material afetado. A fração transmitida é aquela que percorre o meio (e.g., o ar) sem alterar as características principais do sinal, a não ser a perda de potência que é intrínseca à própria propagação do sinal. Já a fração refletida pelos objetos, é de grande importância para o SR, pois é esse fenômeno que permite a geração de imagens pelos sistemas de sensoriamento remoto. A energia total é ponderada entre essas três partes de acordo com o comprimento de onda e das características biofísicas e químicas daquilo que interage com o sinal (MOREIRA, 2012). Graças a essas variações, é possível diferenciar os objetos da superfície terrestre em imagens de SR. A representação de tais objetos variam do branco (muita energia refletida) ao preto (pouca energia refletida).

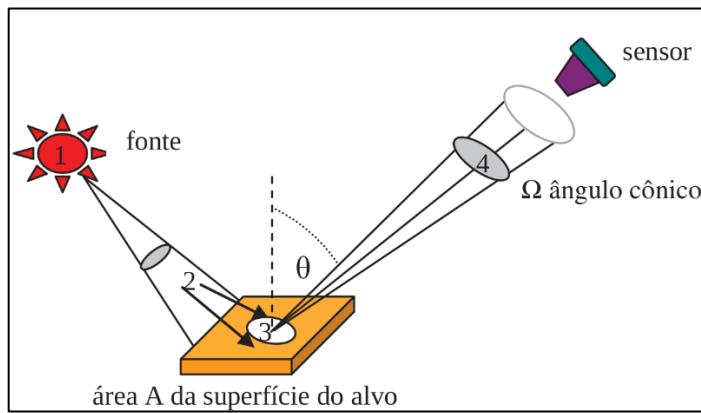
Um exemplo do comportamento da interação da radiação eletromagnética pode ser explicada com o que ocorre com as nuvens. Os comprimentos de onda do espectro

visível e do IR possuem, em média, tamanhos menores que o tamanho médio das moléculas de vapor de água de uma nuvem, que é da ordem de  $30 \mu\text{m}$  (MENESES, 2012). Por causa dessa diferença de tamanho, a radiação eletromagnética do visível e do IR é barrada por essas moléculas e refletida de volta ao espaço. Desse modo, o sensor registra a reflectância da nuvem, para então, formar a imagem dela e não dos objetos sobre a superfície terrestre.

A forma como um sensor mede a radiação eletromagnética, para qualquer comprimento de onda, é considerada uma medição radiométrica. Por esse motivo, sensores imageadores também são denominados radiômetros imageadores. Esses sensores são capazes de fornecer um matriz de pixels. A radiometria apresenta um conjunto de termos e leis que, em SR, são fundamentais para explicar o significado físico dos valores de radiação medidos pelo sensor. Para uma melhor compreensão, alguns conceitos básicos são apresentados de forma simplificada e ilustrados na Figura 2.3, definidos a seguir:

- Fluxo radiante solar: é a taxa na qual a energia radiante do Sol é transferida de um ponto para outra superfície e é medido em Watts (W);
- Irradiância: é o fluxo radiante solar incidente na superfície do terreno por área de superfície ( $\text{W/m}^2$ );
- Radiância: é a medida feita pelo sensor do fluxo radiante que deixa uma área da superfície e se propaga em uma direção definida por um cone de ângulo sólido  $\Omega$  contendo aquela direção;
- Reflectância: é a razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (Radiância) pela quantidade de energia incidente naquela área (Irradiância), medida no mesmo instante de tempo. Qualquer objeto poderá refletir uma porcentagem maior que 0% e menor que 100% da radiação incidente.

Figura 2.3 – Sequência da trajetória da radiação eletromagnética indicada pelos números de 1 a 4, da fonte ao sensor



Fonte: Meneses (2012).

Sendo assim, os dados obtidos pelo sensor radiômetro são valores de intensidade da radiância convertidos em valores digitais para a constituição de uma imagem digital. Em outras palavras, uma imagem obtida por satélite é um conjunto ordenado de valores numéricos, em que cada valor está relacionado com a radiância de uma área no objeto, representada por um pixel.

## 2.2 RESOLUÇÃO DOS SISTEMAS IMAGEADORES

Os sistemas imageadores possuem características que são expressas por quatro domínios de resolução, denominados: espacial, radiométrica, espectral e temporal. Tais resoluções são características importantes para o processamento dos dados digitais da imagem e podem ser definidas da seguinte forma:

- A resolução espacial é definida como a menor área imageada pelo sensor, que na imagem, é o tamanho do pixel no terreno. Uma resolução de 1 km, por exemplo, indica que objetos com dimensões menores do que essa resolução não serão visualizados na imagem;
- A resolução radiométrica está relacionada com a capacidade de detectar as menores variações possíveis de incidência de energia, ou seja, ela define o número de níveis de radiância que o sensor pode discriminar (MOREIRA, 2012). Em um radiômetro, por exemplo, se os sinais são discretizados em 8 bits, isso quer dizer que a imagem formada terá até 256 ou  $2^8$  níveis digitais;

- A resolução espectral se baseia na largura da faixa de frequências que o sensor opera. De maneira geral, quanto mais estreita for a largura de faixa de frequências, maior será a resolução espectral. É importante destacar que um número grande de faixas espectrais não é sinônimo de uma melhor resolução espectral, pois ela está intimamente ligada à largura de faixa de atuação do sensor. Ou seja, o sensor utilizado deve estar bem “casado” com a faixa de frequências que está sendo considerada para a realização do sensoriamento;
- A resolução temporal é uma característica que refere-se à frequência de passagem do sensor radiométrico operado por satélite num mesmo local, e num determinado intervalo de tempo. Um acompanhamento dinâmico dos objetos sobre a superfície da Terra só é possível porque alguns satélites de SR executam uma órbita heliossíncrona (polar).

### 2.3 SATÉLITES METEOROLÓGICOS

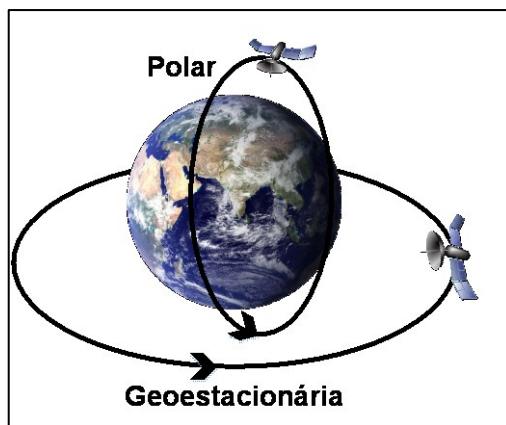
Os satélites meteorológicos fazem parte do grupo de satélites de sensoriamento e monitoramento do meio ambiente do planeta Terra. Com início na década de 1960, a meteorologia entrou na era do espaço com o lançamento do primeiro satélite meteorológico TIROS-1 (*Television and Infra-Red Observation Satellite*), que possuía à bordo dois sensores de câmeras de televisão. O programa TIROS lançou ao espaço um total de dez satélites e foi conhecido como sendo a primeira geração de satélites meteorológicos dos Estados Unidos.

Após os lançamentos experimentais do programa TIROS, diversos outros programas e satélites foram lançados, buscando atender a demanda por análises climáticas mais precisas e dados com resoluções espaciais e temporais maiores. Na antiga União Soviética, no ano de 1962 – antecedendo o programa meteorológico Meteor – foi lançado o primeiro satélite experimental Kosmos-44. Entretanto, foi somente em 1969 que o primeiro satélite operacional Meteor 1-1 foi lançado, dando início a criação de diferentes séries de satélites soviéticos, tais como o Meteor-1, Meteor-2, Meteor-3 e, mais recentemente, o Meteor-M. Informações mais detalhadas sobre diferentes programas atuais de outros países, bem como dados históricos e técnicos podem ser encontrados em Tan (2013).

Os satélites meteorológicos são classificados em dois tipos: satélites de órbita polar (heliossíncrona) e de órbita geoestacionária (cf. Figura 2.4), os quais,

conjuntamente, fornecem um sistema de monitoramento climático global. Os satélites de órbita polar movimentam-se em uma trajetória de baixa altitude (de 550 até 850 km), passando sobre ambos os polos, de norte a sul ou vice-versa, coletando dados de oceanos, do solo e da atmosfera. Os satélites geoestacionários são posicionados em maiores altitudes (aproximadamente 36 mil km) e orbitam sincronizados com a rotação da Terra, fornecem uma observação constante de eventos climáticos severos, como ciclones, chuvas torrenciais e tempestades tropicais (TAN, 2013).

Figura 2.4 – Ilustração de órbita polar e geoestacionária



Fonte: Autor.

Atualmente, o mais moderno satélite meteorológico geoestacionário em órbita terrestre é o NOAA GOES-16, lançado no dia 19 de novembro de 2016. Em uma altitude de aproximadamente 36 mil quilômetros, esse satélite monitora padrões de incêndios e é capaz de fornecer alertas mais rápidos e mais precisos sobre questões climáticas na América do Norte.

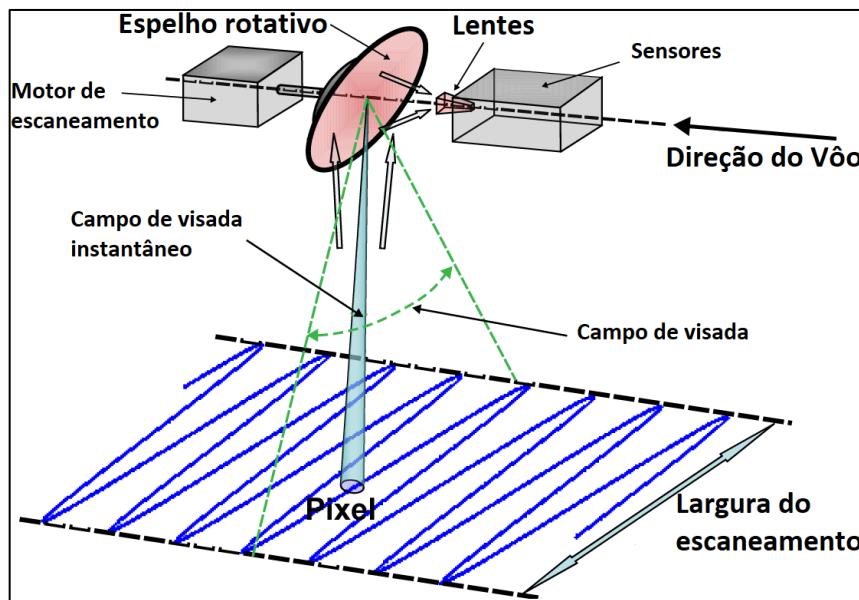
### **2.3.1 Sistema de imagens de satélites polares meteorológicos**

Os mais populares satélites meteorológicos de órbitas polares atuais são os da série NOAA-POES (EUA), MetOp (Europa) e da série Meteor-M (Rússia). Esses satélites caracterizam-se por transmitirem seus dados continuamente em diversas frequências, modulações, modos de transmissão e resoluções; entretanto, eles possuem o mesmo princípio de funcionamento. Diferentemente dos primeiros satélites lançados na década de 60, eles não carregam a bordo câmeras de televisão ou

máquinas fotográficas, mas sim, um sistema óptico muito preciso, chamado radiômetro de varredura.

De maneira simplificada, o radiômetro de varredura é composto por um sistema de lentes, um sistema de espelhos acoplados a um motor e alguns sensores do tipo fotodiodos, como ilustra a Figura 2.5. O sistema de lentes acoplados ao sistema rotativo, capta através de uma abertura, as variações das intensidades da radiância da superfície da Terra. Dessa forma, a cada rotação do espelho, somente uma pequena faixa da superfície terrestre é escaneada. Nos satélites NOAA-POES, o sensor radiômetro AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) pode gerar um escaneamento com uma largura aproximada de 3000 quilômetros por 4 quilômetros de comprimento (na direção do voo) a cada revolução do espelho (WALLACH, 1997).

Figura 2.5 – Sistema de um radiômetro de varredura



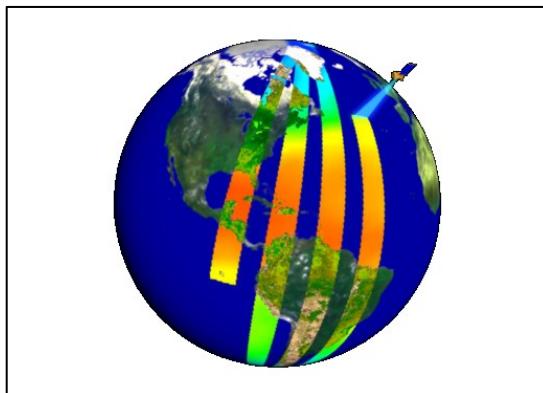
Fonte: Klose (2016).

Além do escaneamento, o radiômetro tem a função de converter as variações de brilho e contraste do sistema óptico em sinais elétricos. Dentro do satélite, esses sinais são enviados para um sistema de modulação, para que posteriormente sejam transmitidos às estações terrestres. No modo APT (*Automatic Picture Transmission*) dos satélites NOAA-POES, o modulador tem a função de variar a amplitude de uma subportadora AM de 2400Hz que é injetada no transmissor de VHF a bordo dos

satélites. Já no modo LRPT (*Low-rate Picture Transmission*) do satélite Meteor-M N2, a informação proveniente do sistema óptico é digitalizada e transmitida em modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) com uma portadora de aproximadamente 137MHz. Um transmissor de 5 Watts alimenta uma antena QFH que irradia o sinal que será recebido pelas estações terrestres (ESPINET, 2014).

O sistema de varredura opera continuamente de modo que, enquanto o sinal transmitido pelo satélite estiver ao alcance da estação receptora, a imagem estará sendo recebida e processada. Assim, o início da formação da imagem na estação receptora ocorre quando o sinal é recebido e o seu término ocorre no momento em que o sinal é perdido. A duração de recepção de uma imagem de um satélite de órbita polar é de 8 a 14 minutos, sendo que quanto mais longa, maior será a cobertura geográfica da imagem.

Figura 2.6 – Trajetória de um satélite em órbita polar



Fonte: Russel (1998).

A Figura 2.6 mostra que a trajetória dos satélites meteorológicos polares atravessa a linha do equador em diferentes longitudes em cada período. Isso significa que eles são capazes de disponibilizar o sinal para qualquer estação terrestre com as mesmas condições gerais de iluminação pelo menos duas vezes ao dia, devido ao tempo solar local quase constante.

### 2.3.2 O satélite Meteor-M N2

No dia 08 julho de 2014, foi lançado o mais recente satélite meteorológico de órbita polar Russo, denominado Meteor-M N2, conforme mostra a Figura 2.7. É o segundo satélite implantado na série de satélites de órbitas polares Meteor-M a ser utilizado em apoio a diferentes agências russas de meteorologia e meio ambiente (DASCAL, 2015). O terceiro satélite da série denominado Meteor-M N2-1, foi lançado no dia 28 de novembro de 2017, mas devido à problemas técnicos, a carga útil do foguete saiu da órbita prevista e caiu no oceano Atlântico (ROSCOSMOS, 2017).

O objetivo geral do satélite Meteor-M N2 é realizar, em um prazo de cinco anos, observações globais da atmosfera e da superfície terrestre. Sua principal missão é coletar dados para fins científicos relacionados ao monitoramento global das mudanças climáticas, previsão do tempo em escala regional e mundial, monitoramento de oceanos, entre outros. Em uma altitude média de 832 km e em uma órbita polar com período aproximado de 101 minutos, o Meteor-M N2 transmite seis canais do sensor radiômetro MSU-MR no formato HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) na frequência de 1,7 GHz. As imagens HRPT são imagens digitais de 10 bits de resolução radiométrica que são transmitidas por satélites meteorológicos e, em função dos equipamentos necessários para isso, somente centros de aquisições de imagens são capazes de recebê-las (APOLO11, 2007).

Entretanto, juntamente com o sinal HRPT também é transmitido o sinal LRPT na frequência principal de 137,1 MHz e na frequência secundária de 137,9 MHz. O sinal LRPT é um sistema digital de transmissão projetado para fornecer dados e imagens de satélites em órbitas polares diretamente para os usuários finais. É considerado o sucessor substituto do antigo sistema analógico APT, que é ainda muito utilizado para fornecer imagens derivadas do sensor radiômetro AVHRR/3 a bordo dos satélites NOAA-POES (atualmente operacionais: NOAA-15, NOAA-18 e NOAA-19). Por convenção, o sinal LRPT possui 8 bits de resolução radiométrica e transmite apenas 3 dos 6 canais disponíveis no radiômetro MSU-MR. Atualmente, durante o dia, são selecionados automaticamente os Canais 1, 2 e 5 como mostra a Tabela 2.2.

Durante a noite, o satélite desliga os dois primeiros canais e somente no Canal 5 é possível se obter informação visual de imagem IR. Os três canais selecionados são comprimidos por um algoritmo JPEG para criar a estrutura do pacote no qual é digitalmente transmitido numa taxa de transmissão preestabelecida de 72 k ou 80 k

símbolos/segundo (ESPINET, 2014). Após, o sinal LRPT é modulado e transmitido com polarização circular RHCP (*Right Handed Circular Polarization*) para as estações terrestres através de uma antena QFH destacada pelo círculo vermelho na Figura 2.7. Atualmente, somente a frequência de 137,9 MHz está operacional, com uma taxa de transmissão de 72 kpbs.

Figura 2.7 – Satélite meteorológico russo Meteor-M N2 lançado em 2014. Em detalhe a antena de transmissão QFH utilizada para transmissão do sinal no formato LRPT



Fonte: Graham (2017).

A Tabela 2.2 apresenta as resoluções espectrais de cada canal do radiômetro MSU-MR. Os detalhes sobre o tratamento de dados do MSU-MR podem ser encontrados em SRC, (2016).

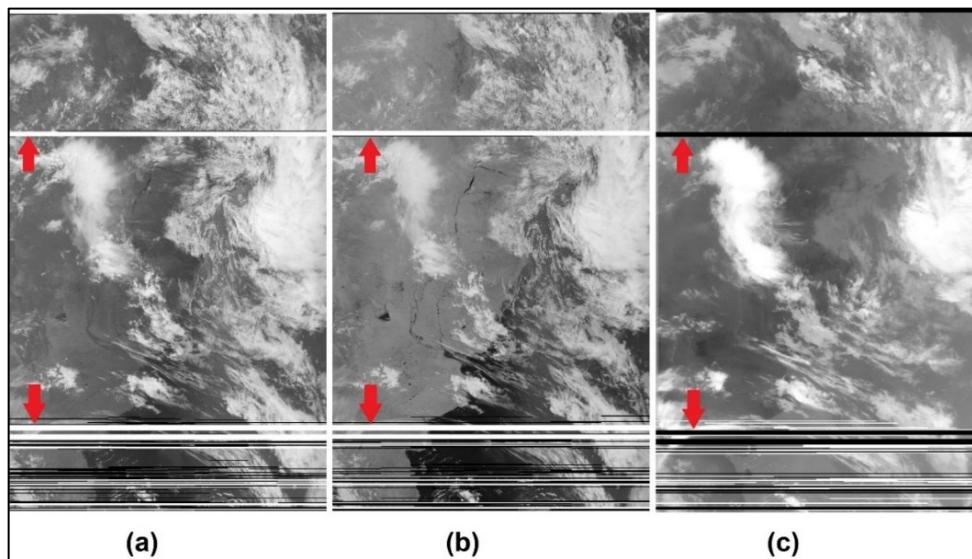
Tabela 2.2 – Canais e resoluções do sensor radiômetro MSU-MR

Canais MSU-MR	Resolução Espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Espacial em nadir
1 – Visível (VIS)	0,5 – 0,7	1 km (LRPT)
2 – IR próximo visível (VNIR)	0,7 – 1,1	
3 – IR de onda curta (SWIR)	1,6 – 1,8	
4 – IR de onda média (MWIR)	3,5 – 4,1	
5 – IR termal (TIR)	10,5 – 11,5	
6 – IR termal (TIR)	11,5 – 12,5	

Fonte: Dascal (2015).

Para efeito de ilustração das imagens LRPT recebidas em cada passagem do satélite, a Figura 2.8 apresenta três imagens com dados brutos dos Canais 1, 2 e 5, respectivamente. As imagens são sempre transmitidas em tons de cinza, podendo possuir até  $2^8$  bits = 256 tonalidades diferentes.

Figura 2.8 – (a) Imagem do Canal 1 (VIS), (b) Imagem do Canal 2 (VNIR), (c) Imagem do Canal 5 (TIR)



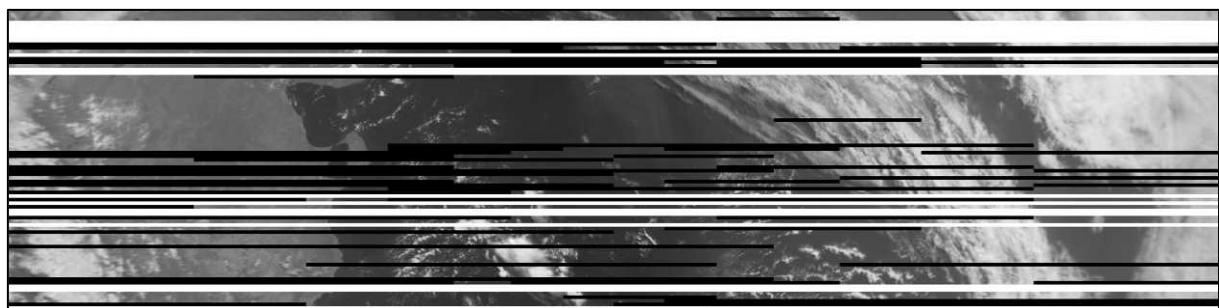
Fonte: Autor.

As imagens LRPT podem apresentar dois tipos de falhas durante a sua recepção e que são consideradas nesse trabalho. A primeira é provocada por uma característica do próprio satélite Meteor-M N2 que produz uma interrupção na transmissão dos dados aproximadamente a cada 6,5 minutos (ESPINET, 2014). Essa falha ocorre somente em imagens LRPT, devido ao processo de compressão JPEG da conversão do sinal HRPT para o sinal LRPT (DASCAL, 2015). A Figura 2.8 destaca, por meio de setas vermelhas, a falha nas imagens de cada canal do sensor MSU-MR. Como pode-se observar, a interrupção do sinal afeta todos os canais de maneira semelhante, porém não idêntica. As linhas escuras e as linhas claras possuem padrões e tonalidades diferentes para cada canal.

O segundo tipo de falha, comumente encontrado em imagens LRPT, possui um comportamento visual semelhante a ruídos, como mostra a Figura 2.9. Eles são conhecidos como erros radiométricos do tipo *line drop-out*, que devido à perda do sinal do satélite durante a recepção, uma ou mais linhas da imagem não possuem valores

de sinal útil, aparecendo então na imagem com níveis de cinza bem diferentes da sua vizinhança (EASTMAN, 2001). Embora esses ruídos possam ser explicados por condições locais à estação receptora, como interferência de RF, alguns podem estar relacionados a problemas de software, problemas de hardware ou na antena da estação (DASCAL, 2015). Tais ruídos também podem ser explicados pelas flutuações na potência do sinal recebido e são comuns nas extremidades superiores e inferiores das imagens, tipicamente devido ao baixo ângulo de elevação do satélite.

Figura 2.9 – Exemplo de defeitos encontrados em imagens LRPT



Fonte: Autor.

Embora não tenham sido encontrados muitos trabalhos científicos sobre as imagens LRPT, diversas galerias de imagens denunciam a presença dessas falhas. Estações receptoras localizadas na Austrália (WEATHER, 2016), Alemanha (METEORM, 2016) e em outros países (BOPP, 2016) possuem uma variedade de imagens brutas e multiespectrais contendo esse tipo de erro e que podem dificultar a sua análise caso não sejam melhoradas por meio de técnicas de processamento de imagens. O Capítulo 3 aborda algumas técnicas de restauração e melhoramento de imagens digitais que foram aplicadas nas imagens LRPT consideradas nesse trabalho.

### 3 RESTAURAÇÃO E MELHORAMENTO DE IMAGENS

A restauração e melhoramento de imagens são operações básicas que compõem o processamento de imagens do sensoriamento remoto. Essas operações são consideradas como o processamento que ocorre logo após a etapa de recepção das imagens e têm a finalidade de realizar uma otimização visual e correção de possíveis distorções radiométricas e geométricas.

#### 3.1 RESTAURAÇÃO DE IMAGENS

A operação de restauração está relacionada à remoção de distorções em termos de energia eletromagnética registrada e também à adequação da imagem para a composição de mapas e projeções diversas (EASTMAN, 2001). A restauração pode ser dividida em duas partes:

- Restauração radiométrica: refere-se à remoção ou atenuação de distorções dos ruídos tipo randômicos, *line drop-out*, entre outros.
- Restauração geométrica: refere-se a retificação da imagem para fins de composição de mapas e projeções geométricas.

As falhas das imagens LRPT explicadas na Subseção 2.3.2, portanto, caracterizam-se como sendo radiométricas do tipo *line drop-out*. De acordo com Nrcan (2016), essas falhas são normalmente corrigidas substituindo a linha defeituosa por valores de pixels da linha superior ou inferior, ou com a média dessas duas. Esse tipo de problema pode ser resolvido pela técnica conhecida por *inpainting* ou retoque digital. Alguns trabalhos, como Singh (2016), Trivedi (2014), Late (2016), Desai (2012) abordam de maneira ampla as diversas técnicas de *inpainting* aplicadas nas imagens do sensoriamento remoto.

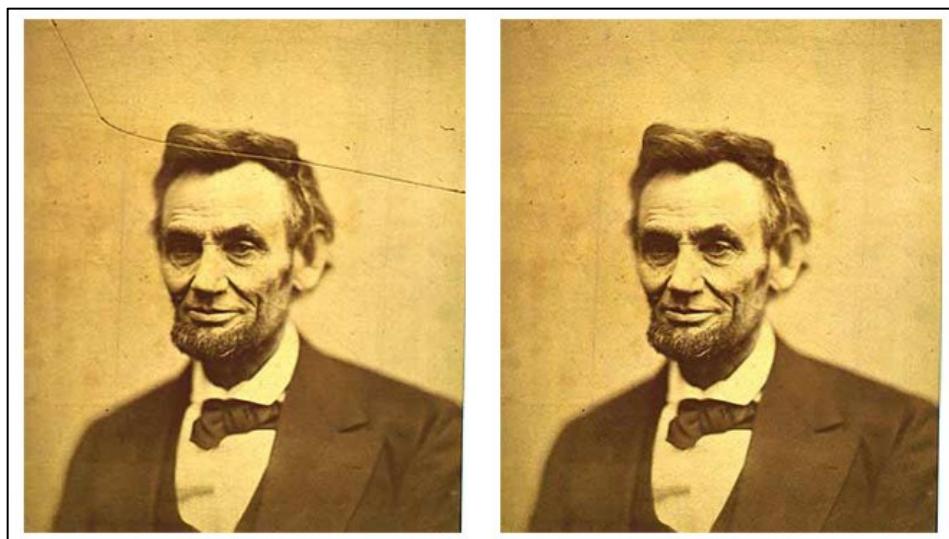
##### 3.1.1 Retoque digital

*Inpainting* ou retoque digital, são os nomes usados para definirem a seguinte tarefa: dada uma imagem com uma região perdida ou distorcida, restaura-se os valores nessa região, de forma que o resultado final seja imperceptível ao olho

humano, tornando-a mais legível e homogênea (LEVIN, 2003). A Figura 3.1 mostra um exemplo de imagem original danificada e uma restaurada pelo retoque digital.

O termo *inpainting* é derivado da arte antiga de restauração realizada por profissionais de museus e estúdios de artes. O retoque digital é composto por diversos tipos de algoritmos que tentam imitar esse processo com o preenchimento automático das regiões selecionadas baseando-se em informações disponíveis na imagem.

Figura 3.1 – Exemplo de Imagem original e restaurada por retoque digital



Fonte: Oliveira (2001).

As aplicações de *inpainting* são numerosas, desde a restauração de pinturas e fotografias danificadas até a remoção ou substituição de objetos previamente selecionados (BERTALMIO, 2000). O objetivo do retoque digital não é recuperar a imagem original, mas sim criar alguma imagem que tenha a máxima semelhança com a original (PANDYA, 2013). O principal objetivo desse processo é reconstruir partes danificadas ou faltantes da imagem, de tal modo que a região retocada não seja detectada por um observador casual.

O retoque digital serve uma ampla gama de aplicações, como a remoção de texto e logos de imagens estáticas ou vídeos, reconstrução de imagens deterioradas, remoção de arranhões ou manchas, ou criação de efeitos artísticos (TELEA, 2004).

A maioria dos métodos de *inpainting* funcionam da seguinte maneira: primeiro, as regiões da imagem a serem retocadas (ou máscaras) são selecionadas, geralmente, manualmente. Em seguida, a informação de cores da própria imagem é

usada para preencher as áreas danificadas ou faltantes. Para produzir uma reconstrução visualmente agradável, a técnica de retoque deve tentar propagar os isótopos de forma tão suave quanto possível dentro da região reconstruída. Os isótopos são linhas de intensidades constantes da imagem ou, em outras palavras, são estruturas lineares com os mesmos tons de cores.

Vários algoritmos de *inpainting* têm sido propostos para a restauração de imagens digitais, como por exemplo: de Bertalmio (2000), Oliveira (2001), Criminisi (2004), Telea (2004), entre outros. De acordo com Desai (2012), os algoritmos de *inpainting* podem ser classificados em três categorias básicas: baseados em equações diferenciais parciais (EDP), baseados em exemplares (*exemplar-based*) e baseados em classificação de bloco de imagem.

A primeira categoria – baseada em EDP – produz bons resultados se as regiões danificadas são pequenas. Para regiões maiores, o algoritmo pode se tornar lento e produzirá um resultado com pixels borrados (DESAI, 2012). Já os algoritmos baseados em exemplares, possuem uma abordagem eficiente para a restauração de grandes regiões, pois identificam as amostras da imagem mais adequadas para o preenchimento da região danificada (LATE, 2016). E por último, a categoria de classificação de bloco de imagem utiliza a classificação de textura e estrutura para reconstruir regiões perdidas de imagens transmitidas em aplicações *wireless* e de compressão de imagens (RANE, 2003). Essa pesquisa utiliza algoritmos pertencentes às duas primeiras categorias: o algoritmo de *Fast Marching* (baseado em EDP) e algoritmos do tipo *Exemplar-based*.

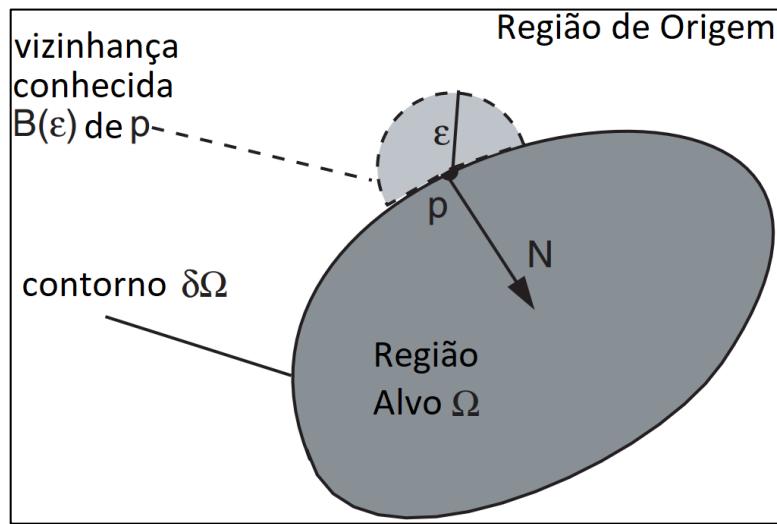
### 3.1.1.1 Método *Fast Marching*

O autor Telea (2004) apresenta um algoritmo baseado em EDP que trata as regiões de restauração como um conjunto de níveis e utiliza o método *Fast Marching* (SETHIAN, 1996) para propagar a informação da imagem. Algoritmos baseados em EDP tem sido utilizados largamente em diversas aplicações, como segmentação e restauração de imagens, haja vista que procuram manter a estrutura da área de retoque (PANDYA, 2013).

De acordo com a Figura 3.2, os pixels da região alvo  $\Omega$  são sintetizados um a um, de acordo com a sua distância do contorno  $\delta\Omega$ . O ponto  $p$  que está situado no contorno  $\delta\Omega$  da região alvo  $\Omega$  deve ser determinado pelos valores conhecidos

(vizinhança) dos pontos da imagem próximos a ele, isto é  $B\varepsilon(p)$ , sendo  $\varepsilon$  o tamanho da vizinhança. O algoritmo primeiramente utiliza o método *Fast Marching* para decidir a ordem de preenchimento dos pixels a serem restaurados. Nesse sentido, para restaurar um pixel é utilizada uma série de Taylor de primeira ordem da região definida por  $B\varepsilon(p)$ .

Figura 3.2 – Princípio do algoritmo de *Inpainting*



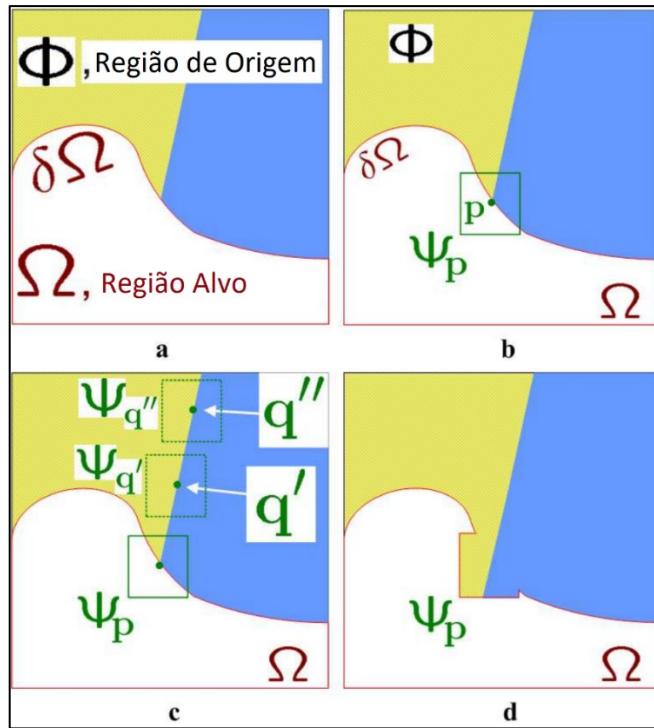
Fonte: Telea (2004).

O algoritmo apresentado por Telea (2004) é considerado um dos mais rápidos e fáceis de se implementar quando comparado com outros baseados em EDP. Entretanto, sua desvantagem se deve ao fato de seus resultados gerarem um efeito borrado na imagem restaurada (TRIVEDI, 2014).

### 3.1.1.2 Método *Exemplar-based*

No algoritmo baseado em exemplares de Criminisi (2004), os autores consideraram a ideia utilizada nos algoritmos de EDP, em que as estruturas lineares das bordas das regiões são também propagadas. Entretanto, o algoritmo age também como um método de replicação de texturas, ou seja, copiando informações do bloco (*patch*) selecionado na amostra para as regiões faltantes. A Figura 3.3 ilustra de maneira simplificada o funcionamento do algoritmo.

Figura 3.3 – Estrutura de propagação do algoritmo baseado em exemplares



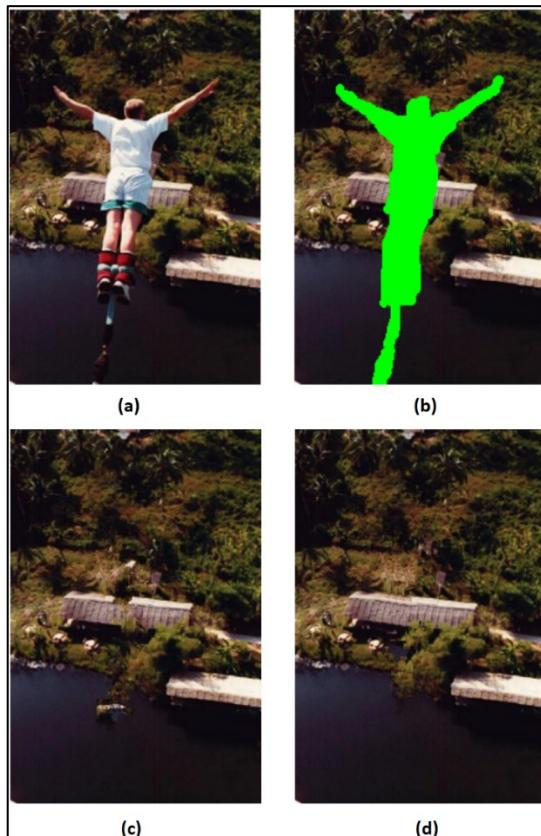
Fonte: Criminisi (2004).

A Figura 3.3 (a) possui a imagem original com a região de origem  $\Phi$ , a região alvo  $\Omega$  e seu contorno  $\delta\Omega$ . O objetivo é preencher a área delimitada pelo bloco  $\Psi_p$  que está centrado no pixel  $p$ , com  $p \in \delta\Omega$ , como mostra a Figura 3.3 (b). O candidato mais provável entre os blocos  $\Psi_{q''}$  e  $\Psi_{q'}$  irá recompor a vizinhança de  $p$ , de acordo com a Figura 3.3 (c). O melhor bloco, definido pelo algoritmo, é copiado para a posição ocupada por  $\Psi_p$ , atingindo assim, o preenchimento parcial de  $\Omega$ , de acordo com a Figura 3.3 (d). Tanto as texturas quanto a estrutura da linha divisória foram propagadas para a região alvo em um esquema de blocos e não “pixel-a-pixel”, contribuindo assim, para melhorar o tempo de processamento do algoritmo.

No trabalho apresentado por Buyssens (2015), os autores propõem três melhorias do algoritmo de Criminisi (2004). A primeira refere-se ao método de localização do bloco alvo a ser retocado, que comparado ao de Criminisi (2004), apresenta melhores resultados visuais. A segunda melhoria refere-se ao método de localização do bloco usado na restauração e a terceira utiliza um algoritmo para a redução dos efeitos causados pelas cópias de blocos, produzindo assim, um melhor resultado visual e um algoritmo com menor tempo de processamento.

A Figura 3.4 apresenta o resultado de uma imagem após a aplicação dos algoritmos de Criminisi (2004) e Buyssens (2015).

Figura 3.4 – Ilustração do resultado dos algoritmos de Criminisi (2004) e Buyssens (2015)



Fonte: Buyssens (2015).

A Figura 3.4(a) é a imagem original a ser retocada; a Figura 3.4(b) é a máscara necessária para os algoritmos, indicando a região alvo; a Figura 3.4(c) apresenta o resultado do algoritmo de Criminisi (2004) e a Figura 3.4(d) mostra o resultado do retoque proposto por Buyssens (2015).

### 3.1.2 Avaliação da qualidade das imagens restauradas

A comparação entre imagens restauradas, como por exemplo a Figura 3.4 (c) e a Figura 3.4 (d), requer uma avaliação da qualidade dessas imagens. O objetivo final da avaliação, geralmente, é comparar duas imagens, fornecendo uma nota quantitativa que descreve o grau de similaridade/distorção entre elas.

De modo geral, existem duas metodologias básicas para a avaliação da qualidade de imagens: subjetiva e objetiva. Os métodos subjetivos proporcionam uma maior precisão na estimação da qualidade da imagem, uma vez que são os próprios usuários que atestam a qualidade baseando-se em determinados critérios. Por outro lado, os métodos objetivos consistem em modelos matemáticos capazes de prever a qualidade da imagem, de modo preciso e automático, e buscam imitar as predições realizadas por um observador humano (MOHAMMADI, 2014).

Nessa dissertação de mestrado, optou-se por utilizar dois métodos objetivos comumente utilizados na avaliação da qualidade das imagens restauradas pelo retoque digital: o Erro Quadrático Médio (MSE) e o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM).

### 3.1.2.1 *Erro quadrático médio*

O Erro Quadrático Médio ou MSE (do inglês, *Mean Squared Error*) é o método objetivo mais simples e mais antigo de avaliação de qualidade de imagens (ZARIC, 2010). Dadas as imagens digitais  $f(x, y)$  e  $g(x, y)$ , de dimensões  $M \times N$ , o MSE é definido como a soma das diferenças ao quadrado de cada pixel das duas imagens, dividido pelo número de pixels:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - g(x, y)]^2$$

Normalmente, assume-se que uma das imagens representa a imagem original, sem falhas, e a outra a imagem restaurada. Quanto menor o valor do MSE, menor é a diferença entre as imagens.

### 3.1.2.2 *Índice de similaridade estrutural*

O Índice de Similaridade Estrutural, ou SSIM (do inglês, *Structural Similarity Index*) é um método que utiliza a estatística da imagem para a avaliação da qualidade (CARDOSO, 2013). Em outras palavras, ele utiliza os atributos que constituem a informação estrutural da imagem, como a média da luminância e contraste. Desse modo, o método realiza três comparações, nos seguintes componentes: luminância

$l(f, h)$ , contraste  $c(f, h)$  e estrutural  $s(f, h)$ . Tais componentes são relativamente independentes e juntos definem o SSIM como:

$$SSIM(f, h) = [l(f, h)]^\alpha \cdot [c(f, h)]^\beta \cdot [s(f, h)]^\gamma$$

sendo  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  os parâmetros que ajustam a importância de cada componente, geralmente assumindo que  $\alpha = \beta = \gamma = 1$ .

O SSIM avalia a imagem com valores entre 0 e 1, sendo 0 a nota de menor qualidade e 1 a nota de maior qualidade, idêntica à original. Segundo Dourado (2014), o SSIM demonstra ser superior ao MSE, pelo simples fato de considerar a diferenciação na parte estrutural, luminância e no contraste da imagem.

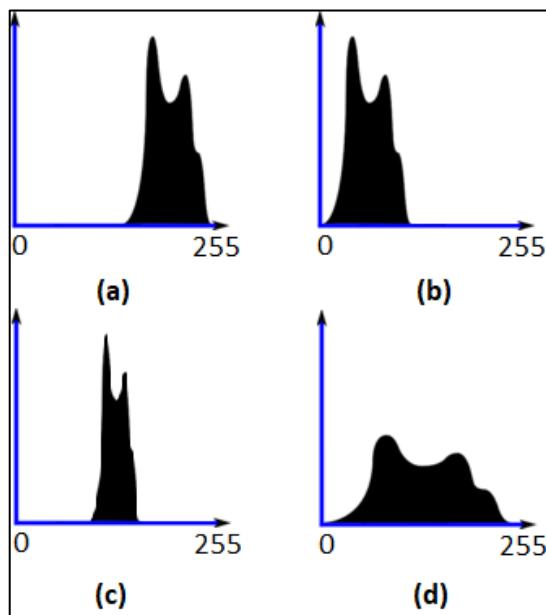
### 3.2 TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE IMAGENS

A etapa de melhoramento de imagens é predominantemente voltada para a modificação de imagens para otimizar sua aparência para o usuário final e, portanto, facilitar sua interpretação e compreensão. A análise visual é um elemento chave, mesmo no processamento de imagens digitais, e os efeitos dessas técnicas desempenham um papel importante em todos aspectos do sensoriamento remoto (EASTMAN, 2001). Embora existam inúmeras técnicas de melhoramento de imagens, esse trabalho destaca as seguintes: realce de contraste e composição de imagens.

#### 3.2.1 Realce de contraste

Os dados de satélites, uma vez processados, podem conter um contraste espectral de baixa qualidade visual. Na imagem bruta, os valores dos pixels preenchem apenas uma pequena porção da faixa disponível de valores digitais (256 níveis de cinza nas imagens LRPT). A distribuição de níveis digitais de uma imagem pode ser representada por um histograma que mostra a frequência de pixels existentes na imagem em cada nível digital. Por meio da análise do histograma é possível perceber características de contraste e radiância de uma imagem. A Figura 3.5 mostra características de histogramas típicos de imagens digitais.

Figura 3.5 – Características dos histogramas de diferentes tipos de imagens. (a) alta radiância, (b) baixa radiância, (c) baixo contraste, (d) alto contraste.

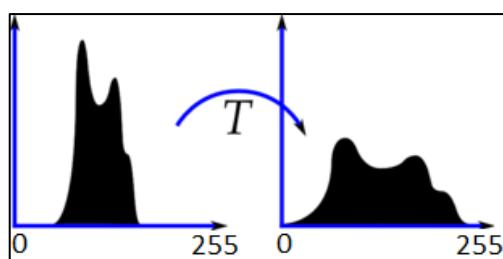


Fonte: Autor.

A Figura 3.5(a) ilustra um histograma com alta radiância, a Figura 3.5(b) com baixa radiância, a Figura 3.5(c) com baixo contraste e a Figura 3.5(d) com alto contraste.

O realce de contraste consiste em uma transferência radiométrica em cada pixel, com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem. Geralmente, é realizado de forma empírica e o contraste é ampliado, ou seja, os níveis de cinza mais baixos são arrastados para próximo de zero (tonalidade mais escura) e os mais altos para próximo de 255 (tonalidade mais clara), conforme ilustrado na Figura 3.6 (MOREIRA, 2012).

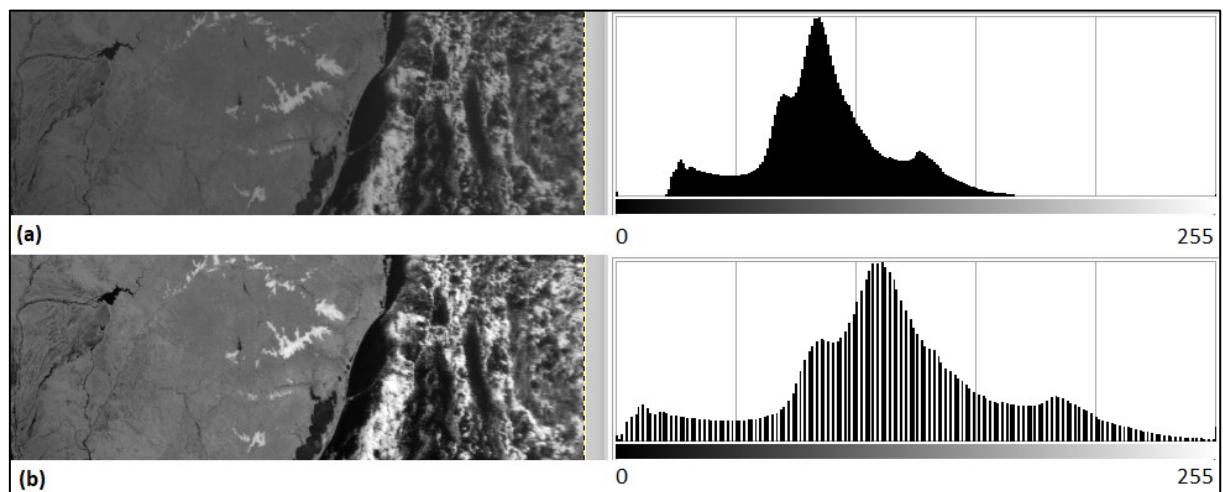
Figura 3.6 – Esquema para mostrar uma ampliação de contraste de uma imagem



Fonte: Autor.

É possível notar que os valores dos pixels na imagem bruta da Figura 3.7 (a) distribuem-se em uma faixa reduzida, mas após a manipulação do histograma, eles se redistribuíram entre 0 e 255, aumentando assim, o contraste. O efeito dessa manipulação na imagem é o realce dos objetos conforme a imagem da Figura 3.7 (b).

Figura 3.7 – Efeito visual de contraste antes e após a manipulação do histograma da imagem original LRPT



Fonte: Autor.

A manipulação de contraste pode ser feita em cada uma das bandas espectrais disponíveis na imagem LRPT antes de proceder à visualização da composição colorida. O processamento digital permite que se teste várias combinações de bandas, contrastes e cores de tal modo que se possa maximizar a extração de informações da imagem (NOVO, 2010).

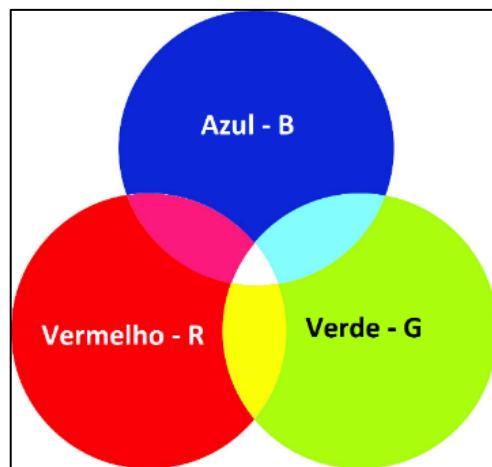
### 3.2.2 Composição de imagens

O realce de contraste visto na Subseção 3.2.1 pode melhorar a análise de imagens de SR, mas dificilmente garante que todas as informações contidas nas bandas serão visualmente reconhecidas pelo profissional que analisa a imagem. Por essa razão, quando se modifica o contraste, os resultados poderão ser melhores avaliados quando as contribuições de diferentes bandas são combinadas para formar composições coloridas. As composições coloridas procuram reproduzir padrões de

cores, combinando as bandas de um sensor com as cores primárias azul, verde e vermelho (MENESES, 2012).

O processo mais comum de geração de cores é baseado na adição de cores primárias R (*red* – vermelho), G (*green* – verde) e B (*blue* – azul), especialmente para imagens de 8 bits. A Figura 3.8 ilustra o processo aditivo de formação de cores. Nesse processo, filtros com cores primárias RGB são associados a cada uma das bandas da imagem de SR.

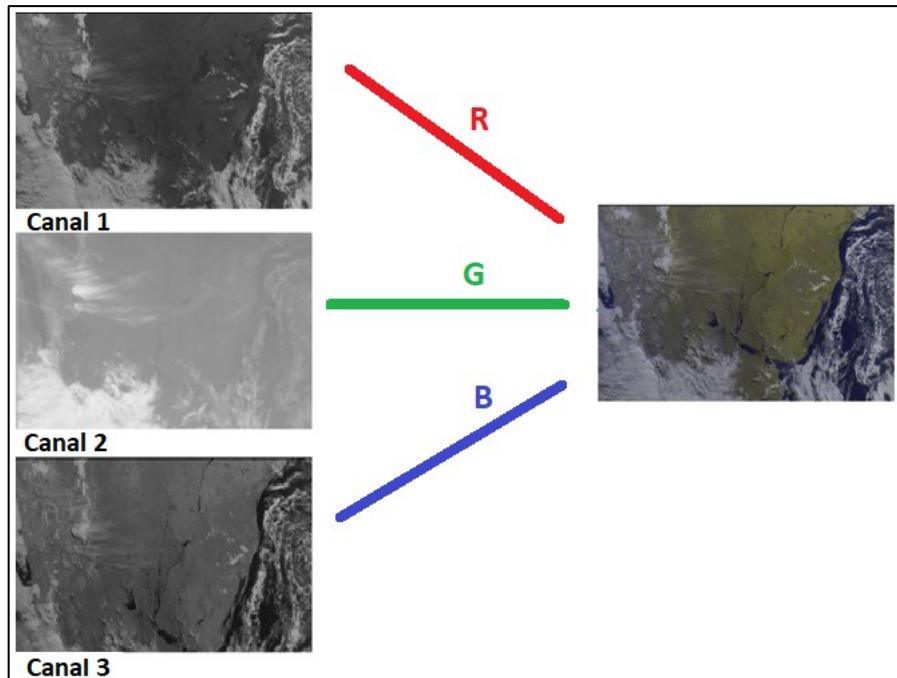
Figura 3.8 – Processo aditivo de formação de cores



Fonte: Autor.

A intensidade de cada cor é modulada pelo nível digital de cada pixel, ou seja, um pixel com valor 255 em todas as três bandas será reproduzido como branco na imagem colorida resultante. Um pixel com nível 127 nas bandas associadas à cor azul e verde será exibido com a cor ciano e assim sucessivamente. A Figura 3.9 exemplifica o processo de composição colorida multiespectral RGB de uma imagem de SR. Para cada banda de 8 bits de resolução radiométrica há 256 níveis de cinza possíveis, havendo, portanto,  $256^3$  possíveis valores RGB.

Figura 3.9 – Composição colorida multiespectral padrão RGB



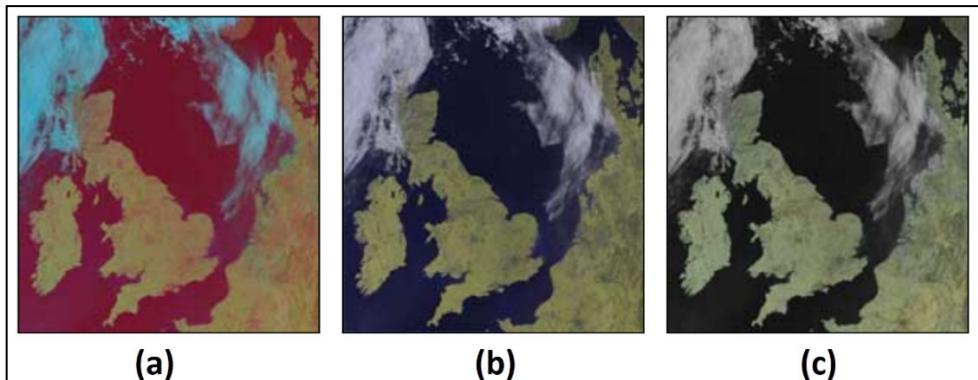
Fonte: Autor.

A vantagem do sistema de cores é a liberdade para o especialista explorar diferentes combinações com as bandas disponíveis para obter a imagem colorida de melhor contraste. Embora a qualidade das cores seja dependente do contraste de cada banda, ela é controlada pela escolha adequada das bandas em função do comportamento espectral dos alvos da imagem (MENESES, 2012). Nas imagens LRPT, as combinações mais comuns são:

- RGB122: Canal 1 atribuído ao vermelho (R) e Canal 2 atribuído ao verde (G) e azul (B);
- RGB125: Canal 1 atribuído ao vermelho (R), Canal 2 atribuído ao verde (G) e Canal 5 atribuído ao azul (B);

A Figura 3.10 ilustra estas combinações de uma imagem LRPT, sendo a Figura 3.10(a) uma composição RGB125 original LRPT, a Figura 3.10(b) uma composição RGB122 e a Figura 3.10(c) a RGB125 modificada.

Figura 3.10 – Composições LRPT mais tradicionais



Fonte: Les Hamilton (2016)

Esse capítulo abordou os tópicos referentes à restauração e melhoramento de imagens, utilizando técnicas de retoque digital, realce de contraste e avaliação de qualidade de imagens. O Capítulo 4 apresenta a descrição de uma estação receptora de imagens meteorológicas.

## 4 ESTAÇÃO DE RECEPÇÃO DE IMAGENS METEOROLÓGICAS

Esse capítulo inicia-se abordando alguns temas referentes à construção de uma estação receptora de imagens meteorológicas do tipo LRPT. De acordo com as estações desenvolvidas por Moxey (2004) e Dascal (2015), podem-se identificar três elementos básicos em uma estação receptora: antena, rádio e computador pessoal.

Os tipos adequados de antenas para a recepção meteorológica são descritos na Subseção 4.1, enquanto que na Subseção 4.2 são abordados os fundamentos da arquitetura de Rádios Definidos por Software (RDS). As Subseções 4.3 e 4.4 apresentam a descrição do hardware e do software da estação proposta. Na primeira, descrevem-se a construção da estação e o modo de funcionamento geral. Na segunda Subseção, descrevem-se os softwares utilizados, bem como os processos de demodulação e decodificação de imagens LRPT.

### 4.1 ANTENAS PARA RECEPÇÃO DE IMAGENS METEOROLÓGICAS

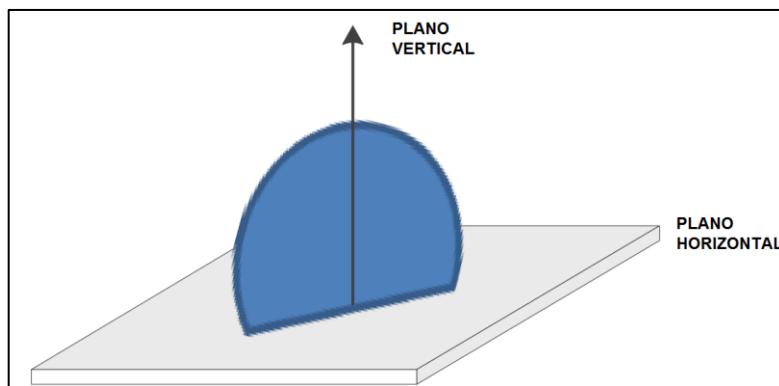
Com o avanço da área de telecomunicações, surgiu um grande número de antenas, cada uma projetada para um tipo de aplicação e para certa banda de operação. As antenas utilizadas para a recepção de imagens meteorológicas, como as provenientes dos satélites de órbitas polares NOAA-POES e Meteor-M, devem possuir uma área de captura grande o suficiente para receber o sinal de interesse durante a passagem do satélite em visada direta.

A Figura 4.1 ilustra a área de captura ideal de uma antena fixa ao solo, ou seja, ela deve ser capaz de receber o sinal nos 180 graus de elevação mas também em qualquer um dos 360 graus de azimute. Além da área de captura, é necessário levar em consideração os seguintes pontos:

- As dimensões da antena são dependentes das frequências do sinal (LRPT opera em banda VHF);
- Deve possuir o mesmo tipo de polarização presente no sinal transmitido pelo satélite (no satélite Meteor-M N2 utiliza-se a polarização circular direita ou RHCP).
- Quanto mais próxima a polarização da antena for em relação ao sinal recebido, maior será a SNR (razão sinal-ruído);

- Deve ter um ganho que permita a recepção do sinal livre de efeitos causados pelos ruídos.

Figura 4.1 – Área de captura ideal para satélites de órbitas polares



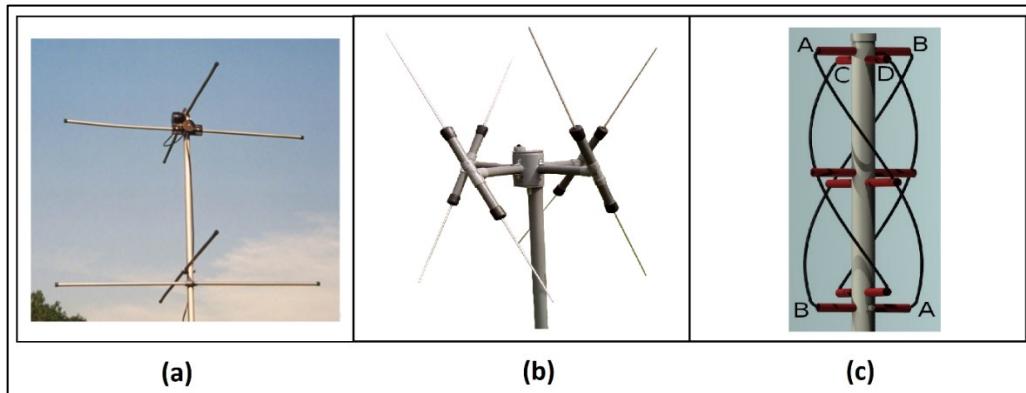
Fonte: Busani (2012).

Existem diversos tipos de antenas omnidirecionais que podem ser utilizadas para a recepção meteorológica. A seguir, são brevemente apresentadas algumas antenas comumente utilizadas para esse fim:

- *Turnstile*: É uma das antenas mais simples e menos complexas que se pode utilizar para a recepção de imagens meteorológicas (BUSANI, 2012). Ela é formada por um arranjo de dois dipolos posicionados em ângulos retos entre si que, quando montada em modo axial, possui uma polarização circular.
- DCA (*Double Cross Antenna*): A antena DCA possui quatro dipolos, dois deles se encontram defasados em 90 graus em relação ao outro par de dipolos (BUSANI, 2012). Essa antena pode produzir uma excelente polarização RHCP em uma elevação de 0º e, geralmente, possui um desempenho melhor que a *Turnstile*.
- QFH (*Quadrifilar Helical Antenna*): A QFH é uma antena omnidirecional quadrifilar de meia espira e meio comprimento de onda (PINTO, 2007). De modo geral, esta antena é composta por quatro elementos, definidos como A, B, C e D na Figura 4.2, que podem ser interpretados como dois bifilares ortogonais em quadratura de fase, sendo que um bifilar é uma helicoidal de dois elementos.

A Figura 4.2 mostra, de (a) para (c), os três tipos de antenas descritas anteriormente, ou seja, a *Turnstile*, DCA e QFH respectivamente.

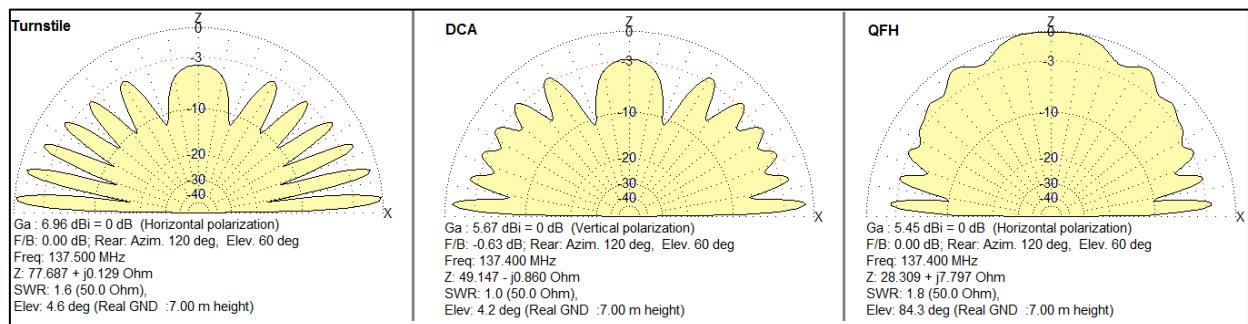
Figura 4.2 – Antenas para recepção meteorológica. (a) *Turnstile*, (b) DCA e (c) QFH



Fonte: Autor.

Embora Dascal (2015) demonstre que a antena QFH é a opção que fornece o melhor desempenho em termos de ganho, polarização circular e padrão de radiação, na análise realizada por Zumerly (2016), as antenas *Turnstile*, DCA e QFH foram simuladas e comparadas quanto ao uso na recepção de imagens meteorológicas. Os diagramas da Figura 4.3 foram gerados por Zumerly (2016) nas seguintes condições: frequência central aproximada de 137,5 MHz, altura do solo de 7 metros e posicionamento em espaço livre.

Figura 4.3 – Diagrama de irradiação das antenas *Turnstile*, DCA e QFH



Fonte: Zumerly (2016).

De acordo com a Figura 4.3, a antena com melhor ganho em zênite foi a QFH, mas com ganho menor em baixas elevações. As antenas *Turnstile* e DCA obtiveram

um ganho menor em zênite quando comparadas com a QFH, mas com maior ganho em baixas elevações, ou seja onde o sinal chega à antena com menor potência.

Outra análise realizada por Zumerly (2016) foi considerar a qualidade da polarização circular das três antenas. De modo simplificado, a polarização da antena *Turnstile* em baixas elevações é muito ruim quando comparada com as outras duas. Já as antenas DCA e QFH, não apresentam essa característica, pois tanto em zênite quanto em baixas elevações tiveram um bom desempenho em termos de polarização circular.

#### 4.2 RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE

Durante a última década, o processamento digital de sinais em projetos de sistemas de rádio tem aumentado significativamente. A consequência natural dessa tendência tem permitido que o processamento de sinais seja realizado por meio de software (BARD, 2007). Nesse contexto, surge o conceito de Rádio Definido por Software (RDS): uma estrutura de rádio reprogramável que utiliza um transceptor de rádio frequência e incorpora quase todas as funcionalidades de um rádio tradicional em componentes programáveis, como uma FPGA (*Field-programmable Gate Array*) ou em computadores pessoais, permitindo que sejam reconfigurados sem quaisquer mudanças no hardware. Segundo Dillinger (2003), RDS é um sistema de comunicação de rádio em que os componentes tipicamente implementados em hardware – como filtros, amplificadores, demoduladores, entre outros – são implementados em software.

Um rádio tradicional possui uma série de estágios que processam o sinal de Rádio Frequência (RF). Em um receptor comum, uma antena recebe ondas de RF e as converte em sinal elétrico. Esse sinal alimenta um ressonador que é sintonizado em uma frequência específica, amplificando, assim, o sinal desejado para o estágio de demodulação. O demodulador, por consequência, extrai a informação desejada do sinal da portadora. Para alterar a frequência de um rádio tradicional é necessário modificar a frequência de operação do ressonador, ou seja, ajustar capacitores ou indutores do circuito físico do rádio. Essa é a limitação dos receptores tradicionais: o rádio não consegue receber um sinal que está fora da faixa de valores que o circuito do ressonador pode sintonizar, processar e demodular. Para poder receber múltiplas

bandas de frequências, ou diferentes tipos de sinais, seriam necessários circuitos separados para cada banda ou sinal, fisicamente alternando-se entre sinais.

O Rádio Definido por Software não possui essa limitação. Os circuitos do ressonador e do demodulador são substituídos por componentes como os Conversores Analógico-Digital (ADC) e algoritmos que extraem o sinal do fluxo de dados que os ADCs capturam. A troca da frequência ocorre ao modificar-se o algoritmo para sintonizar outra frequência, não havendo necessidade de mudanças físicas no circuito em si, possibilitando assim, o uso do RDS em diferentes aplicações.

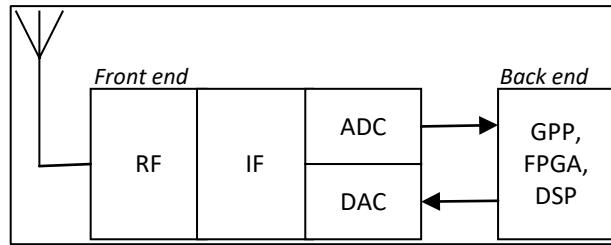
A primeira publicação que abordou o termo de rádio de software foi “*Software Radio: Survey, Critical Analysis and Future Directions*” de Joseph Mitola em 1992 (FITZEK, 2006). Na década de 1990, o aumento no poder de processamento das FPGAs possibilitou a criação de RDS em circuitos integrados capazes de executarem tarefas complexas de amostragem, demodulação e processamento em um único dispositivo. Entretanto, a maioria dos RDS modernos não utilizam apenas um chip, mas um *front end* analógico cujas funções são de receber o sinal bruto, filtrá-lo, convertê-lo para uma Frequência Intermediária (IF) e permitir uma conversão digital através do ADC.

Basicamente, a arquitetura convencional de um RDS pode ser dividida em dois componentes principais (LI S, 2012):

- *Front end*: responsável pelo recebimento e transmissão de RF contendo componentes conversores analógico-digital e digital-analógico.
- *Back end*: responsável pelo processamento do sinal digital.

A arquitetura típica de um RDS é apresentada na Figura 4.4, que é uma mistura de GPPs (*General-Purpose Processor*), FPGAs e DSPs (*Digital Signal Processor*). Essa arquitetura fornece uma plataforma flexível para implementar diversas aplicações.

Figura 4.4 – Arquitetura típica de um Rádio Definido por Software



Fonte: Autor.

Em um rádio receptor, o *front end* amplifica o sinal recebido e converte a frequência da portadora para uma frequência intermediária. Após isso, o ADC converte o sinal analógico para digital e este é processado pelo *back end* que define propriedades como: frequência da portadora, largura de banda do sinal, modulação, criptografia, codificação do canal, entre outras. O *back end* pode ser constituído de um GPP, FPGA ou DSP. O GPP, geralmente, executa as aplicações do usuário e protocolos de comunicação de alto nível, como por exemplo, a demodulação e extração de informações do sinal.

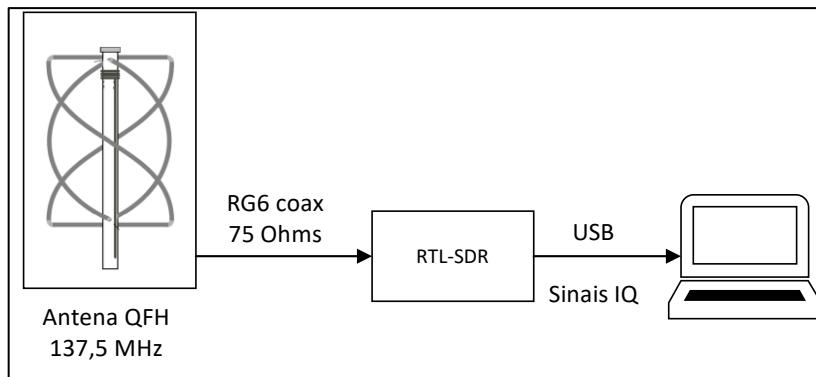
Nesse trabalho, foi utilizado o rádio definido por software modelo RTL-SDR (*RTL2832U*): um dispositivo USB originalmente projetado para atuar como receptor de TV digital, cuja arquitetura interna é apresentada na Subseção 4.3.2.

#### 4.3 DESCRIÇÃO DO HARDWARE

A estação proposta nesse trabalho baseia-se em um sistema de captura e processamento do modo LRPT do satélite Meteor-M N2. Ela utiliza os seguintes elementos de hardware que são ilustrados na Figura 4.5:

- Uma antena QFH (*Quadrifilar Helical Antenna*);
- Um Rádio Definido por Software (RTL-SDR *RTL2832U*);
- Um computador pessoal com o sistema operacional Ubuntu 14.1.

Figura 4.5 – Diagrama de blocos do sistema de hardware da estação proposta



Fonte: Autor.

De forma simplificada, a estação possui o seguinte funcionamento: o sinal transmitido pelo satélite é recebido pela antena QFH, que está ligada ao rádio RTL-SDR por um cabo coaxial RG6 de 75 Ohms. O rádio tem a finalidade de executar filtragens, amostragem e conversão do sinal de RF em sinais digitais IQ<sup>1</sup> (*In-phase and Quadrature*). Os sinais IQ são enviados para um computador pessoal utilizando um cabo USB, onde ocorre a demodulação, decodificação, extração e processamento das imagens.

#### 4.3.1 Projeto da antena QFH

De todas as antenas apresentadas na Subseção 4.1, a QFH é a mais comumente utilizada entre radioamadores e entusiastas para a recepção de imagens meteorológicas, principalmente pela sua facilidade de construção, baixo custo e bom desempenho. Por esse motivo, a antena QFH foi escolhida para ser construída e utilizada nessa dissertação de mestrado. O projeto foi totalmente baseado no trabalho de Lint (2004), o qual detalha as dimensões e conexões da antena para uma frequência central de 137,5 MHz. Os materiais utilizados na construção da antena foram:

- Canos de PVC de 50mm para a estrutura central e 20mm para os separadores horizontais;

---

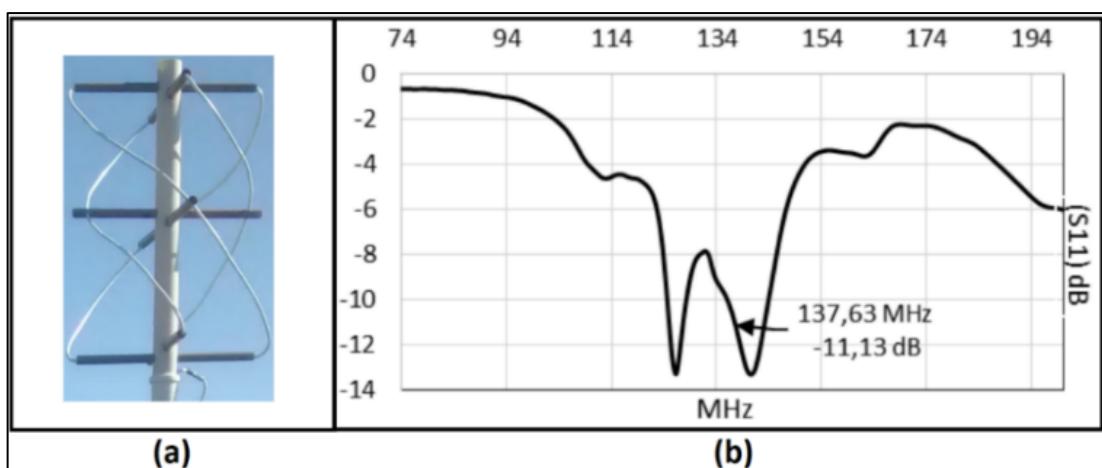
<sup>1</sup>

Os sinais IQ são uma representação no plano complexo dos sinais digitais amostrados contendo a informação instantânea da magnitude e fase do sinal.

- Cabo coaxial RG6 75 Ohms 95% de malha;
- Conectores do tipo F.

A Figura 4.6 (a) apresenta o resultado final da construção da antena. No teste realizado utilizando o analisador de rede modelo *Keysight E5071C*, pôde-se extrair o gráfico que mostra a resposta em frequência da antena construída. O coeficiente de reflexão S11 foi medido para saber o quanto de energia de RF está sendo irradiada e/ou refletida para a fonte. Para saber se a antena foi construída adequadamente, o coeficiente de reflexão, ou simplesmente S11, deve ser o menor possível. De acordo com a Figura 4.6 (b), para a frequência de 137,63 MHz obteve-se um valor S11 aproximado de 11,13 dB. Para a frequência alvo de 137,5 MHz, S11 foi de aproximadamente 10,8 dB. A partir desses dados, a potência refletida de volta para o analisador de rede é em torno de 9% e estimou-se uma perda entre 5% e 10% devido aos conectores e a resistividade do cabo coaxial. Portanto, a antena possui uma eficiência entre 81% e 86%.

Figura 4.6 – (a) Foto da antena QFH construída, (b) Resposta em frequência da antena QFH – Curva de reflexão do coeficiente S11



Fonte: Autor.

### 4.3.2 O Rádio RTL-SDR

O rádio RTL-SDR é um dispositivo USB (Figura 4.7) de baixo custo (menos de 20 dólares), originalmente projetado para ser um receptor DVB-T de TV digital. Entretanto, esse pequeno dispositivo também pode ser utilizado como um RDS

genérico. Graças ao desenvolvimento de um *driver* capaz de programá-lo em “modo de teste”, o fluxo de dados é desviado do decodificador interno MPEG para a saída, permitindo que o dispositivo atue como um RDS receptor para o desenvolvimento de aplicações que podem envolver sinais FM/AM, VHF, UHF, GSM, GNSS, ADS-B e, inclusive, o processamento de imagens de satélites.

Figura 4.7 – Foto do circuito interno do rádio RTL-SDR



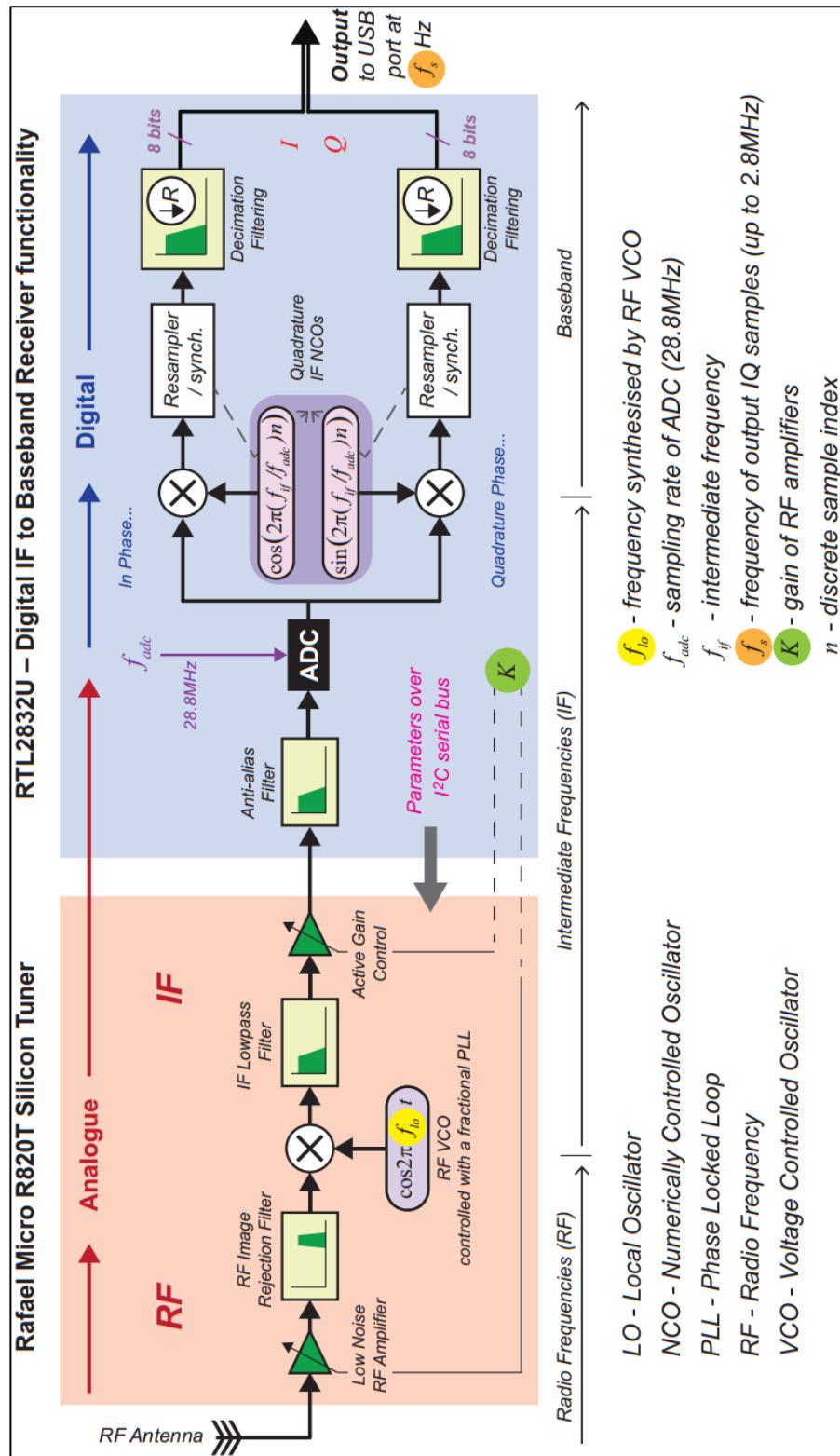
Fonte: Amazon (2016).

A Figura 4.8 ilustra a arquitetura do RTL-SDR composta pelo circuito integrado (CI) do sintonizador *Rafael Micro R820T Silicon* e pelo circuito demodulador *RTL2832U*.

Os sinais de RF recebidos pelo dispositivo entram no sintonizador e são convertidos para uma frequência intermediária utilizando um VCO (*Voltage Controlled Oscillator*), como se pode observar na Figura 4.8. O VCO é programável e controlado pelo circuito do demodulador por meio de uma interface I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Após um estágio de AGC (*Active Gain Control*), o qual ajusta a amplitude do sinal dentro de uma faixa adequada, aplica-se um filtro *anti-alias* no sinal de IF antes de ser convertido pelo ADC. Os NCOs (*Numerically Controlled Oscillators*) são componentes que operam na frequência intermediária e convertem o sinal para a banda base.

Após o processo de decimação, que reduz a taxa de amostragem, as amostras são enviadas para a interface USB no formato de sinais IQ. Assim, o programador do rádio tem a possibilidade de manipular essas amostras digitalizadas em plataformas de desenvolvimento, que fornecem algoritmos e blocos de processamento de sinais para a criação de diversas aplicações, utilizando apenas um computador pessoal (STEWART, 2015).

Figura 4.8 – Arquitetura do rádio RTL-SDR *R820T/RTL2832U*



Fonte: Stewart (2015, p. 13).

Como resultado da montagem da estrutura do hardware da estação, a Figura 4.9 mostra uma imagem da estação configurada para a recepção de imagens meteorológicas do satélite Meteor-M N2. Para aumentar a praticidade e o manuseio da estação no ponto de recepção, utilizou-se um computador pessoal portátil que executa os programas de rastreio, demodulação e decodificação.

Figura 4.9 – Foto da estação receptora configurada para recepção de imagens meteorológicas



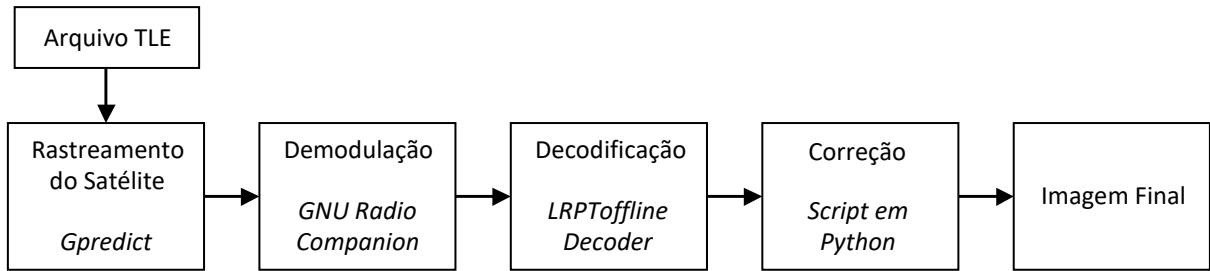
Fonte: Autor.

Na Subseção 4.4 é apresentada a descrição desses programas e *scripts* necessários para o seu funcionamento completo da estação proposta.

#### 4.4 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

O conjunto de programas que constitui a estação tem o objetivo de fornecer uma solução para o rastreamento do satélite, demodulação e decodificação do sinal LRPT, extração e processamento das imagens obtidas. A descrição das etapas executadas em software podem ser resumidas da seguinte forma, conforme descreve a Figura 4.10:

Figura 4.10 – Diagrama de funcionamento da estação receptora



Fonte: Autor.

- 1) Atualização do arquivo TLE (*Two-Line Elements*) e rastreamento do satélite Meteor-M N2 por meio do programa *Gpredict*;
- 2) Execução do programa implementado na plataforma de desenvolvimento *GNU Radio Companion* que realiza a demodulação do sinal LRPT e gera um arquivo de símbolos da constelação QPSK;
- 3) Decodificação do arquivo de símbolos para a extração das imagens LRPT utilizando o programa *LRPTOfflineDecoder* (ROBONUKA, 2016);
- 4) Processamento e melhoria das imagens obtidas, utilizando um *script* implementado em Python com a biblioteca *OpenCV* de processamento de imagens.

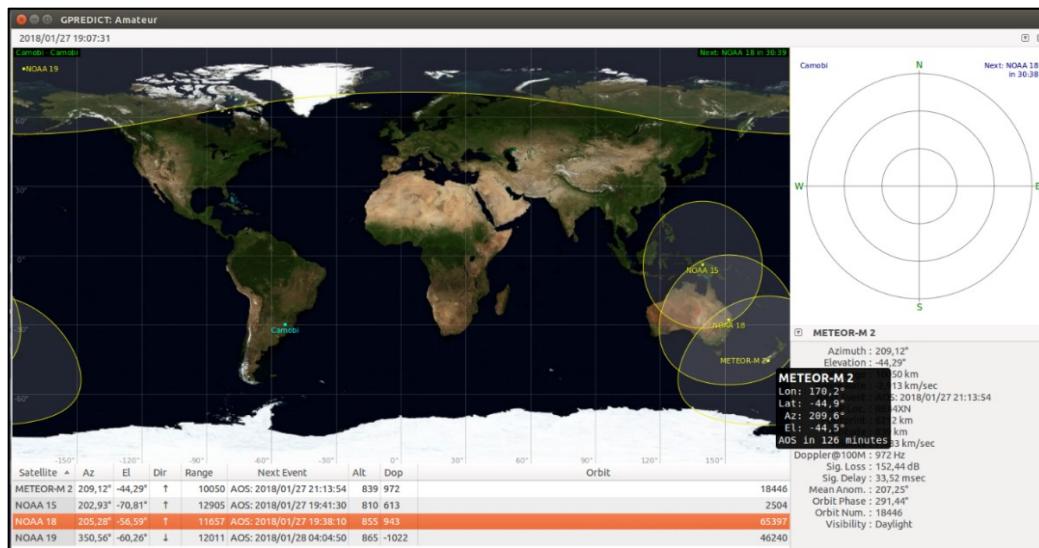
#### 4.4.1 Rastreamento de satélites

*Gpredict* é o nome do programa (gratuito e de código aberto) utilizado para o rastreio de satélites em tempo real (CSETE, 2017). Baseado em algoritmos do modelo de perturbação de órbitas SGP4, o programa é compatível com os arquivos TLE (*Two-Line Elements*), que contêm os elementos keplerianos de todos os satélites artificiais operacionais disponibilizados pela *Celestrak* (CELESTRAK, 2017). A Figura 4.11 apresenta a interface gráfica do *Gpredict* sendo executada no sistema operacional Ubuntu 14.1. É importante destacar que a atualização dos arquivos TLE é essencial para obter uma precisão adequada do modelo SGP4, principalmente em aplicações que envolvem a recepção de sinais de satélites polares.

Para a realização correta do rastreio é necessário informar ao programa as coordenadas geográficas da estação receptora e a devida atualização do arquivo TLE

correspondente aos satélites meteorológicos no qual se enquadra o satélite Meteor-M N2. As informações úteis obtidas nos dados de rastreamento são o azimute, inclinação máxima, data e a hora de cada passagem do satélite sobre a estação. Desse modo, a estação receptora pode ser configurada e ligada alguns segundos antes do recebimento do sinal e desligada logo após o término do mesmo. A recepção de uma imagem pode durar desde alguns segundos até dezesseis minutos.

Figura 4.11 – Programa de rastreamento de satélites *Gpredict*



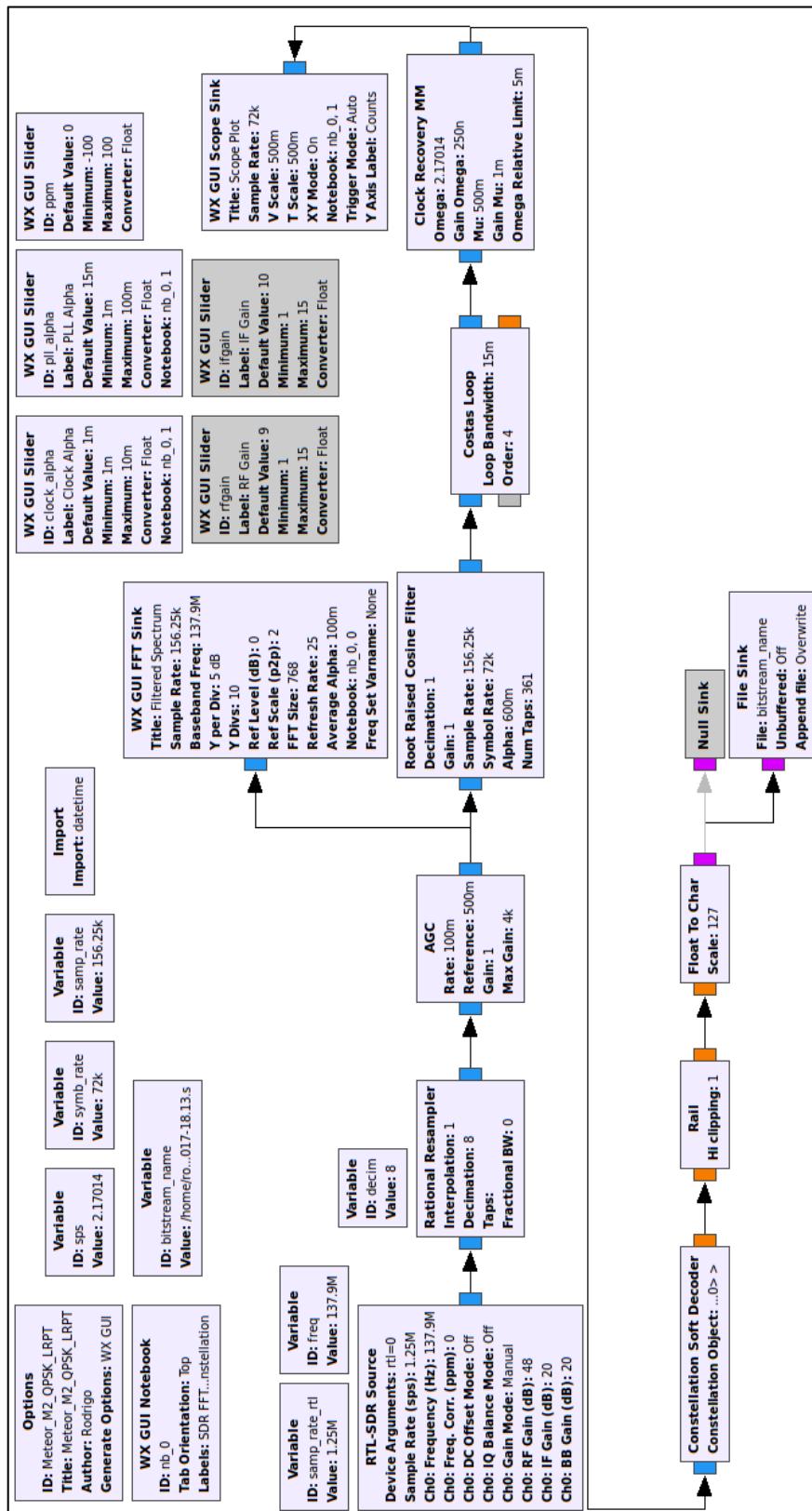
Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Demodulação de Imagens LRPT

*GNU Radio* é um software de desenvolvimento gratuito e de código aberto disponível para Linux, Mac OS e Windows, que fornece blocos de processamento de sinais para implementação de RDS (BLOSSOM, 2004). A estrutura do *GNU Radio* é dividida em dois níveis. Todas as funções de desempenho críticas são implementadas na linguagem C++, enquanto que a organização, controle e conexão entre blocos são implementadas na linguagem Python.

A interface gráfica do *GNU Radio*, *GNU Radio Companion* (GRC), é um ambiente de programação que permite uma implementação modular de sistemas sem a necessidade de escrita em código Python. O ambiente gráfico do GRC é mostrado na Figura 4.12, que representa o programa desenvolvido com todos os blocos de processamento de sinais utilizados na demodulação QPSK do sinal LRPT.

Figura 4.12 – Programa de demodulação LRPT desenvolvido no ambiente gráfico do GRC

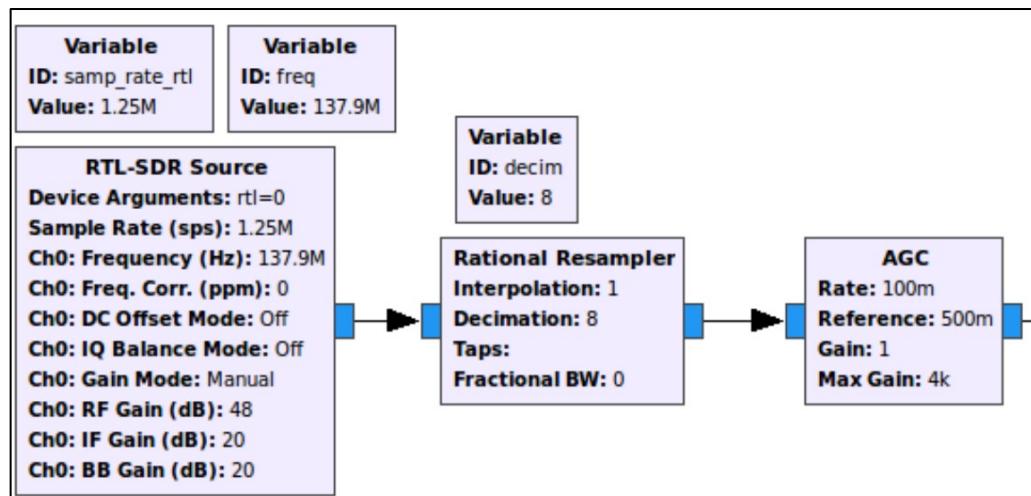


Fonte: Autor.

O primeiro bloco utilizado, *RTL-SDR Source*, representa a fonte do *streaming* de amostras digitais IQ proveniente do rádio RTL-SDR, como mostra a Figura 4.13. A taxa de amostragem foi configurada para 1,25M amostras por segundo e a frequência central em 137,9 MHz, que é a frequência LRPT de transmissão operacional atualmente. O segundo bloco, *Rational Resampler*, realiza a decimação do sinal para alcançar a taxa de 156,25 k amostras por segundo, ou seja, uma taxa oito vezes menor do que a taxa de amostragem. Para um melhor desempenho, é necessário estabilizar o sinal em um nível constante. Essa tarefa é desempenhada pelo bloco AGC (*Automatic Gain Control*) que controla o sinal dinamicamente para mantê-lo estável.

Outro passo realizado no programa é a aplicação do filtro *Root Raised Cosine* que já vem otimizado no GRC para sinais modulados em QPSK, de acordo com a Figura 4.14. Os valores dos parâmetros *Symbol Rate* e *Alpha* são determinados na especificação do sinal LRPT. Um bloco de *Costas Loop* de quarta ordem é utilizado para a sincronização com a onda portadora, e o bloco *Clock Recovery MM* realiza a sincronização das amostras com o *clock* do sinal. A configuração e funcionamento do bloco *Clock Recovery MM* é melhor detalhado em Teske (2016) e Solc (2015).

Figura 4.13 – Três primeiros blocos do programa de demodulação QPSK no GRC

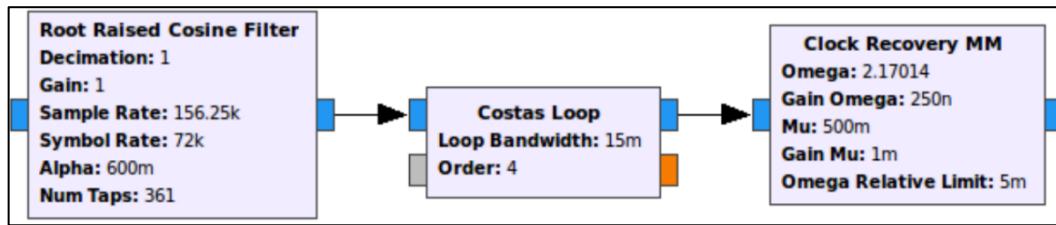


Fonte: Autor.

A última parte do programa realiza a decodificação dos símbolos da constelação QPSK por meio do bloco *Constellation Soft Decoder*, convertendo-os de

valores IQ complexos para valores em ponto flutuante (componente I). Após, o sinal passa pelo bloco *Float To Char* para a geração de bytes inteiros entre -128 e 127. Por fim, o bloco *File Sink* gera um arquivo de saída no formato “.s” contendo os *soft-symbols* que serão lidos pelo programa *LRPTOffLineDecoder*, como mostra a Figura 4.15.

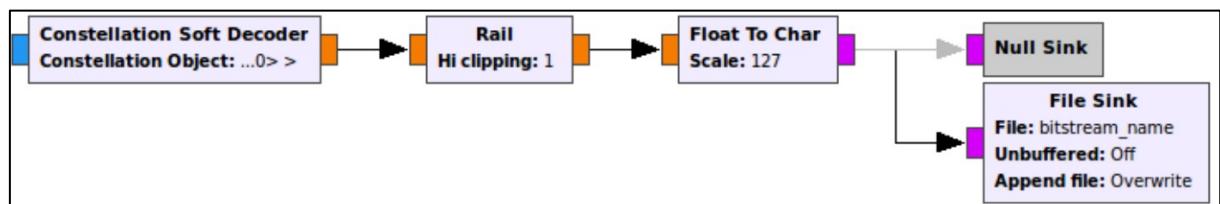
Figura 4.14 – Segunda parte do programa de demodulação QPSK



Fonte: Autor.

A demodulação QPSK envolve muitos conceitos que não são aprofundados nessa dissertação de mestrado, pois foge do escopo do projeto de pesquisa. Do mesmo modo, alguns parâmetros utilizados nos blocos do GRC foram ajustados para buscar o equilíbrio entre qualidade do sinal e desempenho no processamento. Para maiores informações sobre o uso do *GNU Radio* na demodulação QPSK, recomenda-se a leitura do tutorial fornecido pelos mantenedores do *GNU Radio* (GNU, 2017).

Figura 4.15 – Terceira parte da demodulação QPSK



Fonte: Autor.

#### 4.4.3 Decodificação de imagens LRPT

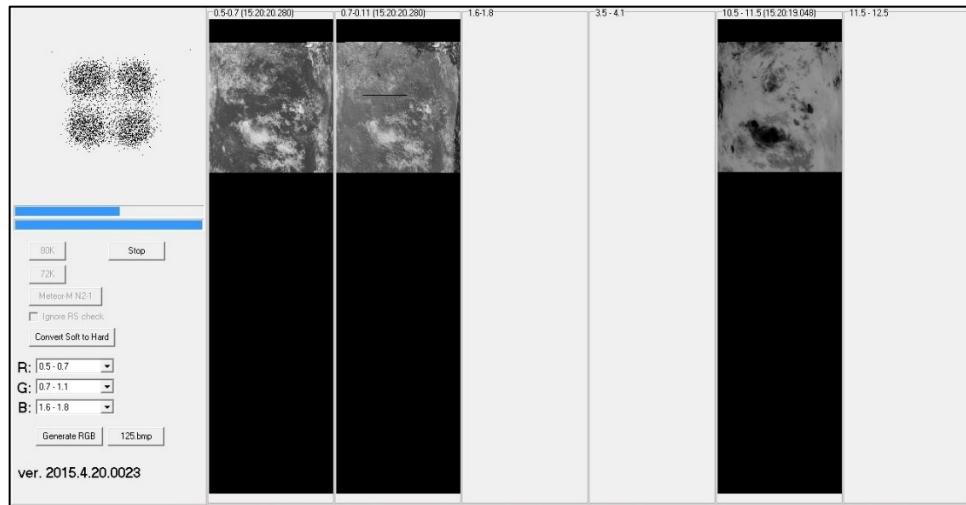
Como já mencionado na Subseção 4.4, a decodificação das imagens LRPT é realizada pelo software *LRPTOffLineDecoder*. Esse programa foi criado por especialistas do centro de pesquisa russo (*Research Center for Earth Operative*

*Monitoring*) e publicado em agosto de 2014, em uma iniciativa de popularizar o satélite Meteor-M N2 entre os radioamadores e meteorologistas ao redor do mundo (ROBONUKA, 2016). Conforme ilustra a Figura 4.16, o programa é capaz de decodificar todos os 6 canais de imagens do radiômetro MSU-MR. Todavia, pode-se observar que apenas os Canais 1, 2 e 5 possuem dados processados, pois trata-se de uma imagem LRPT a ser extraída.

A decodificação adequada das imagens dependerá diretamente da qualidade do sinal de RF recebido pela antena e do arquivo de *soft-symbols* gerado na demodulação no ambiente do GRC. Desse modo, o programa necessita apenas do arquivo no formato “.s” para a extração dos três canais de imagens em tons de cinza.

As imagens geradas pelo programa *LRPTOfflineDecoder* necessitam de correções para se tornarem visualmente mais agradáveis. No Capítulo 5, algumas técnicas de processamento de imagens são propostas como um conjunto de melhorias para as imagens do tipo LRPT.

Figura 4.16 – Programa *LRPTOfflineDecoder* de decodificação de imagens LRPT



Fonte: Autor.

## 5 CORREÇÃO DE IMAGENS LRPT

Este capítulo descreve uma proposta de correção de imagens LRPT obtidas pela estação meteorológica receptora de imagens. Composta por uma sequência de processamentos e análises das imagens brutas, a proposta é constituída das seguintes etapas:

- 1) Geração automática de máscaras de *inpainting*: essa etapa tem a finalidade de identificar, de modo automático, as regiões defeituosas de cada um dos canais que compõem as imagens decodificadas. Diferentemente do funcionamento usual e manual de seleção da região alvo de retoque, a proposta aqui é a identificação automática;
- 2) Restauração por *inpainting*: após a identificação das regiões alvo de cada imagem, o *script* em Python aplica dois algoritmos de retoque: *Fast Marching* e *Exemplar-based*. Esses dois algoritmos distintos são utilizados nas mesmas imagens brutas selecionadas para serem restauradas. Ao final, os resultados são comparados;
- 3) Realce de contraste: devido ao baixo contraste espectral das imagens brutas LRPT, um ajuste no contraste é realizado;
- 4) Composição de imagens: composição de imagens LRPT multiespectrais coloridas RGB122 e RGB125.

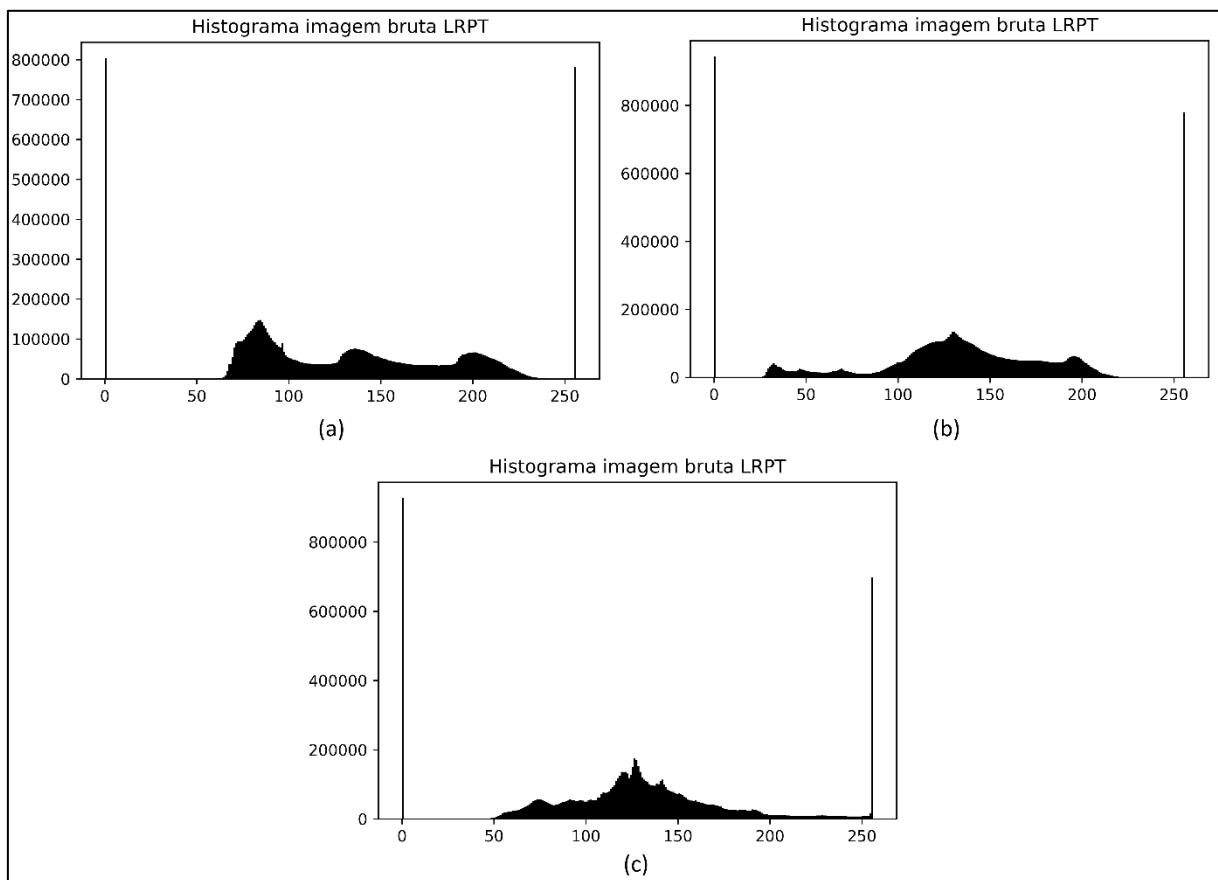
A correção das imagens se dá por meio de um conjunto de *scripts* em Python que utilizam, principalmente, funções da biblioteca de processamento de imagens *OpenCV*. Esse conjunto de *scripts* realiza a automatização das etapas com o objetivo de executar as análises e os processamentos das imagens adequadamente.

### 5.1 GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MÁSCARAS

A geração automática de máscaras de *inpainting* inicia-se com a análise do histograma das imagens brutas para cada um dos três canais LRPT. O objetivo é identificar todas as regiões a serem retocadas em uma imagem, independentemente dos dois tipos de falhas mencionados na Subseção 2.3.2, seja esta causada pela interrupção do sinal do satélite ou devido aos erros do tipo *line drop-out*. De acordo com a Figura 5.1, é possível observar picos localizados próximos aos níveis do preto

(0) e do branco (255) em cada um dos histogramas correspondentes às imagens dos Canais LRPT.

Figura 5.1 – Histogramas dos canais de uma imagem bruta LRPT. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 5



Fonte: Autor.

Em uma análise preliminar, assume-se que esses picos representariam os níveis de cinza correspondentes às linhas faltantes das imagens LRPT. Para a identificação desses pixels, pressupõe-se que, para cada imagem, pelo menos duas máscaras iniciais seriam necessárias, a máscara nº 1 para as linhas mais escuras e a máscara nº 2 para as linhas mais claras. Com isso, o problema da geração da máscara pode ser explicado como a tarefa de geração de uma imagem binária (com apenas dois valores de pixels) que separa a imagem desejada do plano de fundo, ou nesse caso, das linhas faltantes escuras e claras.

Portanto, é necessário identificar o limiar dos pixels mais próximos do preto e do branco que compõem as falhas da imagem. Essa identificação pode ser resolvida

por meio do método mais simples de segmentação de imagens, conhecido por limiarização.

### 5.1.1 Algoritmo de limiarização

A limiarização, ou *thresholding*, baseia-se na diferença dos tons de cinza que compõe diferentes objetos de uma imagem para realizar a segmentação (GONZALEZ; WOODS, 2008). A partir de um determinado limiar preestabelecido, a imagem pode ser segmentada em dois grupos: o grupo de pixels com níveis de cinza abaixo do limiar e o grupo de pixels com níveis de cinza acima do limiar. Em uma imagem limiarizada, atribui-se um valor fixo para todos os pixels de mesmo grupo. Logo, uma imagem  $g(x, y)$  limiarizada por ser definida como:

$$g(x, y) = \begin{cases} \text{minval} & \text{se } f(x, y) > T \\ \text{maxval} & \text{se } f(x, y) \leq T \end{cases}$$

sendo,  $f(x, y)$  a imagem de entrada,  $T$  o limiar estabelecido, *maxval* e *minval* os valores máximo e mínimo de amplitude do pixel, respectivamente.

O algoritmo de geração de máscaras proposto contempla três valores diferentes de  $T$  utilizado de acordo com a Tabela 5.1. Eles foram obtidos a partir da experimentação prática e da análise visual subjetiva com o fito de obter a maior cobertura de falhas de uma imagem LRPT.

Tabela 5.1 – Limiarização aplicada em cada canal de uma imagem LRPT

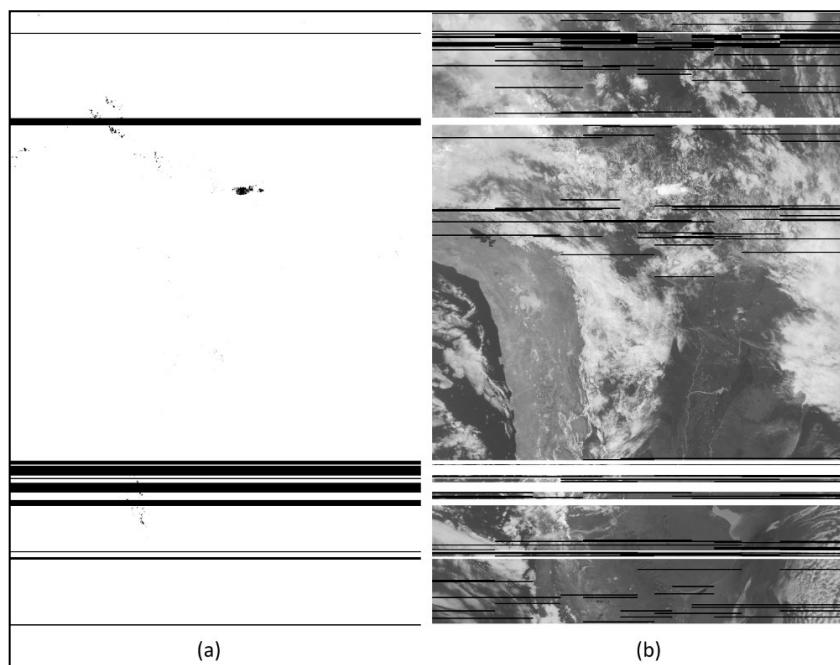
	Máscara nº 1	Máscara nº 2	
	Limiarização nº 1 $T = 18$	Limiarização nº 2 $T = 240$	Limiarização nº 3 $T = 252$
Canal 1	x	x	
Canal 2	x	x	
Canal 5	x		x

Fonte: Autor.

Na Figura 5.2(a), por exemplo, é possível observar o resultado da limiarização de nº 2 ( $T = 240$ ) de uma imagem bruta do Canal 1 (Figura 5.2(b)). Embora o processo de limiarização tenha segmentado algumas nuvens, é possível também perceber que

somente as falhas mais claras da Figura 5.2(b) foram identificadas na Figura 5.2(a), após a aplicação do processo de limiarização. Demonstra-se portanto, que a limiarização é capaz de segmentar uma imagem LRPT para uma possível identificação e extração automática das linhas faltantes. Esse é o primeiro passo fundamental para a compreensão de todo o algoritmo de geração de máscaras. A próxima etapa envolve a aplicação do algoritmo de inundação.

Figura 5.2 – (a) Imagem resultante da limiarização nº 2. (b) Imagem LRPT bruta do canal 1

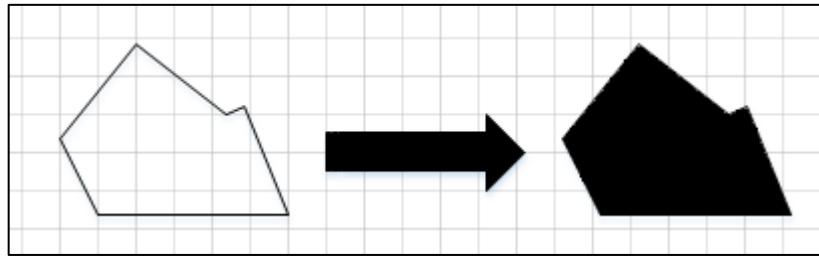


Fonte: Autor.

### 5.1.2 Algoritmo de inundação

O algoritmo inundação, do inglês *Flood fill*, é aplicado nas imagens limiarizadas. O propósito do algoritmo é inundar uma determinada área da imagem com uma cor especificada, como ilustra a Figura 5.3. Ele possui três parâmetros: nodo inicial, cor de troca e cor alvo. Para cada pixel que está conectado ao nodo inicial através da cor alvo, o algoritmo troca a cor alvo pela “cor de troca” especificada.

Figura 5.3 – Ilustração de aplicação do algoritmo de inundação



Fonte: Autor.

Uma das maneiras de entender esse algoritmo é por meio do pseudocódigo recursivo apresentado na Tabela 5.2. A variável *cor\_nodo* representa um pixel da imagem que será aplicado ao algoritmo de inundação. Se *cor\_nodo* for igual a *cor\_de\_troca*, ela será substituída pela nova *cor\_de\_troca*, bem como a função será executada para todas as direções do pixel apontado por *nodo*, que, inicialmente, é apontando para a coordenada (0,0) da imagem. Nesse caso, a ordem em que os pixels são chamados não importa, visto que o resultado será sempre o mesmo.

Tabela 5.2 – Pseudocódigo recursivo do algoritmo de inundação

<b>Pseudocódigo: Algoritmo de <i>FloodFill</i></b>
<b>Função FloodFill ( <i>nodo</i>, <i>cor_alvo</i>, <i>cor_de_troca</i> );</b>
<b>if</b> <i>cor_alvo</i> == <i>cor_de_troca</i> <b>then</b>
<b>retorna</b>
<b>end</b>
<b>if</b> <i>cor_nodo</i> ≠ <i>cor_de_troca</i> <b>then</b>
<b>retorna</b>
<b>end</b>
<i>cor_nodo</i> = <i>cor_de_troca</i>
<b>FloodFill</b> (um passo para a esquerda do nodo, <i>cor_alvo</i> , <i>cor_de_troca</i> )
<b>FloodFill</b> (um passo para a direita do nodo, <i>cor_alvo</i> , <i>cor_de_troca</i> )
<b>FloodFill</b> (um passo para a acima do nodo, <i>cor_alvo</i> , <i>cor_de_troca</i> )
<b>FloodFill</b> (um passo para a abaixo do nodo, <i>cor_alvo</i> , <i>cor_de_troca</i> )
<b>retorna</b>

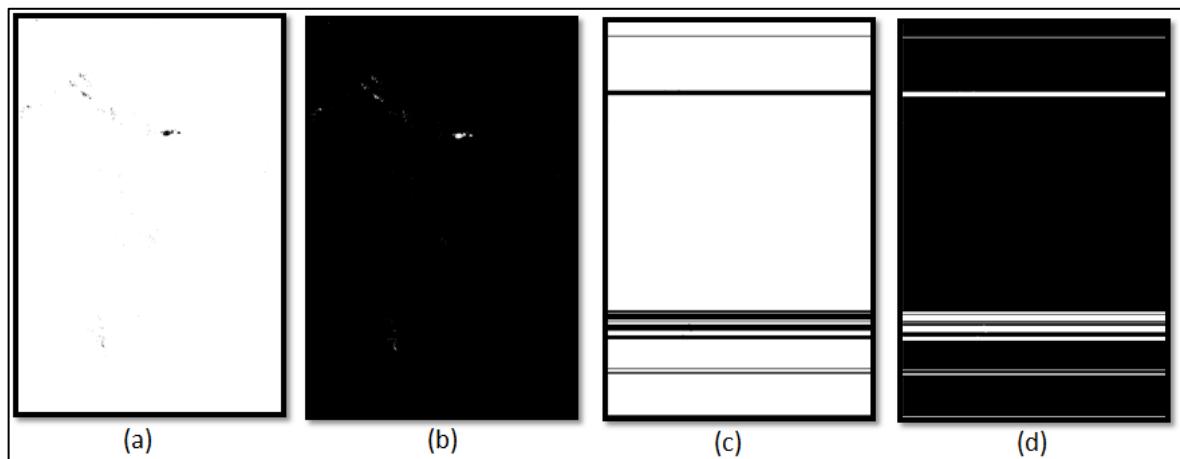
Fonte: Autor.

O algoritmo de inundação, quando aplicado à Figura 5.2(a) com *cor\_de\_troca* igual a 255 (branco) e a *cor\_alvo* igual a zero (preto), produz a imagem da Figura

5.4(a), a qual não mais possui informação visual das linhas escuras da imagem limiarizada porque foram preenchidas com a cor branca. A imagem inundada é fundamental na geração da máscara, pois permite a produção das imagens binárias temporárias da Figura 5.4(b), Figura 5.4(c) e Figura 5.4(d). Elas são produzidas de acordo com os seguintes passos:

1. Inversão de cores da imagem inundada: na inversão de cores aplica-se a fórmula  $Cor_{invertida} = 255 - Cor_{original}$  em cada um dos pixels da imagem. Um exemplo de imagem invertida pode ser observado na Figura 5.4(b);
2. Combinação de imagens: a combinação de imagens é implementada a partir do uso do operador lógico binário “ou”. Os pixels de valores iguais a zero são considerados como valores binários 0 e os pixels de valores iguais a 255 são considerados valores binários 1. Nessa etapa, é realizado o “ou” lógico entre a imagem limiarizada (Figura 5.2(a)) e a imagem invertida (Figura 5.4(b)), resultando assim, na imagem da Figura 5.4(c);
3. Inversão de cores da imagem combinada: a última etapa é a inversão da imagem da Figura 5.4(c), que resulta na imagem da Figura 5.4(d).

Figura 5.4 – (a) Imagem resultante do algoritmo de inundação aplicado à Figura 5.2(a). (b) Imagem inundada de cor invertida. (c) Imagem resultante da combinação das imagens da Figura 5.2(a) e da Figura 5.4(b). (d) Imagem resultante da inversão de cores da imagem da Figura 5.4(c)

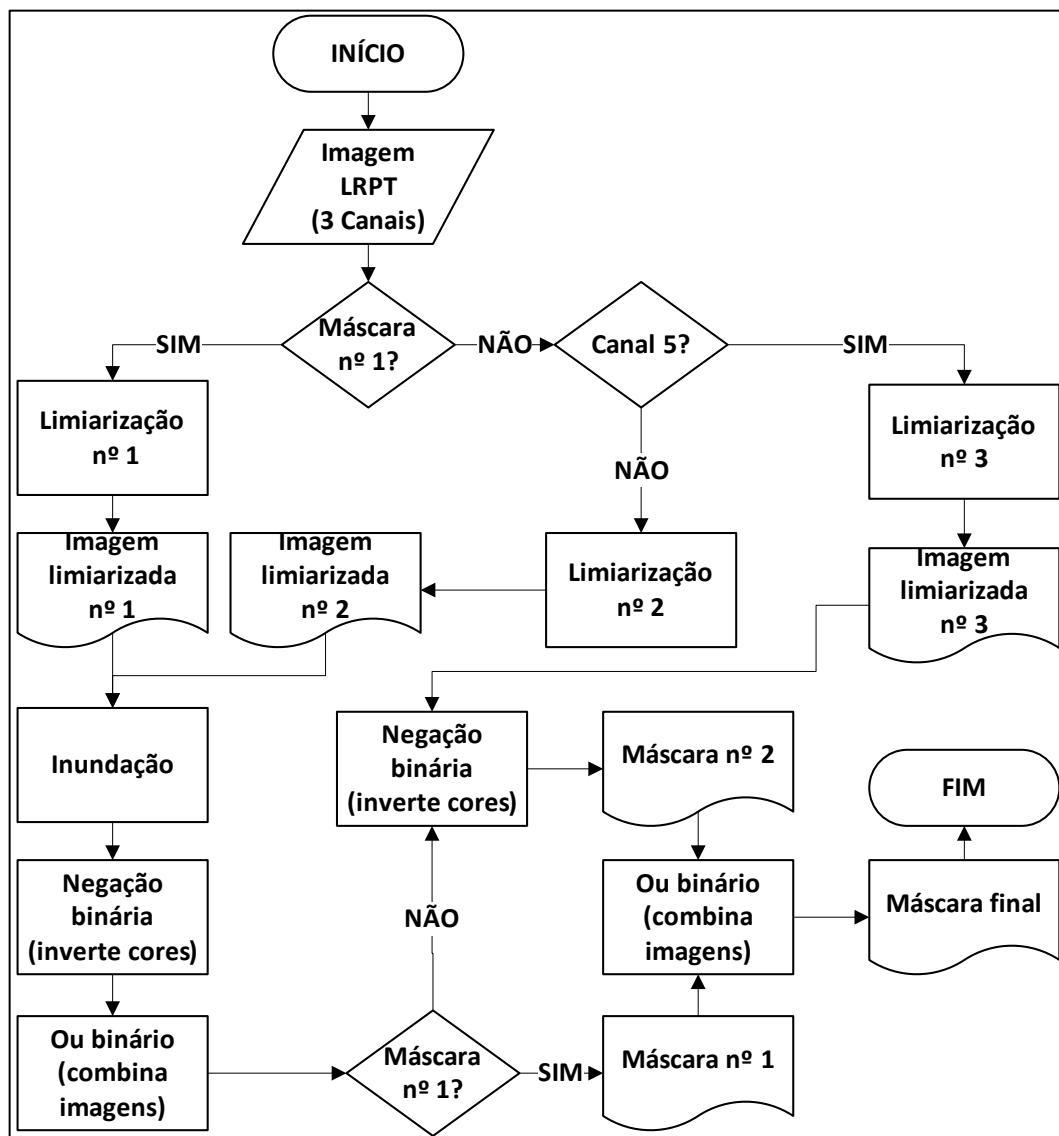


Fonte: Autor.

### 5.1.3 Algoritmo de geração de máscaras

O algoritmo de geração de máscaras é apresentado em forma de diagrama de fluxo, como mostra a Figura 5.5. Para cada canal da imagem LRPT, as máscaras nº 1 e nº 2 correspondentes são combinadas para constituir uma única máscara utilizada pelos algoritmos de retoque digital.

Figura 5.5 – Diagrama de fluxo do algoritmo proposto de geração de máscaras

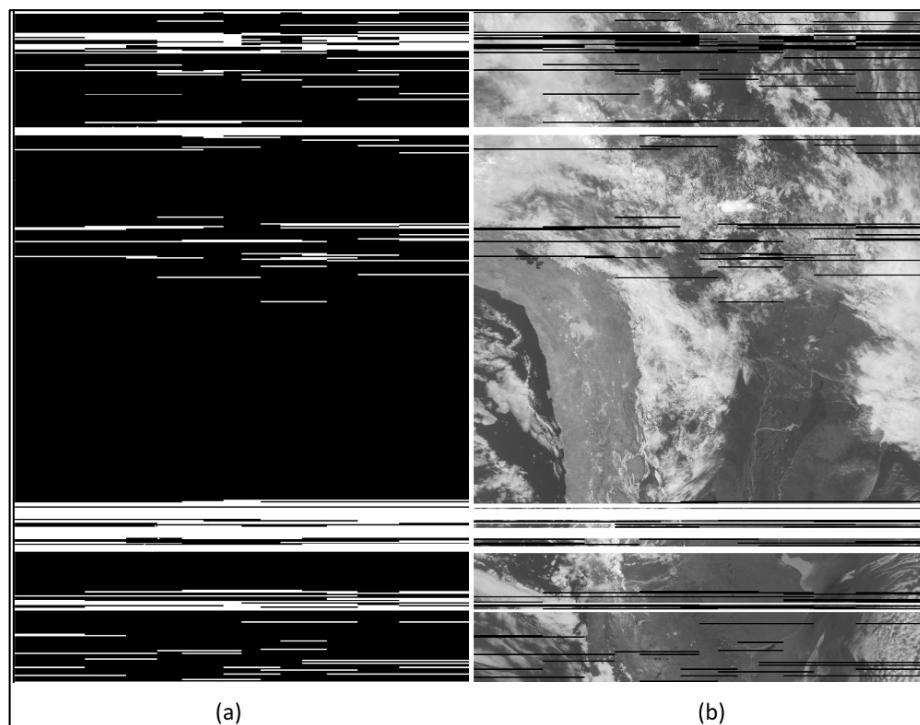


Fonte: Autor.

É importante ressaltar que os limiares da Tabela 5.1 são parâmetros fixos e não necessitam de ajustes, independentemente de qual canal da imagem LRPT que está

sendo considerado. A Figura 5.6(a) mostra o resultado da máscara final após o processamento do algoritmo da Figura 5.5. As linhas identificadas pela cor branca representam a região alvo de retoque, enquanto que o fundo preto representa a região de origem (sem falhas) da imagem original, como mostra a Figura 5.6(b).

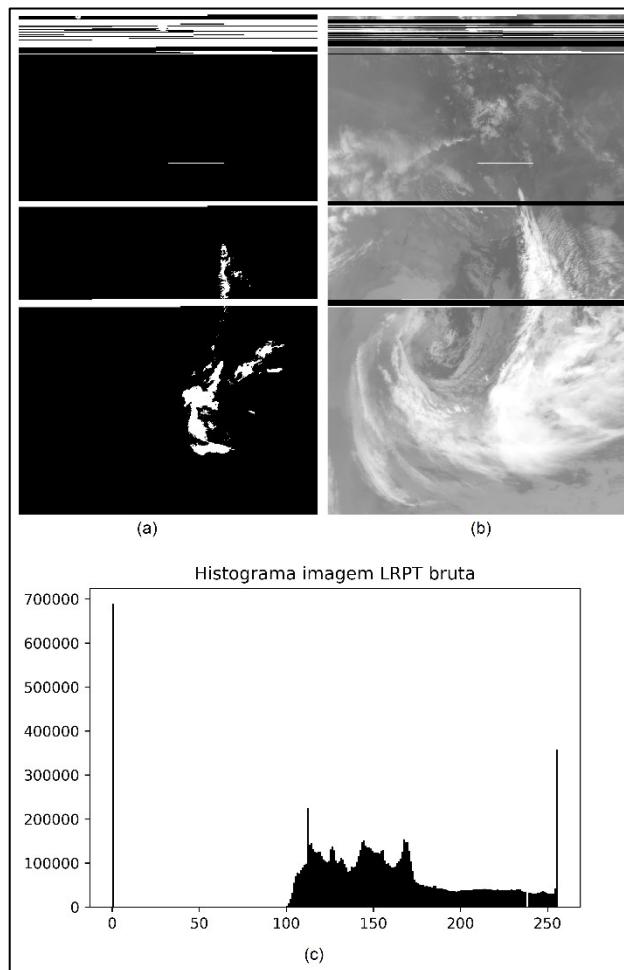
Figura 5.6 – (a) Máscara final de retoque. (b) Imagem LRPT bruta do canal 1



Fonte: Autor.

Uma característica do algoritmo de geração de máscaras é a identificação indevida de alguns pixels de tons mais claros como sendo falhas. Isso ocorre principalmente em imagens IR do Canal 5 porque alguns valores de pixels da imagem bruta são iguais ou próximos aos valores das suas falhas. Esse é um ponto negativo do algoritmo proposto, pois a limiarização utilizada não é capaz de diferenciar estas regiões. A Figura 5.7(a) mostra um exemplo de uma máscara extraída da imagem IR (Figura 5.7(b)) e seu respectivo histograma (Figura 5.7(c)). Nota-se a presença de um conjunto de pixels com valores próximos ao limiar  $T = 252$ , que é utilizado na geração dessa máscara.

Figura 5.7 – (a) Máscara final de uma imagem IR (Canal 5). (b) Imagem IR bruta. (c) Histograma da imagem IR bruta



Fonte: Autor.

## 5.2 RESTAURAÇÃO POR *INPAINTING*

Essa dissertação, inicialmente, adotou o algoritmo *Fast Marching* proposto por Telea (2004) e o algoritmo *Exemplar-based* proposto por Criminisi (2004) para serem aplicados e comparados na restauração das imagens LRPT. A técnica de restauração implementada não requer qualquer intervenção do usuário, já que as regiões alvo e destino são automaticamente identificadas pelas máscaras. Em um primeiro momento, ambos os algoritmos de *inpainting* foram configurados para usarem um bloco de tamanho igual a 4, que é o parâmetro que ajusta a área de cada ponto da imagem considerada pelo algoritmo de restauração.

A restauração foi aplicada em 16 imagens LRPT decodificadas pela estação receptora de imagens meteorológicas. Para realizar essa tarefa, o *script* em Python

realiza a leitura das imagens LRPT, das máscaras geradas, e após, executa o processamento da restauração. O código do algoritmo de Telea (2004) integra a biblioteca *OpenCV* enquanto que o algoritmo de Criminisi (2004) pode ser encontrado em Githuba (2016). As informações sobre a recepção e as imagens LRPT brutas são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Informações sobre a recepção e as imagens LRPT brutas decodificadas pela estação

Imagen LRPT com falhas	Canal	Tamanho	Dimensões (formato Bitmap e resolução 72 x 72 ppi)	Data e hora da recepção	Coordenada geográfica da estação	
A	1	13,7 MB	2695 x 1784 pixels	01/05/2016 15h 14min	29°43'43.5"S 53°43'06.5"O  (Antena posicionada a 2m do solo)	
	2					
	5					
B	5	34,6 MB	2695 x 4496 pixels	06/09/2016 21h 30min		
C	1	32,9 MB	2695 x 4272 pixels	15/11/2016 10h 17min		
	2					
	5					
D	1	31,0 MB	2695 x 4024 pixels	23/11/2016 10h 59min		
	2					
	5					
E	1	20,3 MB	2695 x 2640 pixels	24/11/2016 10h 39min		
	2					
	5					
F	1	4,93 MB	2695 x 640 pixels	24/11/2016 10h 48min		
	2					
	5					

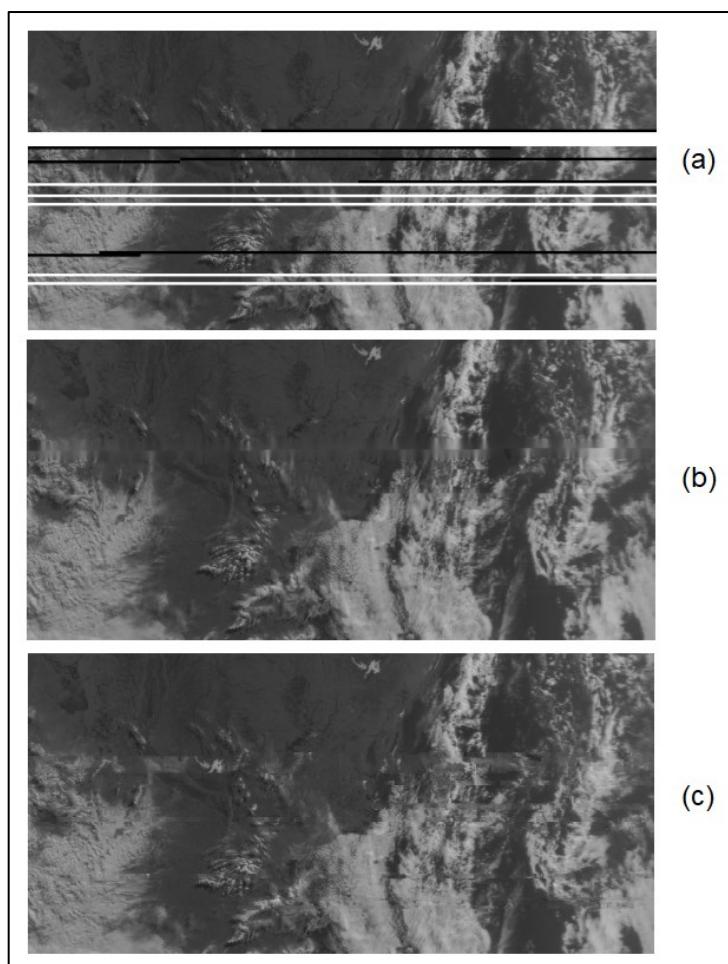
Fonte: Autor.

Como exemplo do resultado da restauração, a Figura 5.8 apresenta a imagem original A do Canal 1 do radiômetro MSU-MR, restaurado pelos dois algoritmos citados, i.e., Telea (2004) e Criminisi (2004). Em uma análise superficial, pode-se concluir que as imagens restauradas são visualmente idênticas. Entretanto, ao ampliá-las, percebe-se claramente as diferenças, principalmente o efeito borrado provocado pelo algoritmo *Fast Marching* e algumas descontinuidades devido a cópia de blocos da região de origem gerado pelo algoritmo *Exemplar-based*.

Outra diferença entre as duas implementações está no tempo de processamento. Em termos comparativos, para uma imagem de tamanho 800 x 500 pixels e resolução igual a 72 x 72 ppi, o algoritmo de Telea (2004) demorou 3 segundos para ser concluído enquanto que o algoritmo de Criminisi (2004), para a

mesma imagem e mesma máscara, exigiu em torno de 23 horas de processamento. Por esse motivo, buscou-se uma alternativa de um código de retoque do tipo *Exemplar-based*, mais rápido e que pudesse gerar resultados visuais semelhantes ao de Criminisi (2004).

Figura 5.8 – (a) Trecho da imagem A Canal 1 ampliada. (b) Imagem restaurada e ampliada (*Fast Marching*). (c) Imagem restaurada e ampliada (*Exemplar-based*)



Fonte: Autor.

Como já mencionado na Subseção 3.1.2.2, Buyssens (2015) propôs uma versão melhorada e mais rápida do algoritmo do tipo *Exemplar-based*, e sua implementação está disponível em Github (2016). Nos experimentos realizados nessa dissertação, o tempo de processamento desse algoritmo por imagem, nas suas resoluções originais, demorou entre 15 minutos até 4 horas, dependendo do seu tamanho e da quantidade de falhas nela encontradas. Na Subseção 5.2.1 são

apresentados alguns resultados e comparações da restauração de imagens LRPT, utilizando os algoritmos de Telea (2004) e Buyssens (2015).

### 5.2.1 Comparação de imagens

Dois métodos objetivos de avaliação da qualidade de imagens – o Erro Quadrático Médio (MSE) e o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM), apresentados na Subseção 3.1.2 – são utilizados para a avaliação das diferenças entre as imagens LRPT originais e as restauradas. De modo geral, a ideia é buscar responder perguntas, tais como: qual a similaridade entre uma imagem restaurada e uma imagem com falhas? Qual a similaridade entre imagens restauradas de diferentes algoritmos de restauração? Qual o algoritmo de retoque que produz o melhor resultado? Para responder a essas perguntas, utiliza-se a comparação de valores de MSE e SSIM calculados entre duas imagens. A Tabela 5.4 mostra os valores de MSE e SSIM extraídos das comparações entre imagens retocadas por diferentes algoritmos com imagens brutas com falhas, e também a comparação entre os resultados de restauração dos diferentes algoritmos (*Fast Marching x Exemplar-based*).

Tabela 5.4 – Comparativo de valores de MSE e SSIM entre imagens com falhas e imagens restauradas pelos algoritmos de Telea (2004) e Buyssens (2015).

<b>Imagen LRPT</b>	<b>Canal</b>	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
		<b>Fast Marching x Com falhas</b>	<b>Exemplar-based x Com falhas</b>	<b>Fast Marching x Com falhas</b>	<b>Exemplar-based x Com falhas</b>	<b>Fast Marching x Com falhas</b>	<b>Exemplar-based x Com falhas</b>
		MSE	SSIM	MSE	SSIM	MSE	SSIM
A	1	1725,51	0,90	1743,36	0,88	33,21	0,96
	2	1988,63	0,90	2013,60	0,89	43,05	0,96
	5	2202,99	0,88	2186,96	0,88	11,66	0,99
B	5	1560,81	0,92	1538,56	0,91	17,03	0,98
C	1	1830,68	0,90	1838,89	0,89	75,78	0,95
	2	1805,64	0,91	1783,75	0,89	99,43	0,94
	5	1825,88	0,90	1819,55	0,89	31,84	0,98
D	1	2882,82	0,85	2872,99	0,83	96,87	0,93
	2	3080,65	0,84	3087,58	0,82	91,13	0,93
	5	2269,25	0,85	2230,71	0,85	31,48	0,97
E	1	1879,66	0,93	1993,20	0,90	67,43	0,95
	2	1778,90	0,93	1889,10	0,91	50,44	0,96
	5	3055,96	0,88	2864,12	0,88	48,84	0,97
F	1	4833,50	0,74	5002,19	0,70	189,95	0,88
	2	5639,92	0,73	5729,19	0,69	244,54	0,85
	5	5076,58	0,69	5040,37	0,69	106,44	0,94

Fonte: Autor.

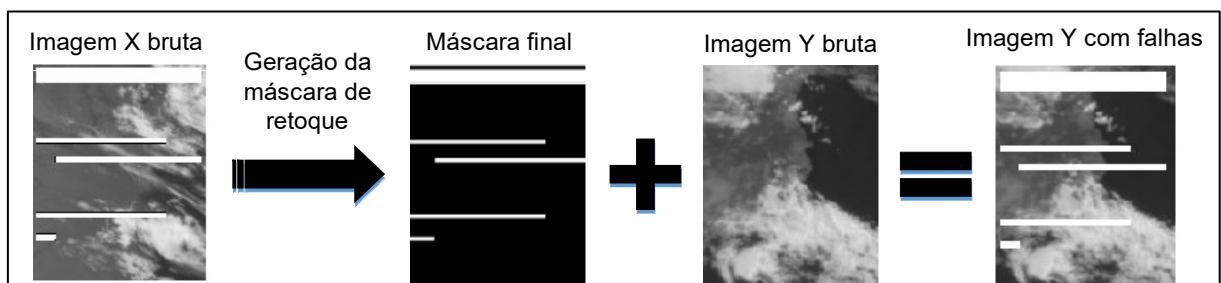
A similaridade entre as imagens da coluna 3 é maior, visto que os valores de MSE são mais próximos de 0 e os valores de SSIM mais próximos de 1. Portanto, nos dois métodos de avaliação da qualidade as imagens retocadas são mais similares entre si do que quando comparadas às suas respectivas imagens originais com falhas. É também possível perceber que colunas com o mesmo valor de SSIM não possuem necessariamente o mesmo valor de MSE, como é o caso do Canal 5 da imagem A nas colunas 1 e 2. Essas discrepâncias existem devido às diferenças dos métodos e parâmetros que são considerados na imagem analisada por cada método de avaliação de qualidade.

No entanto, os dados da Tabela 5.4 não permitem identificar o algoritmo de *inpainting* que obteve o melhor resultado de restauração de acordo com os métodos de MSE e SSIM. Dessa forma, é necessária a obtenção de imagens LRPT brutas e sem falhas para serem utilizadas como referências nos comparativos com imagens restauradas.

A produção de falhas foi realizada por meio da combinação de uma máscara de retoque de uma imagem X com falhas, com a imagem alvo, conforme mostra o esquema da Figura 5.9. De modo simplificado, as falhas identificadas na imagem X são replicadas na imagem Y utilizando a própria máscara de retoque.

Desse modo, é possível replicar as características das falhas originais em cada uma das imagens G, H da Tabela 5.5. A partir de uma imagem X com falhas, gera-se a máscara de retoque que é então combinada à imagem alvo Y para a geração da imagem Y danificada.

Figura 5.9 – Esquema de inserção de falhas em imagens LRPT.



Fonte: Autor.

A Tabela 5.5 possui as colunas de número 1 e 2 que avaliam, respectivamente, a qualidade das imagens retocadas pelo algoritmo *Fast Marching* e *Exemplar-based*

em comparação com a imagem original sem falhas. Já a coluna de número 3, apresenta os valores de MSE e SSIM da comparação entre a imagem original e ela mesma porém acrescida de falhas.

Tabela 5.5 – Comparativo de valores de MSE e SSIM entre imagens sem falhas e restauradas por algoritmos de retoque.

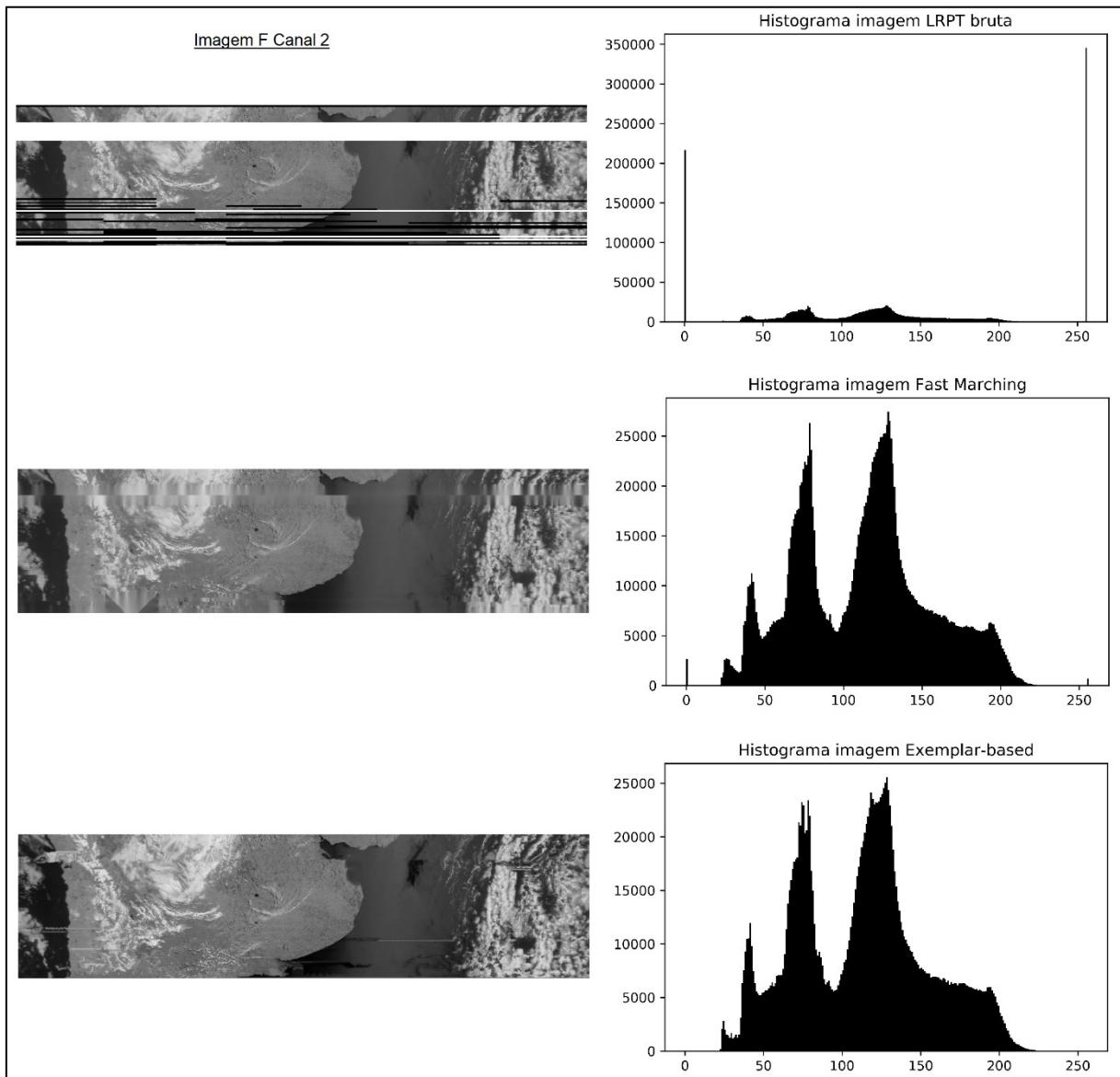
<b>Imagen LRPT</b>	<b>Canal</b>	<b>Dimensões (Bitmap, 72 x 72 ppi)</b>	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
			<b>MSE</b>	<b>SSIM</b>	<b>MSE</b>	<b>SSIM</b>	<b>MSE</b>	<b>SSIM</b>
<b>G</b>	1	2695 x 1454 pixels	56,84	0,94	240,95	0,90	2971,74	0,84
	2		61,01	0,95	131,52	0,90	2500,92	0,84
	5		19,53	0,98	52,40	0,95	2953,85	0,85
<b>H</b>	1	2695 x 944 pixels	13,20	0,98	36,47	0,97	1426,88	0,92
	2		8,08	0,98	25,99	0,97	1347,42	0,92
	5		2,18	0,99	7,10	0,99	1643,48	0,93

Fonte: Autor.

É importante destacar que as imagens G e H, representadas na Tabela 5.5, foram obtidas de trechos de imagens com falhas, e por este motivo elas possuem dimensões reduzidas. De acordo com a Tabela 5.5, o algoritmo *Fast Marching* obteve um resultado melhor na qualidade de imagem restaurada quando comparado à imagem original sem falhas. A evidência desta afirmação aparece tanto nos valores de MSE quanto os valores de SSIM das colunas 1 e 2. Uma provável explicação para este resultado é porque o algoritmo de Buyssens (2015) escolhe blocos de retoque que às vezes não se encontram em uma vizinhança muito próxima ao ponto alvo de restauração, ou então a escolha não parece ser visualmente correta.

Para concluir esta Subseção, a Figura 5.10 apresenta um exemplo das diferenças entre histogramas da imagem F (Canal 2) bruta com falhas e as imagens restauradas pelos algoritmos de Telea (2004) e Buyssens (2015). Como é possível observar, os picos de pixels escuros e claros da imagem original foram atenuados ou totalmente substituídos por valores de pixels da vizinhança das falhas. Isto ocorre pelo simples motivo de terem sido preenchidos por valores de pixels de regiões de origem durante a etapa de restauração.

Figura 5.10 – Imagem F Canal 2 bruta e restaurada com histogramas



Fonte: Autor.

### 5.3 IMAGENS LRPT COLORIDAS

Como foi apresentado na Subseção 2.3.2, as imagens LRPT são expressas em tons de cinza, ou seja, a energia refletida pelos objetos da superfície em uma banda espectral é transformada em valores registrados pelo sistema do sensor no satélite. A análise das imagens permite verificar que simples combinações de bandas e cores podem ampliar a percepção das informações contidas na cena. Nesse sentido, o analista precisa conhecer o comportamento espectral dos alvos de interesse e saber

em quais bandas eles são melhores discriminados, a fim de interpretar o significado das cores utilizadas. De acordo com a Subseção 3.2.2, as composições LRPT mais comuns para a análise meteorológica são RGB122 e RGB125. Tais composições foram realizadas na linguagem de programação Python com os recursos de criação de imagens multicanais da biblioteca *OpenCV*, como exemplifica a Figura 5.11.

Figura 5.11 – Trecho do código em Python para a geração de imagens coloridas multiespectrais LRPT

```

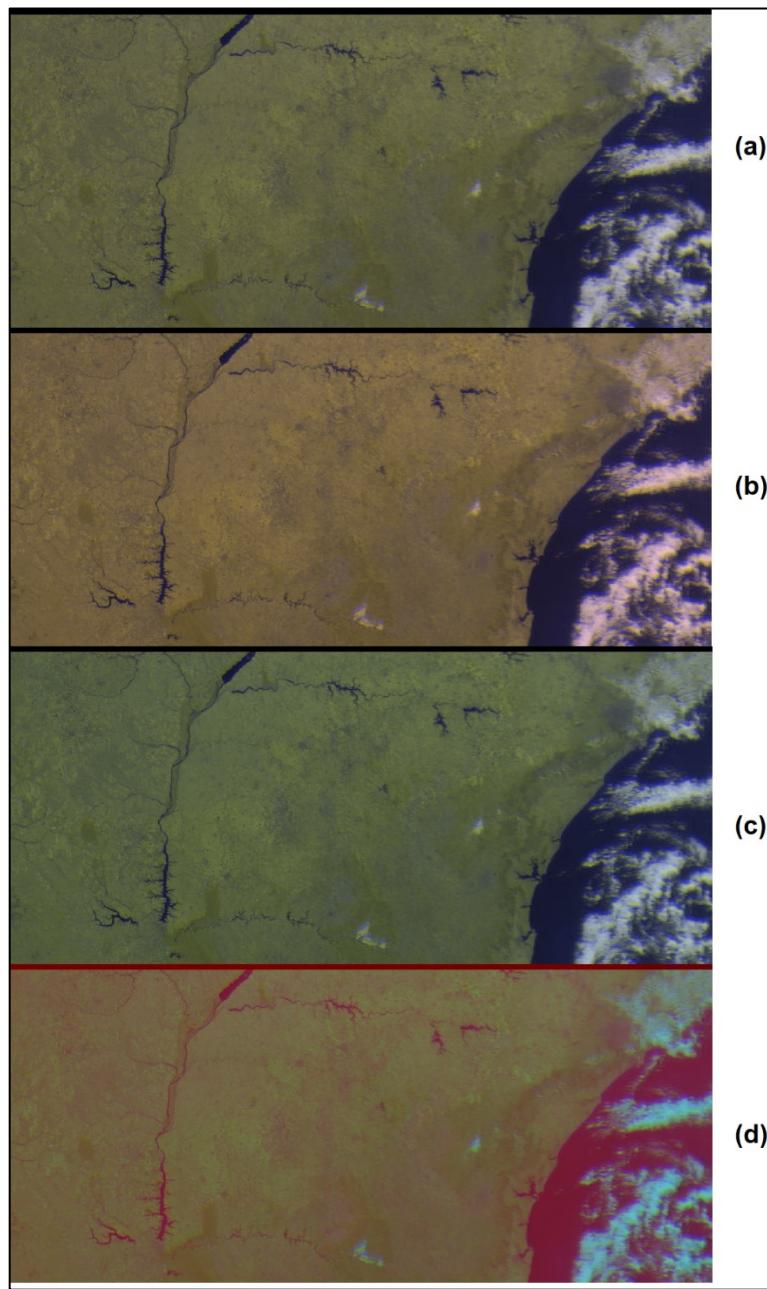
22 # RGB122
23 img[:, :, 0] = gray_image1 # R 1
24 img[:, :, 1] = gray_image2 # G 2
25 img[:, :, 2] = gray_image2 # B 2
26 # Salva imagem 122
27 cv2.imwrite("LRPT_122.bmp", img)
28
29 # RGB122 terra marrom
30 img[:, :, 0] = gray_image1 # R 1
31 img[:, :, 1] = gray_image2 # G 2
32 img[:, :, 2] = np.int_(gray_image2*1.2) # B 2
33 # Salva imagem
34 cv2.imwrite("LRPT_122_brown.bmp", img)
35
36 # RGB122 terra verde
37 img[:, :, 0] = gray_image1 # R 1
38 img[:, :, 1] = gray_image2 # G 2
39 img[:, :, 2] = np.int_(gray_image2*0.9) # B 2
40 # Salva imagem
41 cv2.imwrite("LRPT_122_green.bmp", img)
42
43 # RGB125 pseudo NOAA
44 img[:, :, 0] = gray_image1 # R 1
45 img[:, :, 1] = gray_image2 # G 2
46 img[:, :, 2] = 255-gray_image3 # B 5 (invertida)
47 # Salva imagem 125 pseudo NOAA
48 cv2.imwrite("LRPT_125.bmp", img)

```

Fonte: Autor.

O código da composição colorida possui as variáveis *gray\_image1*, *gray\_image2* e *gray\_image3*, as quais representam as imagens dos Canais LRPT 1, 2 e 5, respectivamente. A partir das combinações dessas variáveis, obtém-se quatro tipos de resultados: RGB122 tradicional, RGB122 com o solo amarronzado, RGB122 com o solo esverdeado e RGB125, conforme as imagens (a), (b), (c) e (d), respectivamente, da Figura 5.12. Os ajustes de contraste foram realizados arbitrariamente e sem intenção de realce de objetos específicos da imagem. Nos experimentos realizados buscou-se, a equalização do histograma para maior aproveitamento dos tons de cinza em cada canal da imagem.

Figura 5.12 – Resultado da composição colorida. (a) RGB122 tradicional. (b) RGB122 amarronzado. (c) RGB122 esverdeado. (d) RGB125

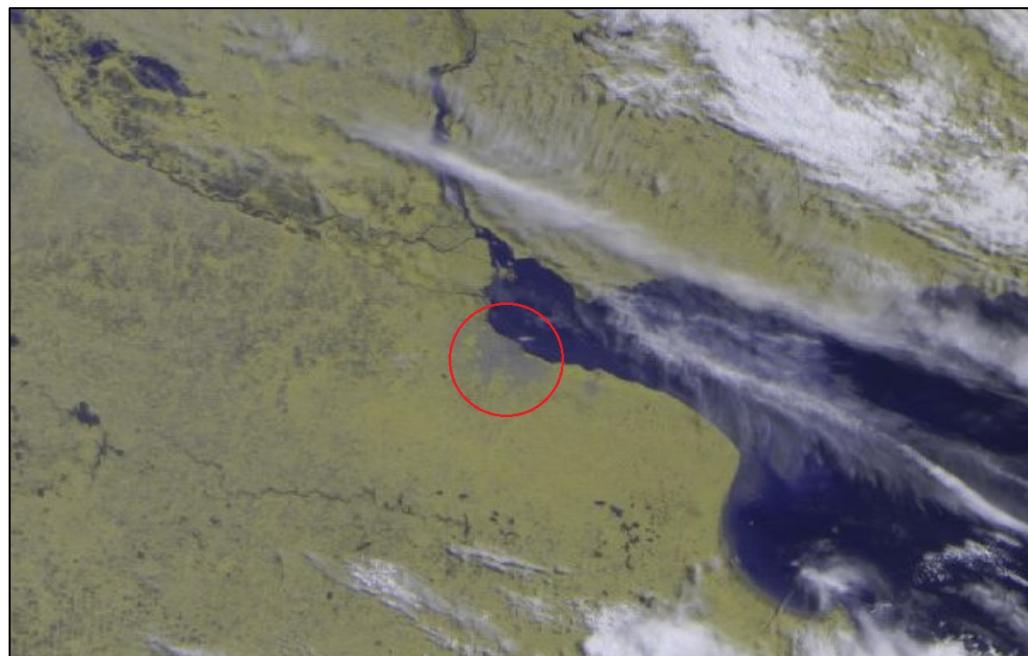


Fonte: Autor.

A Figura 5.13 apresenta uma imagem LRPT RGB122 com ajuste de contraste da região metropolitana de Buenos Aires na Argentina. Embora as imagens LRPT sejam utilizadas com a finalidade de análises meteorológicas, é possível notar que os pixels destacados pelo círculo vermelho da Figura 5.13 apresentam uma tonalidade mais acinzentada, indicando a região metropolitana. Portanto, mesmo imagens com resoluções espaciais de 1 km, como é o caso da imagem da Figura 5.13, e um realce

de contraste adequado, é possível identificar visualmente regiões metropolitanas ou mais urbanizadas.

Figura 5.13 – Composição RGB122 tradicional de um trecho da imagem C com o círculo vermelho destacando a região metropolitana de Buenos Aires.



Fonte: Autor.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação de mestrado apresentou um estudo sobre a construção de uma estação receptora de imagens meteorológicas do tipo LRPT e apresentou uma proposta de correção automática dessas imagens. Por caracterizar-se como sendo uma pesquisa multidisciplinar, tratou não somente da estação em si, mas também da temática de sensoriamento remoto, rádio definido por software e processamento de imagens.

O Capítulo 2 iniciou-se trazendo conceitos essenciais do SR com o objetivo de compreender a natureza dos sinais enviados por satélites, bem como o funcionamento de um sistema de transmissão e recepção de imagens meteorológicas do tipo LRPT. Os principais pontos deste capítulo são: a apresentação do satélite Meteor-M N2, as características do sinal LRPT e dos dois tipos de falhas presentes nessas imagens. Foram encontrados poucos trabalhos científicos que abordam sobre as origens dessas falhas, e, mesmo aqueles que as mencionam, não apresentaram soluções de qualquer tipo para o seus tratamentos ou atenuamentos. Por esse motivo, essa pesquisa se configura uma contribuição dentro das investigações nesse campo do conhecimento, uma vez que propõe uma solução de correção de imagens LRPT.

O Capítulo 3 resgatou alguns conceitos relevantes à estas correções. A restauração, realce de contraste e composição de imagens formam um conjunto de técnicas de melhorias típicas do SR. A restauração, realizada pelos algoritmos de retoque digital *Fast Marching* e *Exemplar-based*, teve como principal objetivo o preenchimento das falhas identificadas pelas máscaras, bem como a obtenção de diferentes resultados de retoques. Esses resultados foram usados em algumas comparações para avaliar a qualidade das imagens utilizando os métodos de MSE e SSIM.

No Capítulo 4 foi apresentado, inicialmente, os diferentes tipos de antenas de recepção meteorológica, como também os fundamentos do RDS. Essa pesquisa optou por construir a antena QFH utilizando materiais comuns de fácil acesso, e esta por fim, obteve um desempenho satisfatório para o recebimento do sinal LRPT. Embora a sua estrutura não tenha sido construída com maior rigidez, pois utiliza o cabo RG6 flexível, recomenda-se a utilização de tubos de cobre ou alumínio em suas helicoidais para proporcionar maior resistência mecânica. As deformações em sua estrutura podem afetar a calibração e diminuir a eficiência. Do mesmo modo, é

importante mencionar que as medições realizadas no analisador de rede poderiam ser mais confiáveis caso fossem realizadas em uma sala mais adequada, como por exemplo, em uma câmara anecoica, sem interferência de objetos externos ou ruídos.

Ainda nesse capítulo, introduziu-se a arquitetura convencional de um RDS e do rádio RTL-SDR. Devido o acesso ao rádio RTL-SDR que muitos tópicos dessa pesquisa foram possíveis de serem abordados. A experiência de programação na plataforma de desenvolvimento de rádios definidos por software, *GNU Radio Companion*, foi uma excelente oportunidade para conhecer as diversas vantagens que este tipo de aplicação possui para trabalhos científicos. O RTL-SDR, por exemplo, por ser um dispositivo de baixo custo e programável, torna-se um ótimo candidato à integrar laboratórios de pesquisas de qualquer universidade, em especial a UFSM.

Em virtude do que foi estudado, implementou-se uma estação receptora de imagens meteorológicas do tipo LRPT, baseada em componentes de hardware e software de baixo custo, sendo alguns componentes também gratuitos e de fácil acesso. A estação proposta foi capaz de realizar o rastreio do satélite Meteor-M N2, a demodulação do sinal, a decodificação e melhoramento das imagens.

O Capítulo 5 apresentou a proposta de correção de imagens LRPT iniciando-se pela descrição do algoritmo de geração automática de máscaras. Todo sistema de retoque requer uma etapa de mascaramento que seleciona a região alvo a ser retocada. A criação da máscara é independente do algoritmo de retoque e dependente apenas das características disponíveis na imagem. De modo geral, o algoritmo proposto foi capaz de identificar todas as regiões faltantes das imagens utilizadas, e atingiu satisfatoriamente o objetivo de geração de máscara automática. Entretanto, quando os valores de alguns pixels de uma imagem são próximos aos valores dos pixels da falha, a geração da máscara pode identificá-los como sendo parte do retoque. Essa é uma desvantagem a qual pode ser identificada principalmente em algumas máscaras de imagens do Canal 5, de IR.

Também foi possível observar os retoques das imagens G e H, executados pelo algoritmo de *Fast Marching*, obtiveram um menor tempo de processamento e uma melhor avaliação de qualidade quando comparados ao resultados do algoritmo de *Exemplar-based*. Entretanto, faz-se necessário um maior número de experimentos utilizando imagens de diferentes dimensões e regiões do globo, para então obter um resultado mais representativo da qualidade obtida.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, propõe-se algumas modificações na estação receptora que poderiam aumentar o seu desempenho e sua qualidade. A utilização da antena *Turnstile*, por possuir um bom ganho em baixas elevações, por exemplo, poderia ser uma opção para substituir a antena QFH. Da mesma forma, o uso de um LNA (*Low Noise Amplifier*) poderia melhorar a razão sinal-ruído durante a recepção do sinal LRPT e consequentemente reduzir os efeitos dos erros *line drop-out*. Outra modificação relevante é o reposicionamento da antena receptora em uma altitude maior em relação ao solo para se obter uma maior área de cobertura do sinal do satélite.

Uma proposta interessante de pesquisa é a utilização de técnicas de classificação de imagens para limitar a região de atuação do algoritmo *Exemplar-base*. Deste modo, evitar-se-ia a seleção incoerente de blocos de retoque, e poderia melhorar a qualidade da restauração final.

Outra proposta é a expansão de aplicação do algoritmo de geração de máscaras em outras imagens de uso científico, bem como nas imagens meteorológicas do tipo HRPT.

## REFERÊNCIAS

AMAZON. NooElec NESDR. Mini USB RTL-SDR & ADS-B Receiver Set. Disponível em: <<https://goo.gl/el06sA>>. Acesso em 31 de maio 2016.

APOLO11. Espaço, Ciências, Fenômenos Naturais. Disponível em: <[http://www.apolo11.com/noaa\\_17\\_apt.php?posic=dat\\_20050224-183736.inc](http://www.apolo11.com/noaa_17_apt.php?posic=dat_20050224-183736.inc)>. Acesso em 02 fev. 2018.

BARD J., K. V. **Software Defined Radio: the software communications architecture**: Wiley, 2007. (Wiley Series in Software Radio).

BERTALMIO, Marcelo; SAPIRO, Guillermo; CASELLES, Vincent; BALLESTER, Coloma. Image inpainting. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '00). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 2000, p.417-424.

BLOSSOM, E. GNU Radio: tools for exploring the radio frequency spectrum. Linux J., Houston, TX, v.2004, n.122, p.4 , June 2004.

BOPP, M. Meteor M N2 LRPT Images. Disponível em: <<http://www.dd1us.de/meteor%20M-N2%20image%20collection.html>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

BUSANI, C. et al. Diseño y construcción de una antena double cross para recepción de imágenes procedentes de satélites de órbita polar. [S.I.]: Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona. Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, 2012.

BUYSSENS, P. et al. Exemplar-Based Inpainting: technical review and new heuristics for better geometric reconstructions. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.24, n.6, p.1809–1824, June 2015.

CARDOSO, J. et al. **Estimação Objetiva da Qualidade de Vídeos Estereoscópicos**. 2013. 22-29

CELESTRAK. NORAD Two-Line Element Sets, Disponível em: <<https://www.celestrak.com/>>, Acesso em: abril 2017.

CRIMINISI, A.; PEREZ, P.; TOYAMA, K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.13, n.9, p.1200–1212, Sept 2004.

CSETE, A. - Gpredict, Disponível em: <<http://gpredict.oz9aec.net/>> Acesso em: 10 de abril 2017.

DASCAL, P. V. et al. LRPT Weather Satellite Image Acquisition Using a SDR-based Reception System. **Acta Technica Napocensis – Electronica-Telecomunicatii**, v.56, n.2, p.20–25, 2015.

DESAI, M.; GANATRA, A. **Survey on Gap Filling in Satellite Images and Inpainting Algorithm.** 2012. 341-345.

DILLINGER. Dillinger, M., Madani, K., Alonistioti, N. **Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions.** Wiley & Sons, 2003.

DOURADO, W. B. **Avaliação de Técnicas de Interpolação de Imagens Digitais.** 2014. 141 (Dissertação de mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, Presidente Prudente.

EASTMAN, J. Ronald. **IDRISI 32: guide to GIS and image processing.** Clark University, 2001.

ESPINET, R. A. Receiving the Meteor-M N2 LRPT Downlink with an RTL-SDR Dongle. **The GEO Quarterly – Group for Earth Observation**, n.44, p.6–12, 2014.

FITZEK F.H.P., K. M. **Cooperation in Wireless Networks: principles and applications: real egoistic behavior is to cooperate.** Springer, Netherlands, 2006.

FURIAN, Info Escola. Espectro Eletromagnético [2016?]. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** Oficina de Textos, São Paulo, Brasil. 2011. ISBN 9788579750649. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=18GkH5X81XcC>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Digital Image Processing.** Pearson/Prentice Hall, 2008.

GNU Radio Guided Tutorial PSK Demodulation. Disponível em: <[https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided\\_Tutorial\\_PSK\\_Demodulation](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_PSK_Demodulation) - 2017.> Acesso em: 02 fev. 2018.

GITHUBa. Exemplar Based inpainting Python. Disponível em: <<https://github.com/veslam/Exemplar-Based-Inpaining-Python>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

GITHUBb - G'MIC. Disponível em: <<https://github.com/dtschump/gmic>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

GOODRUM, G. et al. **NOAA KLM User's Guide.** U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Climatic Data Center, Climate Services Division, Satellite Services Branch, 1999. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=0p7mAQAACAAJ>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

GRAHAM, William. Nasa Space Flight, 2017. Disponível em: <<https://www.nasaspacesflight.com/2017/11/soyuz-2-1b-launch-meteor-m/>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

KLOSE, Christina. SEOS Project Marine Pollution Tutorial [2016?]. Disponível em: <<http://www.seos-project.eu/modules/marinepollution/marinepollution-c02-s18-p01.html>>. Acesso em 02 fev. 2018.

LATE, B. R.; DHARASHIVE, N. G. A Survey on Image Inpainting Techniques to Reconstitute Remotely Sensed Images. **International Journal of Science and Research (IJSR)** 5: 2016, p. 646-650.

LES HAMILTON. Disponível em: <<http://leshamilton.co.uk/meteor3m.htm>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

LEVIN, A.; ZOMET, A.; WEISS, Y. Learning how to inpaint from global image statistics. Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision, 2003, 13-16 Oct. 2003. p.305-312 vol.1.

LI S., K. M. Flexible Adaptation in Cognitive Radios. In: **Analog Circuits and Signal Processing**. Springer: New York, 2012. .

LINT, C. van. A Portable, Collapsible QFH Antenna for the 137 MHz Band. **The GEO Quarterly – Group for Earth Observation**, n.1, p.46–48, 2004.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**: Blucher, 2015.

MENESES, A. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 26 de fev. 2017.

**METEORM N2 LRPT Gallery**. Disponível em: <<http://meteor.robonuka.ru/gallery/>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

MIJIA, H.; LINFENG, L.; SHULGIN, V. I. MATLAB model for simulating transmission and reception of meteorological images in the low-rate picture transmission forma. 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2017, 18-20 April 2017. p.495-499.

MOHAMMADI, P.; EBRAHIMI-MOGHADAM, A.; SHIRANI, S. **Subjective and Objective Quality Assessment of Image: A Survey**. 2014

MOREIRA, M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4.ed. UFV, 2012.

MOXEY, L. et al. Introducing Real-Time AVHRR-APT Satellite Imagery in the Classroom Environment. **Journal of Science Education and Technology**, v.13, n.3, p.387–394, 2004.

- NOVO, E. de M. **Sensoriamento remoto: Princípios e aplicações**. Blucher, 2010.
- NRCAN. Natural Resources Canada, 2015 – Pre-processing. Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/node/9403>>. Acesso em: 10 out. 2017.
- OLIVEIRA, Manuel M.; BOWEN, Brian; MCKENNA, Richard; CHANG, Yu-sung. Fast Digital Image Inpainting, Proceedings of the International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP 2001), Marbella, Spain. September 3-5, 2001, p. 261-266.
- PANDYA, N.; LIMBASIYA, B. **A Survey on Image Inpainting Techniques**. International Journal of Current Engineering and Technology: INPRESSCO: 1828-1831 p. 2013
- PATIL, C.; CHAVAN, T.; CHAUDHARI, M. Hardware and software implementation of weather satellite imaging earth station. 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2016, 21-24 Sept. 2016. p.664-670.
- PINTO, R. H. C. **Projeto de uma Antena Quadrifilar de Meia Espira e Meio Comprimento de Onda**. 2007. Dissertação de Mestrado — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, São Carlos – SP, 2007.
- RANE, S. D.; SAPIRO, G.; BERTALMIO, M. Structure and Texture Filling–In of Missing Image Blocks in Wireless Transmission and Compression Application. **IEEE Trans. on Image Processing**, vol.12, no.3, pp.296-303, Março, 2003.
- ROBONUKA. Meteor-M N2 News and Support. Disponível em: <<http://meteor.robonuka.ru/>>. Acesso em: 12 nov. 2016.
- ROSCOSMOS. State Space Corporation. Disponível em: <<https://www.roscosmos.ru/24362>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- RUSSELL, Edgar. NASA Scientific Visualization Studio, 1998. Disponível em: <<https://svs.gsfc.nasa.gov/183>>. Acesso em: 02 fev. 2018.
- SETHIAN, J. A. A Fast Marching Level Set Method for Monotonically Advancing Fronts. **Proc. Nat. Acad. Sci.** 93:4, 1996, p. 1591-1595.
- SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing, Third Edition: models and methods for image processing**. Orlando, FL, USA: Academic Press, Inc., 2006.
- SINGH, M.; KAUR, H. **A Survey on Image Inpainting for Remotely Sensed Images**. IRACST - International Journal of Computer Science and Information Technology & Security. 6: 487-490 p. 2016
- SRC. Meteor-M N2 Satellite Data. State Research Center “Planeta”. Disponível em:<[http://planet.iitp.ru/english/meteor/meteor\\_2\\_data\\_eng.htm](http://planet.iitp.ru/english/meteor/meteor_2_data_eng.htm)>. Acesso em: 14 de out. 2017.

STEWART, R. W. et al. **Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR.** 1.ed., 2015.

TAN, S. Meteorological Satellite Systems. In: **Springer Briefs in Space Development.** Springer: New York, 2013.

TELEA, A. An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method. *J. Graphics, GPU, and Game Tools*, v.9, n.1, p.23–34, 2004.

TESKE, Lucas. GOES Satellite Hunt (Part 2 – Demodulator). Disponível em:<<http://www.teske.net.br/lucas/2016/10/goes-satellite-hunt-part-2-demodulator/>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

TRIVEDI, N. **Image Enhancement and Restoration by Image Inpainting.** *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. 4: 30-34 p. 2014

SOLC, T. Notes on m&m clock recovery. Disponível em:  
<[https://www.tablix.org/~avian/blog/archives/2015/03/notes\\_on\\_m\\_m\\_clock\\_recovery/](https://www.tablix.org/~avian/blog/archives/2015/03/notes_on_m_m_clock_recovery/)>. Acesso em: 02 fev. 2018.

WALLACH, J.; WINSTON, W. G.; UNITED STATES. NATIONAL ENVIRONMENTAL SATELLITE, D. A. I. S. User's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data and Information Service, 1997. Disponível em:  
<<https://books.google.com.br/books?id=oPgIAQAAIAAJ>>.

WEATHER Satellite LRPT Images from Meteor-M N2. Disponível em:<<http://www.vk2dag.com/wefax/M2Wefax.html>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

ZARIC, A. et al. Image quality assessment - comparison of objective measures with results of subjective test. *Proceedings ELMAR-2010*, 2010, 15-17 Sept. 2010. p.113-118

ZUMERLY, R. M. Antenas para satélites meteorológicos DCA, QFH, Turnstile e Lindenblad. Disponível em:<<http://www.qsl.net/py4zbz/4ant.htm>>. Acesso em: 10 de set. 2017.