

Protótipo de uma estação receptora de imagens meteorológicas utilizando GNU Radio e RTL-SDR

Rodrigo Dias Flores, Eno D. Saatkamp e Renato Machado

Resumo— Este trabalho apresenta o projeto de uma estação terrestre capaz de rastrear, demodular e decodificar sinais de imagens de satélite no formato *Automatic Picture Transmission* (APT) e *Low-Rate Picture Transmission* (LRPT). A solução proposta apresenta a construção de uma antena QFH, o uso de rádio definido por software (RDS) RTL-SDR e um computador pessoal para decodificar as imagens por meio da plataforma de desenvolvimento *GNU Radio Companion* (GRC). Realizaram-se testes de campo para obtenção de imagens que serviram para avaliar o desempenho da estação receptora.

Palavras-Chave—NOAA - APT, MeteorM N2 - LRPT, GNU Radio, RTL-SDR.

Abstract— This work presents the development of a ground station, which is capable of tracking, demodulating and decoding the signals of Automatic Picture Transmission (APT) and Low-Rate Picture Transmission (LRPT) satellite images. The proposed solution presents the construction of a QFH antenna, the use of the software-defined radio RTL-SDR and a personal computer to decode the images through the GNU Radio Companion (GRC) development platform. We performed field tests to obtain the satellite images that were used to assess the ground station performance.

Keywords— NOAA-APT, MeteorM N2-LRPT, GNU Radio, RTL-SDR.

I. INTRODUÇÃO

A era da meteorologia por satélite começou no final da década de 50 com o lançamento do primeiro satélite artificial Sputnik 1. Entretanto, TIROS-1, foi considerado o primeiro satélite meteorológico lançado em 1960 pelos Estados Unidos [1]. Desde então, a meteorologia vem se beneficiando de imagens da superfície terrestre, definindo com maior precisão padrões e fenômenos meteorológicos globais. Atualmente, os satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) dos Estados Unidos e Meteor da Rússia transmitem seus dados continuamente em diversas frequências e em vários modos e resoluções. Destacam-se os modos NOAA - APT (*Automatic Picture Transmission*) [2] – modo analógico mais popular de transmissão de imagens de baixa resolução – e seu sucessor MeteorM N2 - LRPT (*Low-Rate Picture Transmission*), possui a transmissão digital com o propósito de melhorar a qualidade e disponibilidade de dados meteorológicos [3].

Tem-se a crença de que para receber imagens de satélites é necessária uma licença de autorização e receptores de RF de alto custo. Os trabalhos apresentados em [4], [5] e [6] demonstram que com simples antenas é possível implementar

uma estação receptora de imagens meteorológicas de baixo custo que geram imagens em tempo real da região percorrida pelo satélite. Este trabalho considera o projeto de uma antena QFH (*Quadrifilar Helical Antenna*) e propõe uma solução baseada em um RDS de baixo custo (RTL-SDR) e na plataforma de desenvolvimento GRC para conceber um sistema capaz de receber e decodificar imagens APT e LRPT de satélites meteorológicos.

A. NOAA - APT

No modo APT dos satélites NOAA, a transmissão é composta por 2 canais (A e B) os quais possuem imagens de resolução 4km/pixel de 8 bits derivadas de dois canais do sensor radiômetro AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). Este é um sistema analógico criado na década de 60 que fornece telemetria e imagens em tempo real para qualquer estação terrestre a pelo menos 2 vezes ao dia para cada satélite. Atualmente, os canais padrão, configurados pela administração do NOAA, e transmitidos durante a luz do dia são o 2 e 4 e durante a noite 3B e 4. Informações das resoluções espectrais dos canais são apresentadas na Tabela I.

TABELA I. CANAIS E COMPRIMENTOS DE ONDA DO SENSOR AVHRR A BORDO DOS SATÉLITES NOAA.

Canais AVHRR	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial em nadir
1 - vermelho visível	0,580 – 0,680	4km (APT)
2 - IR próximo	0,725 – 1,00	
3A - IR próximo	1,580 – 1,64	
3B - IR médio	3,550 – 3,93	
4 - IR termal	10,30 – 11,3	
5 - IR termal	11,50 – 12,5	

O sinal APT possui uma largura de 34 kHz e é modulado na subportadora AM 2,4 kHz e na portadora FM ~137 MHz. Os satélites em operação atualmente são NOAA-15 (137,62 MHz), NOAA-18 (137,9125 MHz) e NOAA-19 (137,1 MHz), todos de órbita polar. A imagem de cada canal representa a radiância medida naquele comprimento de onda quantizada em 256 (2^8) valores diferentes de tons de cinza [2].

B. MeteorM N2 – LRPT

Lançado em 2014, o satélite MeteorM N2 é o último satélite meteorológico russo de órbita polar. Ele transmite seis canais do sensor radiômetro MSU-MR no formato HRPT (*High Resolution Picture Transmission*), em 1,7GHz. Entretanto, juntamente com o sinal HRPT é transmitido o sinal LRPT na frequência principal de 137,1 MHz e na secundária de 137,9 MHz. Por convenção, o sinal LRPT transmite apenas 3 canais do sensor radiômetro. Atualmente, durante o dia, são selecionados automaticamente os canais 1, 2 e 5. Durante a noite, o satélite desliga os dois primeiros canais e somente no canal 5 pode-se obter informação visual de imagem IR. Dos seis canais disponíveis, três são selecionados e comprimidos por um algoritmo JPEG para criar a estrutura do pacote no qual é digitalmente transmitido numa taxa preestabelecida de 72 ou 80k Símbolos/segundo. Após, o sinal LRPT é modulado em QPSK e transmitido com polarização circular para as estações terrestres. Atualmente, somente a frequência de 137,9 MHz está operacional, com taxa de 72kbps. A Tabela II apresenta as resoluções espectrais de cada canal do radiômetro. Os detalhes sobre o tratamento de dados do MSU-MR podem ser encontrados em [4].

TABELA II. CANAIS E COMPRIMENTOS DE ONDA DO SENSOR MSU-MR A BORDO DO SATÉLITE METEORM N2.

Canais MSU-MR	Resolução Espectral (µm)	Resolução Espacial em nadir
1 – visível (VIS)	0,5 – 0,7	1km (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	

Ambas as imagens APT e LRPT possuem a mesma resolução radiométrica de 8 bits e compartilham muitas aplicações em comum. De acordo com [2], imagens obtidas por estes radiômetros são usadas para detecção de nuvens, de neve, gelo, focos de incêndio, e temperatura da superfície da Terra.

II. DESCRIÇÃO DO HARDWARE

A estrutura da estação receptora proposta é composta por uma antena QFH, o RDS (RTL-SDR) e um computador pessoal, como ilustra a Figura 1.

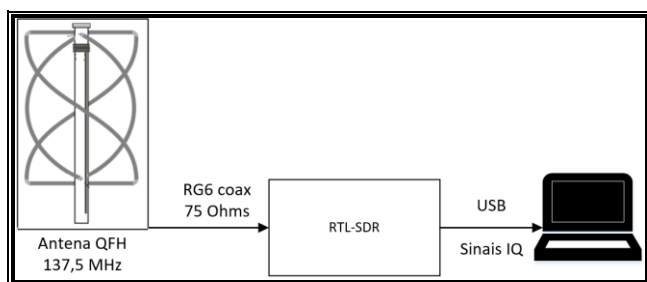


Fig. 1. Diagrama de blocos da estação proposta.

A antena QFH compõe o *front end* do sistema, a qual recebe o sinal RF do satélite e alimenta o rádio RTL-SDR para executar

a filtragem e amostragem do sinal convertendo-o em sinais IQ (*In-phase and Quadrature*). Todo o processamento de demodulação e extração da imagem é realizado por um computador pessoal rodando o sistema operacional Ubuntu 14.

A. Construção da Antena QFH

A QFH é uma antena omnidirecional quadrifilar de meia espira e meio comprimento de onda [7]. De um modo geral, é composta de quatro elementos, podendo ser interpretados como dois bifilares ortogonais em quadratura de fase, onde um bifilar é uma helicoidal de dois elementos. Como a antena é um sistema balanceado e o cabo coaxial é um sistema desbalanceado, foi criado um balun infinito para o casamento de impedância.

As dimensões e comprimentos foram projetados para a banda VHF com frequência central em 137,5 MHz de acordo com [8]. Os materiais utilizados foram canos de PCV de 50mm e 20mm, cabo coaxial RG6 75Ω 95% de malha e conectores do tipo F. A Figura 2 apresenta o resultado da construção da antena.



Fig. 2. Antena QFH construída.

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 é 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 deve ser o menor possível. De acordo com a Figura 3, para a frequência de 137,63 MHz obteve-se um valor S11 aproximado de 11,13 dB. E para a frequência alvo de 137,5 MHz, S11 aproximado foi de 10,8 dB. A partir destes dados, a potência refletida de volta para o analisador de rede é em torno de 9% e provavelmente uma perda entre 5 e 10% existe devido as conexões, conectores e a resistividade do cabo coaxial. Portanto, a antena possui uma eficiência entre 81% e 86%.

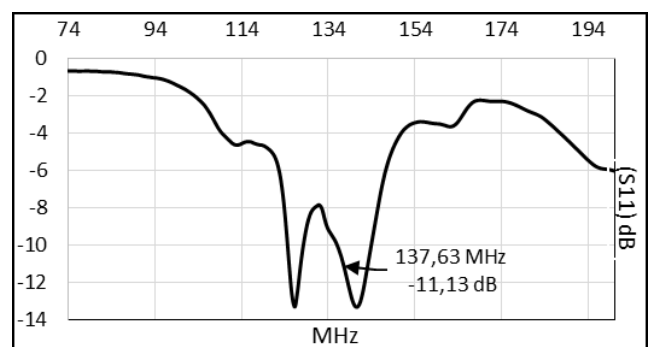


Fig. 3. Resposta em frequência da antena QFH - Curva de reflexão do coeficiente S11.

B. O Rádio RTL-SDR

O rádio RTL-SDR é um *dongle* USB de baixo custo (menos de \$20 dólares) [10] originalmente projetado para ser um receptor DVB-T de TV digital. Entretanto, este pequeno dispositivo também pode ser utilizado como um RDS genérico [13]. Por meio da sua programação, é possível habilitar o “modo teste” do chip RTL2832U e desviar o fluxo de dados do decodificador MPEG para a saída. Assim, o dispositivo poderia atuar como um receptor para o desenvolvimento de aplicações diversas tais como, recepção de sinais FM/AM, GNSS, ADS-B, entre outros.

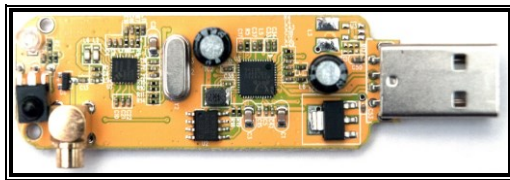


Fig. 4. PCB interna do rádio RTL-SDR.

III. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

O sistema tem o objetivo de fornecer uma solução simples para a decodificação de imagens APT e LRPT. A descrição do funcionamento das etapas executadas em software podem ser resumidas em:

- 1) Atualização dos arquivos TLE (*Two-Line Elements*) e rastreamento dos satélites no programa *Gpredict*;
- 2) Execução do código na plataforma GRC para o recebimento e demodulação do sinal de RF;
- 3) LRPT: demodulação para a geração de um arquivo de símbolos da constelação QPSK no formato “.s”;
- 4) APT: demodulação para a geração de um arquivo “.dat” com valores das magnitudes do sinal AM;
- 5) Decodificação e geração das imagens a partir dos arquivos de símbolos (LRPT) e das magnitudes do sinal AM (APT).

A. Rastreamento de Satélites

O programa de rastreamento de satélites utilizado neste trabalho foi o *Gpredict* que é gratuito e de código aberto [9]. Baseado em algoritmos do modelo de perturbação de órbitas SGP4, o programa é compatível com os arquivos TLE que contém os elementos keplerianos de todos os satélites artificiais operacionais disponibilizados pela *CelesTrak* [11].

Os dados do rastreamento utilizados pela estação são o azimute, máxima inclinação, data e hora da passagem de cada satélite, obtendo assim, uma única imagem por recepção.

B. Implementação em GNU Radio

O *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 [12]. A estrutura do *GNU Radio* é dividida em dois níveis. Todas as funções de performance críticas são implementadas em C++, enquanto que a organização, controle e conexão entre blocos são implementadas em Python. A interface gráfica utilizada neste trabalho, *GNU Radio Companion*, é um ambiente de programação que permite uma implementação modular de sistemas sem a necessidade de escrita em código Python.

O algoritmo implementado para a demodulação e decodificação de imagens APT é brevemente explicado nos itens a seguir. Os diagramas de blocos APT e LRPT da plataforma do GRC podem ser encontrados em [17].

- 1) Leitura das amostras IQ enviadas pelo RTL-SDR: o bloco de processamento do GRC *RTL-SDR Source* configura a frequência central, ganho e taxa de amostragem.
- 2) Filtragem passa-baixa com frequência de corte de 34 kHz.
- 3) Demodulação FM.
- 4) Filtragem passa-banda entre 500Hz e 4200Hz realizada pelo bloco do GRC *Band Pass Filter*.
- 5) Detecção de amplitude da subportadora (demod. AM): o bloco *Rational Resampler* converte a taxa de amostragem para 9,6k amostras por segundo, fazendo a subportadora (2,4 kHz) possuir 4 amostras por período. Portanto, duas amostras consecutivas possuem uma diferença de fase de 90° entre elas. A amplitude da subportadora é calculada pelo bloco *Complex to Mag* entre duas amostras consecutivas. Por fim, o sinal é convertido para 4160 amostras por segundo que é a taxa de símbolos APT.
- 6) Criação do arquivo no formato “.dat” contendo valores inteiros de 8 bits da amplitude do sinal;
- 7) Criação da imagem com o cálculo da matriz transposta obtida a partir da leitura dos valores do arquivo “.dat”.

Diferentemente do APT, o algoritmo de demodulação QPSK grava os símbolos da demodulação num arquivo temporário de *soft-symbols* para ser lido por um programa externo chamado *LRPTOfflineDecoder* [15], como mostra a Figura 5. Este programa executa a decodificação dos canais LRPT disponíveis. A função do algoritmo em GRC portanto, é a demodulação QPSK e extração dos *soft-symbols*, como é detalhado nas seguintes etapas:

- 1) Leitura das amostras IQ enviadas pelo RTL-SDR com o bloco *RTL-SDR Source*.
- 2) Decimação do sinal para uma taxa de 156,25k amostras por segundo utilizando o bloco *Rational Resampler*.
- 3) Estabilização do sinal de entrada usando o bloco AGC (*Automatic Gain Control*). Este bloco multiplica o sinal com o valor configurado em *Rate* para que o mesmo se mantenha em um nível constante.
- 4) Aplicação do filtro RRC (*Root Raised Cosine Filter*) que é otimizado para modulações PSK. As entradas do bloco taxa de símbolos (72k) e Alpha (0,6) são fornecidas pela especificação do sinal LRPT.
- 5) Um bloco de *Costas Loop* de quarta ordem foi utilizado para a sincronização com a onda portadora.
- 6) Sincronização das amostras com o *clock* usando o bloco *Clock Recovery MM*.
- 7) Decodificação dos pontos da constelação QPSK para *soft-symbols* por meio do bloco *Constellation Soft Decoder*.

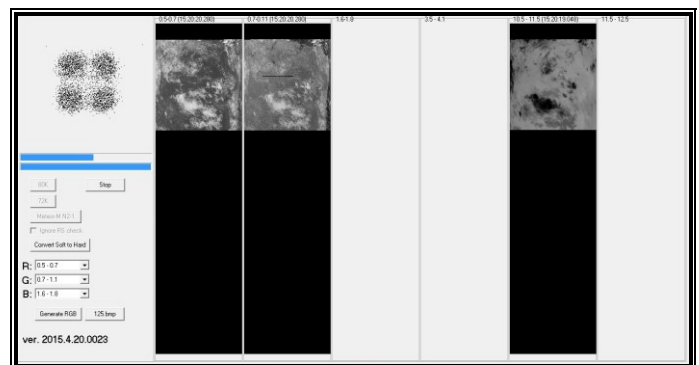


Fig. 5. Programa *LRPTOfflineDecoder* de decodificação dos três canais do sinal LRPT. Imagem em alta resolução disponível em <https://goo.gl/p6Cv24>.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Diversos testes de campo foram realizados na cidade de Santa Maria – RS, durante o ano de 2016. Foram decodificadas 10 imagens APT dos três satélites operacionais NOAA, e 8 imagens LRPT do satélite MeteorM N2, totalizando 18 recepções. Os satélites que passaram com inclinações menores que 15° foram descartados devido à baixa razão sinal ruído (SNR) no receptor. Observou-se que quanto maior a inclinação da passagem do satélite maior o tempo de recepção, e portanto, maior cobertura geográfica na imagem obtida. Um sinal recebido com SNR igual ou maior que 20 dB resultou em boa qualidade do sinal sem presença de erros para ambos os sinais APT e LRPT. Do mesmo modo, observou-se uma baixa SNR em ambos os sinais quando o satélite aparece no horizonte (*AoS*) e quando desaparece no horizonte (*EoS*). Ao longo da passagem, quando a elevação do satélite aumenta, a SNR também aumenta, podendo alcançar valores maiores que 30 dB para uma inclinação maior que 80° . Este efeito da aproximação e afastamento do satélite pode ser observado por meio da presença de ruído nas extremidades superiores e inferiores da imagem APT da Figura 6. Já nas imagens LRPT, ocorre um atraso no *phase-lock* do bloco Costas Loop do algoritmo do *GNU Radio* para a recuperação da fase do sinal modulado, o que resulta em uma imagem com menor área útil de cobertura geográfica.

O sinal APT é influenciado por dois fatores: o desvio na transmissão e o efeito Doppler [2]. Este último provoca um deslocamento na frequência de ± 4 kHz ao longo da passagem do satélite sobre a estação. Esta variação é adicionada ou subtraída da subportadora de 2,4 kHz, e como o demodulador não corrige este deslocamento, a imagem apresenta uma curvatura como o da Figura 6. Pelos menos duas soluções foram encontradas para corrigir este efeito. A primeira, é a utilização de um circuito PLL que corrige os deslocamentos da fase do sinal em tempo real, e a segunda é por meio de um pós-processamento da imagem utilizando o sinal de *syncA* e *syncB* do formato APT. A segunda solução é detalhada no trabalho [6], gerando um resultado semelhante ao da Figura 7.

O mesmo não ocorre nas imagens LRPT, pois por ser uma transmissão digital, o algoritmo demodulador utiliza o bloco de Costas Loop para compensar os deslocamentos de fase do sinal, conforme detalhado em [16].

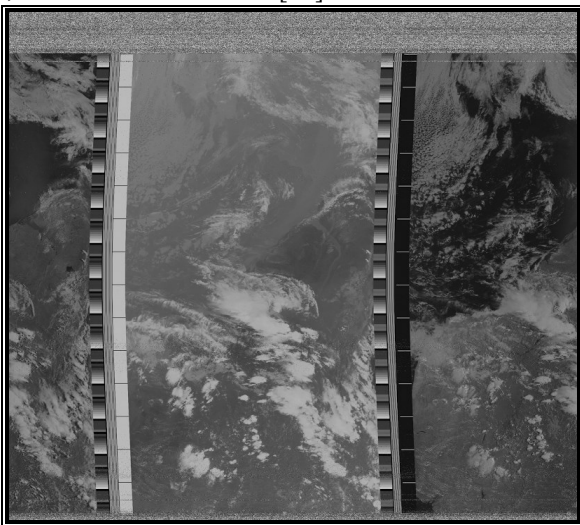


Fig. 6. Imagem bruta do satélite NOAA-19 obtida em 25 de novembro de 2016 pela estação receptora proposta.

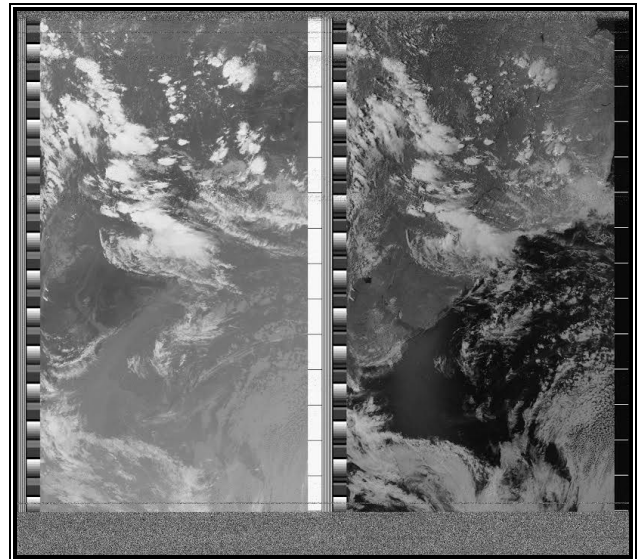


Fig. 7. Mesma imagem da Figura 6, porém com correção do efeito Doppler, girada em 180° com ajuste de contraste.

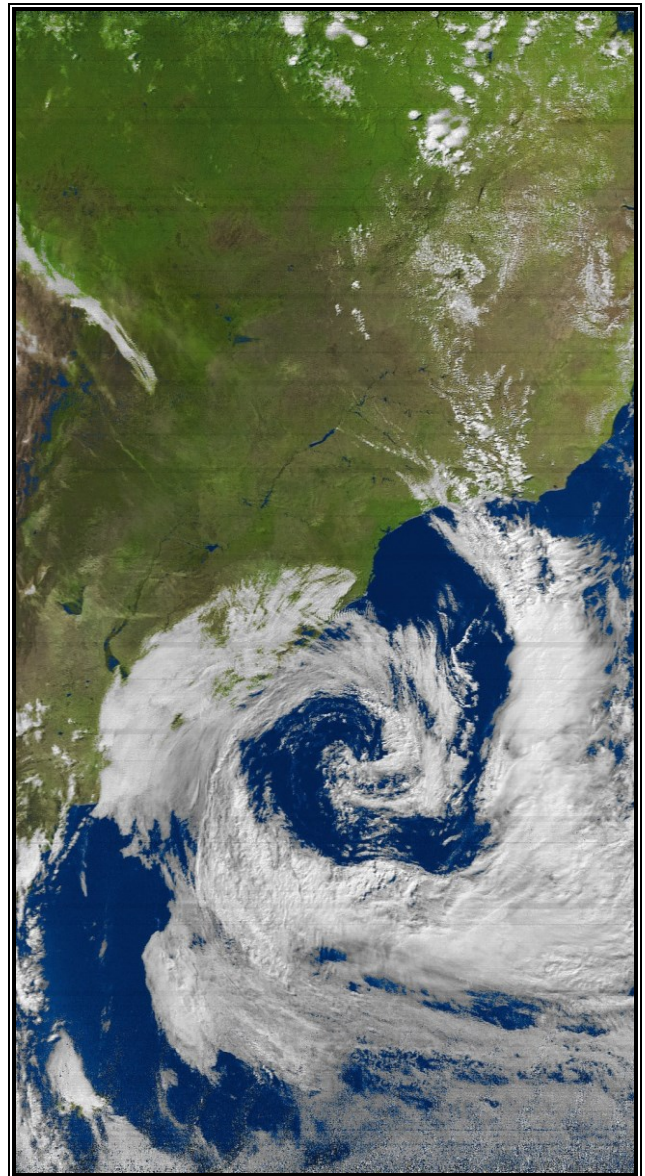


Fig. 8. Imagem APT *false color* do ciclone extratropical do dia 07 de setembro de 2016 colorida pelo programa WXtoImg [17].

A imagem da Figura 8 é o resultado da recepção, na estação proposta, de uma imagem APT *false color* com correção de efeito Doppler. Nela pode-se observar a presença de um ciclone extratropical na costa sul entre o Uruguai e o Brasil. As Figuras 9, 10 e 11 são, respectivamente, o resultado da recepção das imagens LRPT do canal 1, canal 2 e uma composição RGB122 *false color* que combina estes canais no modelo de cores RGB (*red, green, blue*).

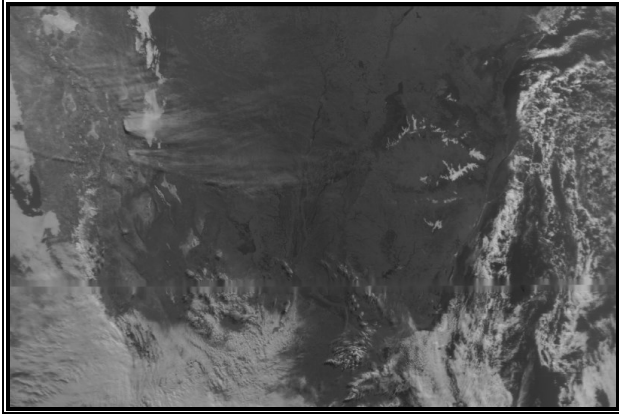


Fig. 9. Imagem LRPT canal 1 do dia 01 de maio de 2016.

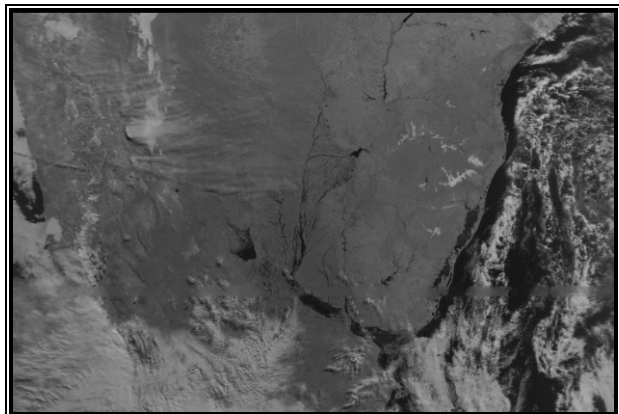


Fig. 10. Imagem LRPT canal 2 do dia 01 de maio de 2016.

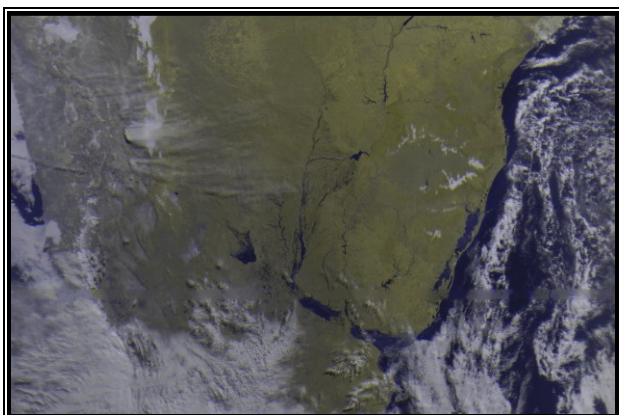


Fig. 11. Composição RGB122 *false color* dos canais 1 e 2.

V. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho mostrou como se implementar uma estação terrestre receptora de imagens APT e LRPT utilizando programas gratuitos. Uma antena QFH foi construída com

materiais de fácil acesso baseada em projetos conhecidos e disponibilizados por pesquisadores da área. O projeto da antena atendeu as necessidades de recepção de ambos os tipos de imagens consideradas neste trabalho.

Futuramente, o sinal de imagens APT deve ser definitivamente substituído pela transmissão digital LRPT de imagens de baixas resoluções. Felizmente, a tecnologia de rádio definido por software permite uma fácil reconfiguração dos algoritmos por possuir esta característica reprogramável.

Como melhorias futuras, sugere-se a construção de uma antena rastreadora com controle automático de azimute e elevação. Desta maneira, o tempo de recepção de sinal seria maior, podendo cobrir uma maior área geográfica na imagem. Outro aspecto a ser estudado, e complementar a este trabalho, é a minimização dos ruídos presentes na recepção das imagens LRPT. Em alguns casos, os ruídos causam defeitos visuais nas imagens e prejudicam a análise visual da mesma.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Paul Menzel, *Remote sensing applications with meteorological satellites*. NOAA Satellite and Information Service University of Wisconsin, 2006.
- [2] NOAA, (Abril 2017), *User's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations*, <https://goo.gl/4IpCy8>
- [3] P. V. Dascal, P. Dolea, O. Cristea, T. Palade. *LRPT Weather Satellite Image Acquisition Using a SDR-Based Reception System*, Acta Technica Napocensis Electronics and Telecommunications, v. 56, nº 2, 2015.
- [4] SRC Planeta, (Abril 2017), "Meteor-M" №2: *detailed structure of MSUMR instrument signal*, <https://goo.gl/INOoZR>
- [5] R. A. Espinet. *Receiving the Meteor-M N2 LRPT Downlink with an RTL-SDR Dongle*. The GEO Quarterly - Group for Earth Observation, [S.l.], n.44, p.6–12, 2014
- [6] C. Patil, T. Chavan, M. Chaudhari. *Hardware and Software Implementation of Weather Satellite Imaging Earth Station*, 2016, International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Jaipur, 2016, pp. 664-670.
- [7] D.C. Santiago. "Projeto de uma antena quadrifilar de meia espira e meio comprimento de onda" Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.
- [8] C. v. Lint. *A Portable, Collapsible QFH Antenna for the 137 MHz Band*. The GEO Quarterly - Group for Earth Observation, n.1, p.46–48, 2004.
- [9] Gpredict (Abril 2017), <http://gpredict.oz9aec.net/>
- [10] Amazon (Abril 2017), <https://goo.gl/el06sA>
- [11] Celestrak (Abril 2017), *NORAD Two-Line Element Sets*, <https://www.celestrak.com/>
- [12] E. Blossom. *GNU Radio: Tools for exploring the radio frequency spectrum*. Linux Journal, 2004.
- [13] R. W. Stewart, K. W. Barlee, D. S. W. Atkinson, L. H. Crockett. *Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*, 2015, 1st edition.
- [14] K. Vachhani, R. A. Mallari. *Experimental study on wide band fm receiver using gnuradio and rtl-sdr*. In Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2015 International Conference on, pages 1810–1814.
- [15] MeteorM N2, (Abril 2017), *News and support*. <http://meteor.robonuka.ru/for-experts/soft/>
- [16] A. Priya, N. Rajesh, R. Muthaiah, *Carrier Synchronization in Software Defined Radio using Costas Loop*, Indian Journal of Science & Technology. Vol. 6, Issue 6, 2013.
- [17] R. D. Flores, (Junho 2017) *Imagens GRC - APT e LRPT decoders*, <https://sites.google.com/site/rodrigoflores/research>.
- [18] WXtoImg (Abril 2017), *Software to decode APT and WEFAX signals from weather satellites*, <http://www.wxtoimg.com>