

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**ALEXANDRE ALLI PEREIRA**

**FRAMEWORK PARA ANÁLISE DE  
ARQUITETURA DE SENSORIAMENTO  
REMOTO ÓPTICO**

Trabalho de Graduação  
2019

**Curso de Engenharia Aeroespacial**

**ALEXANDRE ALLI PEREIRA**

**FRAMEWORK PARA ANÁLISE DE  
ARQUITETURA DE SENSORIAMENTO  
REMOTO ÓPTICO**

Orientador

Prof. Me. Pedro Kukulka de Albuquerque (ITA)

Coorientador

Prof. Dr. Luis Eduardo Vergueiro Loures da Costa (ITA)

**ENGENHARIA AEROESPACIAL**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2019

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Pereira, Alexandre A.  
Framework para Análise de Arquitetura de Sensoriamento Remoto Óptico / Alexandre Alli Pereira.  
São José dos Campos, 2019.  
Número de Folhas 73f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Aeroespacial – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2019.  
Orientador: Prof. Pedro Kukulka de Albuquerque, Coorientador: Prof. Dr. Luis Eduardo Vergueiro Loures da Costa.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Design de Missões Espaciais. 3. Características de Alvos. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Framework para Análise de Arquitetura de Sensoriamento Remoto Óptico

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

PEREIRA, Alexandre Alli. **FRAMEWORK PARA ANÁLISE DE ARQUITETURA DE SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO**. 2019. 73f. Total de folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeroespacial) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

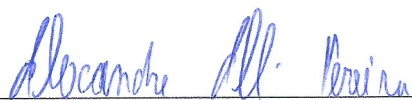
## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Alexandre Alli Pereira

TÍTULO DO TRABALHO: Framework para Análise de Arquitetura de Sensoriamento Remoto Óptico

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação/2019

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).



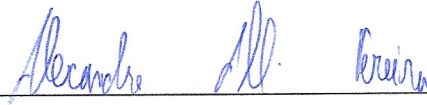
Alexandre Alli Pereira

Rua H9A, nro 1, apt 304, Campus do CTA

CEP: 12228-610, São José dos Campos - SP

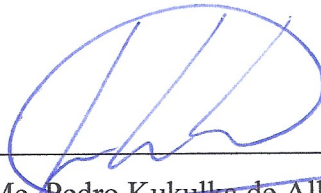
# FRAMEWORK PARA ANÁLISE DE ARQUITETURA DE SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



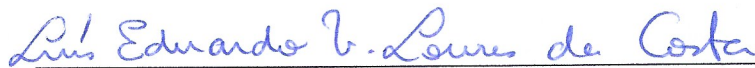
Alexandre Alli Pereira

Autor



Prof. Me. Pedro Kukulka de Albuquerque (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Luis Eduardo Vergueiro Loures da Costa (ITA)

Coorientador



Prof. Dra Cristiane Aparecida Martins

Coordenadora do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, 14 de novembro de 2019

Dedico este trabalho a todos os  
profissionais que se dedicam a  
transformar projetos em realidades.

## **Agradecimentos**

Agradeço à Deus por permitir capacitar-me a realizar todas as minhas aspirações.

Aos meus amados pais e irmã, à minha amada esposa, toda minha família, sem seus suportes não teria conseguido chegar até aqui. Obrigado por tudo!

Agradeço a todos os mestres que tanto me ensinaram ao longo dessa singradura do curso de engenharia Aeroespacial, mas em especial ao Professor Luis Eduardo Vergueiro Loures da Costa, por crer incansavelmente no meu trabalho; ao Major Pedro Kukulka de Albuquerque, pelo exemplo de competência técnica e dedicação em tudo que se propôs a fazer e; ao Professor Armando Ramos Gouveia, pelas várias orientações que foram pertinentes para muito além das aplicações em sala de aula.

Ao ITA, a receptividade para com os alunos de graduação da Marinha do Brasil foi fundamental para que pudesse desenvolver o melhor das minhas capacidades. Ao Centro de Coordenação de Estudos da Marinha em São Paulo, agradeço o apoio incondicional na administração da carreira durante a graduação.

Finalmente, agradeço a oportunidade indelével de cursar o ITA - já como oficial de carreira - à Marinha do Brasil e à Força Aérea. Muito obrigado!

*"Fazer o que acredita e acreditar no que faz".*

(Autor desconhecido)

## Resumo

É ponto pacífico nas diversas literaturas acerca de sistemas espaciais que os processos de concepção, implantação, operação e descarte são ao mesmo tempo interativos e iterativos. Nesse sentido, as soluções de compromisso estão presentes em cada decisão sobre as características de um satélite. A proposta deste trabalho é fornecer um passo-a-passo para avaliar requisitos de alto e médio nível em missões espaciais de imageamento da Terra. Cada escolha de requisito será fundamentada pela conjugação e análise da literatura pertinente sobre sistemas ópticos satelitais e sobre *design* de missões espaciais.



## **Abstract**

It is a commonsense assumption in many literatures about space systems that the processes of conception, implementation, operation and disposal are interactive and iterative at the same time. In this sense, trades are present in each decision about the characteristics of a satellite. The purpose of this work is to provide a step-by-step path to evaluate high and medium level requirements in Earth's imaging space missions. Each requirement choice will be based on the conjugation and analysis of the relevant literature on satellite optical systems and on space mission design.

## Lista de Abreviaturas e Siglas

|        |                                                                       |
|--------|-----------------------------------------------------------------------|
| AEB    | Agência Espacial Brasileira                                           |
| ECSS   | <i>European Cooperation for Space Standardization</i>                 |
| EOS    | <i>Earth Observing System</i>                                         |
| EIFOV  | <i>Effective Instantaneous Field of View</i>                          |
| ESA    | <i>European Space Agency</i>                                          |
| ESI    | <i>European Space Imaging</i>                                         |
| FAS    | <i>Federation of American Scientists</i>                              |
| IGFOV  | <i>Instantaneous Geometric Field of View</i>                          |
| ITA    | Instituto Tecnológico de Aeronáutica                                  |
| MIR    | <i>Medium Infrared</i>                                                |
| MTF    | <i>Modulation Transfer Function</i>                                   |
| MODIS  | <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>                  |
| NASA   | <i>National Aeronautics and Space Administration</i>                  |
| NIIRS  | <i>National Image Interpretation Rating Scales</i>                    |
| NIR    | <i>Near Infrared</i>                                                  |
| PDD    | <i>Payload Definition Document</i>                                    |
| RAIFOV | <i>Radiometrically Accurate Instantaneous Geometric Field of View</i> |
| RFI    | <i>Request for Information</i>                                        |
| RTLI   | Requisitos Técnicos, Logísticos e Industriais                         |

|         |                                                                                         |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| SMAD    | <i>Space Mission Analysis and Design</i>                                                |
| SIC     | <i>Satellite Imaging Corporation</i>                                                    |
| SIMBIOS | <i>Sensor Intercomparison for Marine Biological and Interdisciplinary Ocean Studies</i> |
| UNOOSA  | <i>United Nations Office for Outer Space Affairs</i>                                    |
| UCS     | <i>Union of Concerned Scientist</i>                                                     |
| USGS    | <i>United States Geological Service</i>                                                 |

## Sumário

|            |                                                                               |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                       | <b>14</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Motivação .....</b>                                                        | <b>14</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Escopo .....</b>                                                           | <b>15</b> |
| 1.2.1      | Justificativa .....                                                           | 16        |
| <b>1.3</b> | <b>Problemática .....</b>                                                     | <b>17</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Objetivo .....</b>                                                         | <b>21</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                            | <b>22</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Considerações sobre as bibliografias em <i>design</i> de missões .....</b> | <b>23</b> |
| <b>3</b>   | <b>PRIMEIROS PASSOS .....</b>                                                 | <b>25</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Chamadas .....</b>                                                         | <b>26</b> |
| 3.1.1      | Considerações sobre as chamadas .....                                         | 27        |
| <b>3.2</b> | <b>Temas de interesse frequente.....</b>                                      | <b>29</b> |
| <b>4</b>   | <b>ALVOS .....</b>                                                            | <b>30</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Visão geral .....</b>                                                      | <b>30</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Alvos de interesse frequente .....</b>                                     | <b>33</b> |
| 4.2.1      | Vegetação .....                                                               | 36        |
| 4.2.2      | Água .....                                                                    | 41        |
| 4.2.3      | Outros alvos frequentes .....                                                 | 45        |
| <b>5</b>   | <b>SENSORES .....</b>                                                         | <b>49</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Domínios .....</b>                                                         | <b>50</b> |
| 5.1.1      | Resolução espacial.....                                                       | 50        |
| 5.1.2      | Resolução espectral .....                                                     | 53        |
| 5.1.3      | Resolução radiométrica .....                                                  | 55        |
| 5.1.4      | Resolução temporal .....                                                      | 55        |
| 5.1.5      | Exemplos de <i>trade-offs</i> entre domínios .....                            | 56        |
| <b>5.2</b> | <b>Critérios para avaliação de performance.....</b>                           | <b>56</b> |
| 5.2.1      | O critério NIIRS .....                                                        | 57        |
| 5.2.2      | O critério de Johnson.....                                                    | 59        |
| 5.2.3      | Relação entre os critérios NIIRS e de Johnson .....                           | 60        |
| 5.2.4      | Avaliação de sensores como critério .....                                     | 61        |

|            |                                                            |           |
|------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6</b>   | <b>INTERAÇÕES PÓS DEFINIÇÃO DA CARGA ÚTIL.....</b>         | <b>63</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Valores iniciais para iterações .....</b>               | <b>64</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Tabela de ações .....</b>                               | <b>67</b> |
| <b>7</b>   | <b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....</b>                         | <b>70</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                   | <b>72</b> |
|            | <b>ANEXO A – EXEMPLO DE <i>MISSION STATEMENT</i> .....</b> | <b>74</b> |

# 1 Introdução

Uma das tarefas mais complexas em termos de missões espaciais é interpretar o efeito desejado pelo *stakeholder*. Além disso, segundo o glossário da ECSS (1997, *apud* AGUIRRE, 2013, p. 6) – acrescido do patrocinador (LARSON; WERTZ, 1999, *apud* AGUIRRE, 2013, p. 6) –, as partes envolvidas numa missão espacial podem ser elencadas como: consumidor (usuário final), cliente (o desenvolvedor da missão), fornecedores e patrocinadores. Na prática, isso significa que capturar o produto da missão espacial depende de fatores e atores não desvinculados; uma vez que no espaço o satélite não pode mais ser modificado, – exceto em raras situações, como a do telescópio Hubble – as decisões de projeto devem ser tanto quanto possíveis sistematizadas pois, caso ocorra alguma falha, o gerente do projeto deve estar respaldado não apenas pelas justificativas das escolhas realizadas, mas também pela ordem com que executou suas tarefas.

## 1.1 Motivação

De acordo com dados da UNOOSA (2019, n. p.), apenas em 2018 foram lançados 430 objetos na órbita terrestre. A despeito do número elevado (o maior já registrado desde 1958), o processo de desconcentração da tecnologia da produção e lançamento de satélites é relativamente recente, vide o fato de que Estados Unidos e Rússia já lançaram mais satélites do que todos os demais países juntos nos últimos 60 anos (UNOOSA, 2019, n. p.).

Assim, a despeito da capacidade de outros países – como o próprio Brasil – de produzirem seus próprios satélites, apenas a continuidade das missões espaciais proverá a experiência necessária para independência técnica em todos os aspectos de uma missão espacial. Em outras palavras, pôr um satélite em órbita não compreende apenas o satélite em si, mas também, pelo menos, o segmento de solo e o lançamento do satélite. Assim, o desafio de toda e cada missão espacial é absolutamente multidisciplinar, requerendo a contribuição de especialistas de diversas áreas para seu sucesso (AGUIRRE, 2013, p. 115).

Nesse sentido, sendo necessário fomentar o segmento espacial no país, resta sistematizar processos, a fim de evitar que cada decisão no âmbito de uma dada missão espacial seja uma novidade ou, ainda, que a missão dependa de raros especialistas para

conduzi-la. Não raro, a falta de uma proposta clara para o escopo de uma missão espacial compromete todo seu desenvolvimento. Portanto, o documento comumente chamado de *Mission Statment* – primeiro documento a especificar a função do sistema espacial (AGUIRRE, 2013, p. 48) – deve ser corretamente apresentado pelo consumidor a fim de que o desenvolvedor da missão (em geral, a agência espacial) possa buscar as melhores soluções de projeto. O Anexo A deste trabalho traz uma versão rascunho do *Mission Statement* do programa SIMBIOS da NASA.

A motivação deste trabalho advém da situação prática em que o gerente (do projeto ou mesmo de um subsistema) se pergunta: “o que fazer agora?” ou “em qual ordem devo priorizar minhas soluções de compromisso?”.

## 1.2 Escopo

Missões espaciais podem ser categorizadas segundo diversos critérios, a exemplo de missões interplanetárias, missões de exploração da Terra, missões de comunicação etc. É imperioso, a fim de estabelecer (e alcançar) o objetivo deste trabalho, limitar as categorias em que se enquadra.

A classification of missions and spacecraft based solely on their image acquisition function is a difficult task. One possible grouping can be based on the imaging target. Thus, we could speak of earth-imaging missions and missions in which the imaging objects are other celestial bodies. However, even this simple taxonomy is not without problems. One difficulty is that some missions to the moon and other planets have also acquired images of the Earth. so, we must speak of missions whose primary objective has been to obtain earth images and those *fundamentally oriented* toward other celestial objects. The Landsat program falls in the first group and the Hubble Space Telescope in the second (SANCHEZ; CANTON, 2018, p. 107-108).

Missões como as do Landsat são classificadas pela NASA como *Mission to Planet Earth* e os satélites dessas missões são chamados *Earth Observing Systems* (EOS) (SANCHEZ; CANTON, 2018, p. 108).

Não obstante, qualquer missão tem um ciclo de vida, normalmente dividido em sete fases (ECSS, *apud* AGUIRRE, 2013, p. 13):

- Fase 0: identificação de necessidades, que estabelece os objetivos da missão e define funções a serem executadas;
- Fase A: viabilidade, que estabelece requisitos funcionais do sistema e conceito;
- Fase B: definição preliminar;
- Fase C: definição detalhada;
- Fase D: montagem e teste de fabricação;
- Fase E: lançamento e operações do sistema; e
- Fase F: descarte.

Portanto, embora boa parte deste trabalho tenha aplicabilidade em vários segmentos espaciais, seu escopo está limitado a: *Earth Observing Systems* (por sensores ópticos passivos), considerando as fases 0, A e B, ou seja, as fases anteriores à fase de implantação do sistema.

### **1.2.1 Justificativa**

Embora o escopo possa parecer restrito, dezenas de cargas úteis satelitais se encontram nesta categoria (QIAN, 2016, p. 92-94). Além disso, as fases iniciais do projeto são justamente as que devem ser mais revisadas, uma vez que a partir da Fase C (início da fase de implantação), os custos de cancelamento costumam ser mais altos do que a entrega da missão (PILLET; APARICIO; SANCHEZ, 2005, p. 8). Ainda que não incorram em cancelamento, mudanças de *design* nas fases finais do projeto acarretam custos maiores do que se concebidas nas fases iniciais, vide Figura 1.



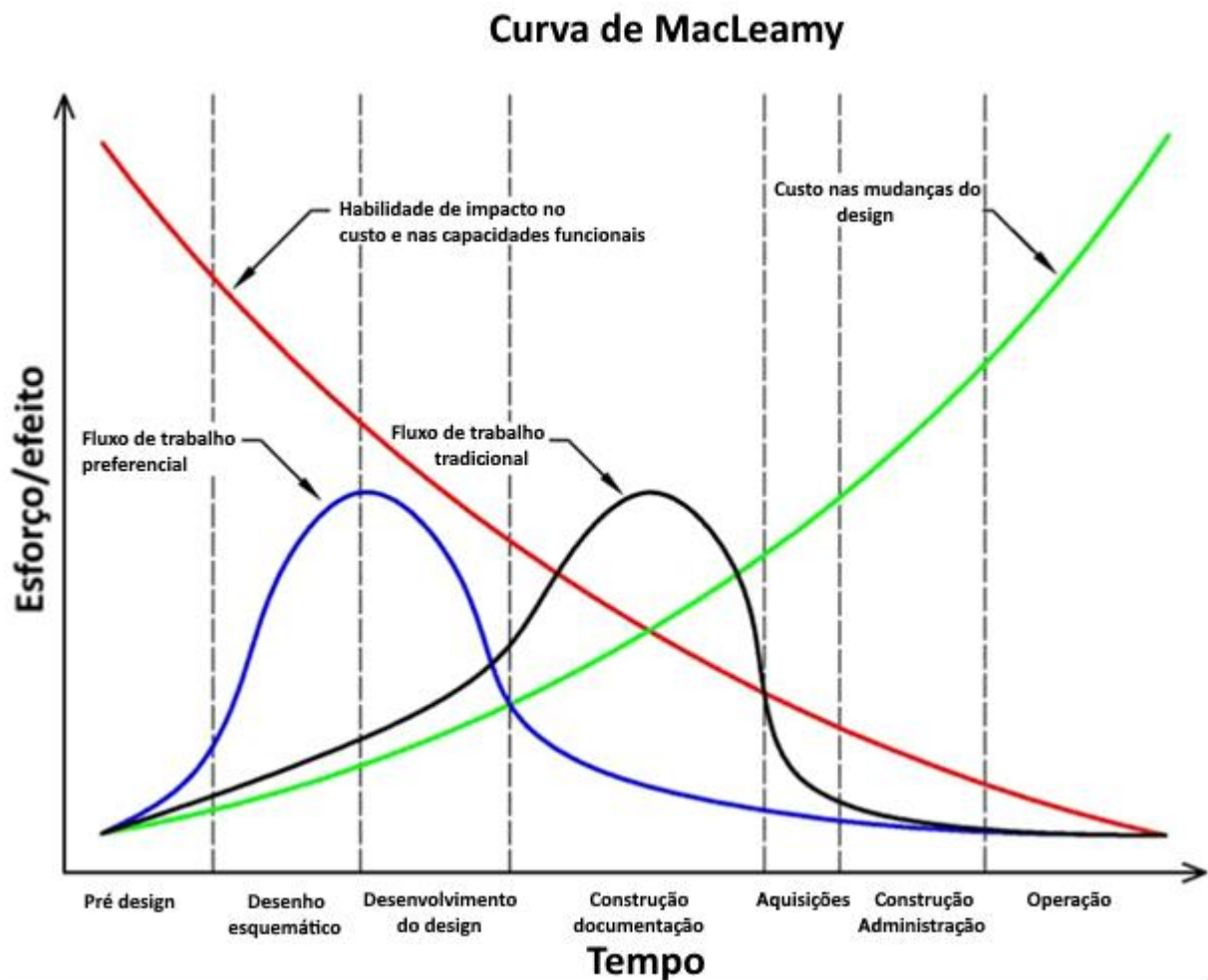


Figura 1 - Curva de MacLeamy. Alterações de projeto após a fase do Desenho Esquemático acarretam grandes custos para a relação esforço sobre efeito quando comparada à mesma relação nas fases iniciais (MACLEAMY *apud* DARIUSZ; ARKADIUSZ, 2017, adaptado).

Finalmente, um escopo mais restrito permite transitar em níveis de requisitos intermediários. Essa consideração é especialmente relevante porque, o gerente de projetos, enquanto na árdua tarefa da coordenação os esforços dos diversos subsistemas, precisa de capacidades multidisciplinares para fazê-la. Sendo assim, na medida em que os diversos subsistemas exigem conhecimentos muito específicos, estes podem escapar à atuação do gerente. Por outro lado, quanto menor o domínio do gerente sobre cada assunto, menor seu amparo quando tiver de priorizar alguma característica.

### 1.3 Problemática

Consideremos as figuras a seguir:

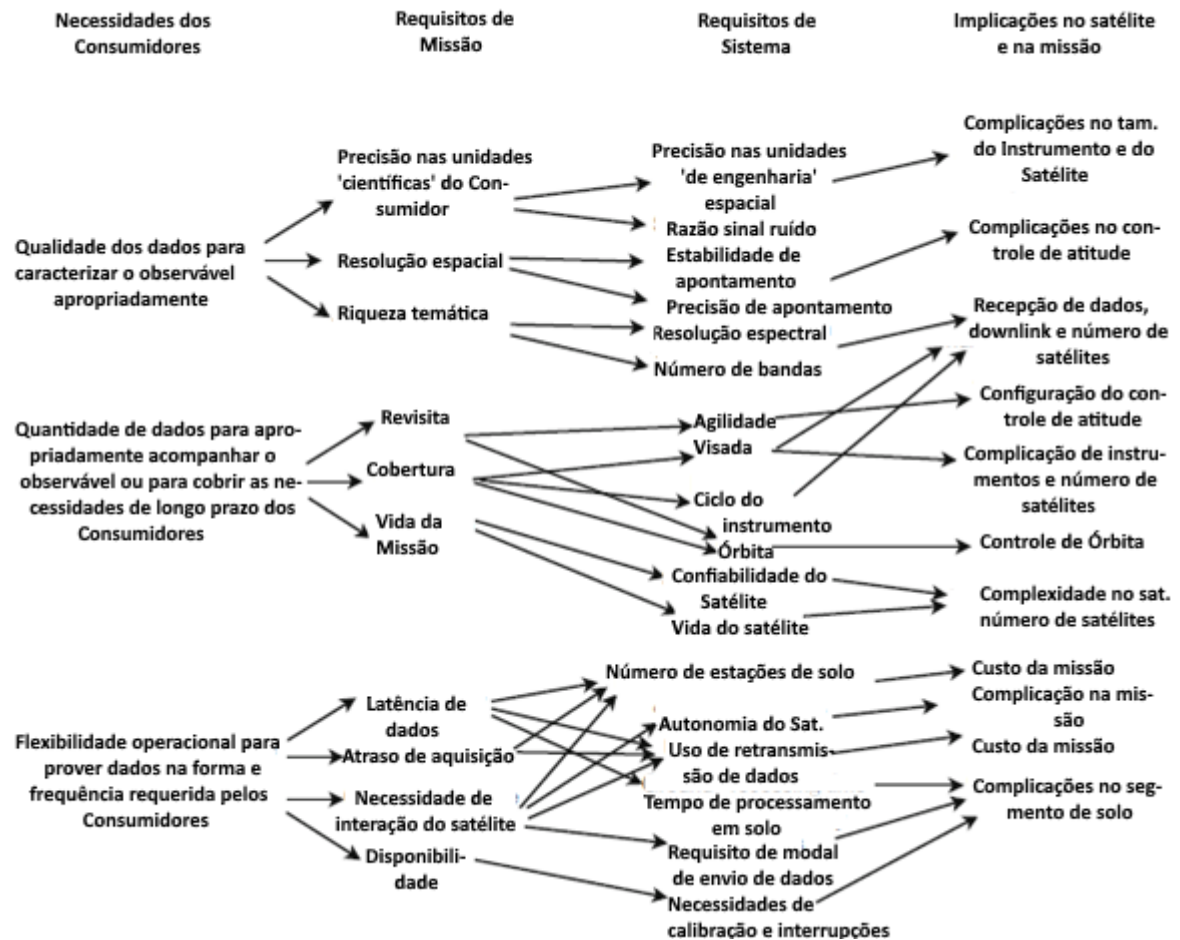


Figura 2 - Exemplo de cascata de requisitos de nível superior a inferior e resultantes. Implicações no satélite e na missão (AGUIRRE, 2013, p. 58, adaptado).

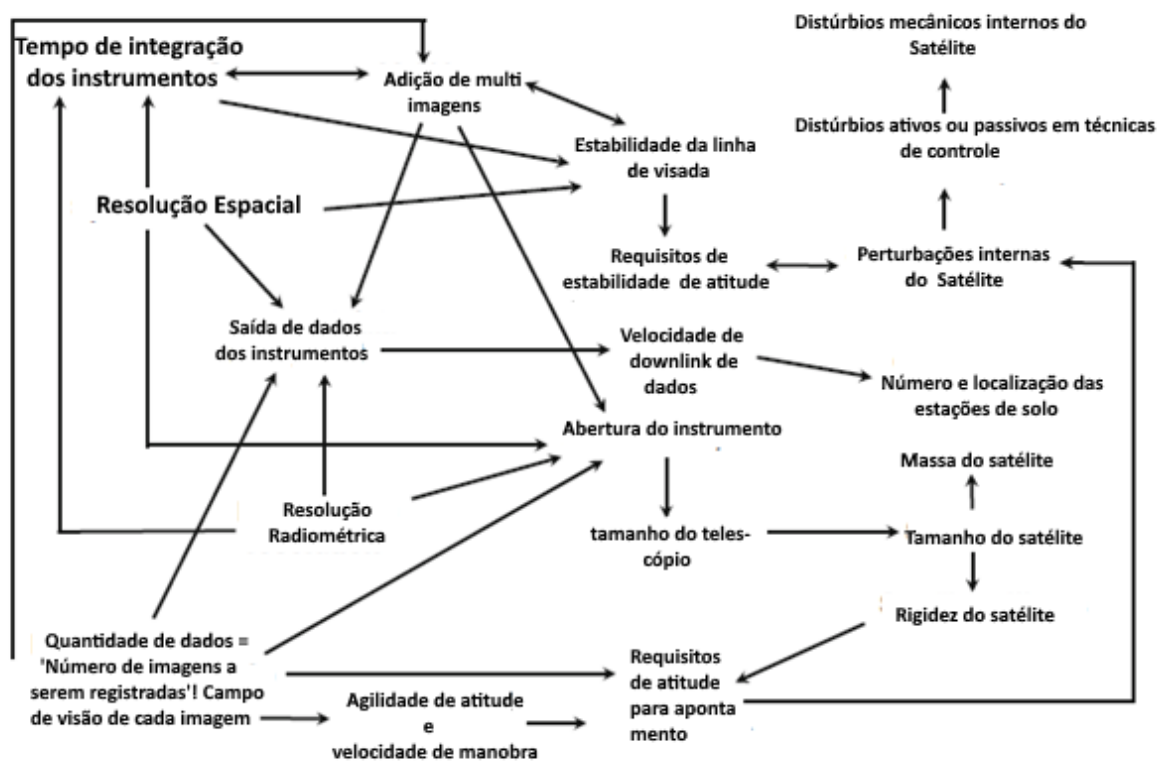


Figura 3 - Interrelação de requisitos. Necessidades do consumidor (negrito), requisitos derivados sobre: sistema (regular), instrumento (itálico) e atitude do satélite (sublinhado) (AGUIRRE, 2013, p. 170, adaptado).

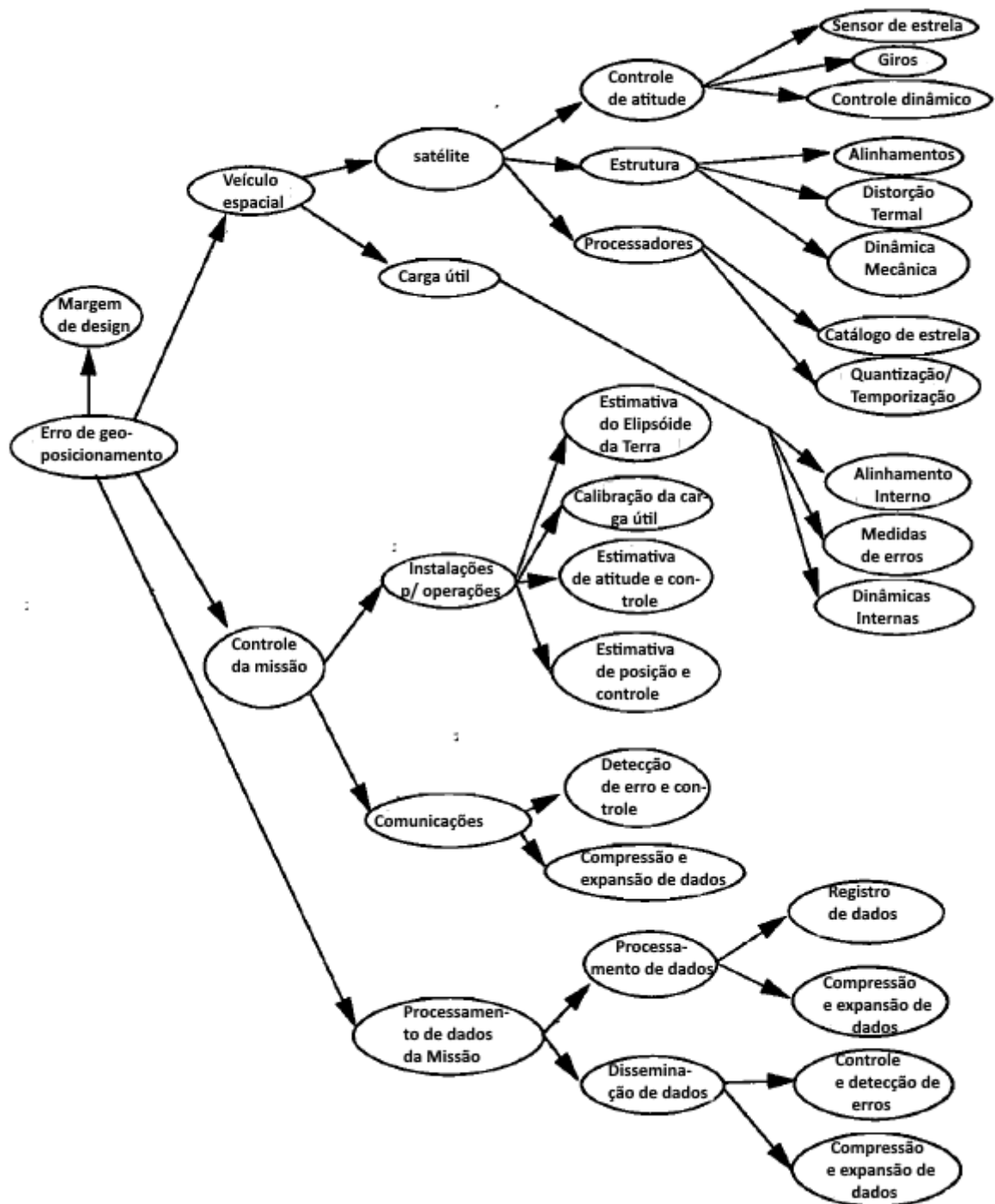


Figura 4 - Alocação de requisitos de missão através do design de componentes. É essencial compreender as fontes que contribuem para os requisitos de nível superior (LARSON; WERTZ, 1999, p. 81, adaptado).

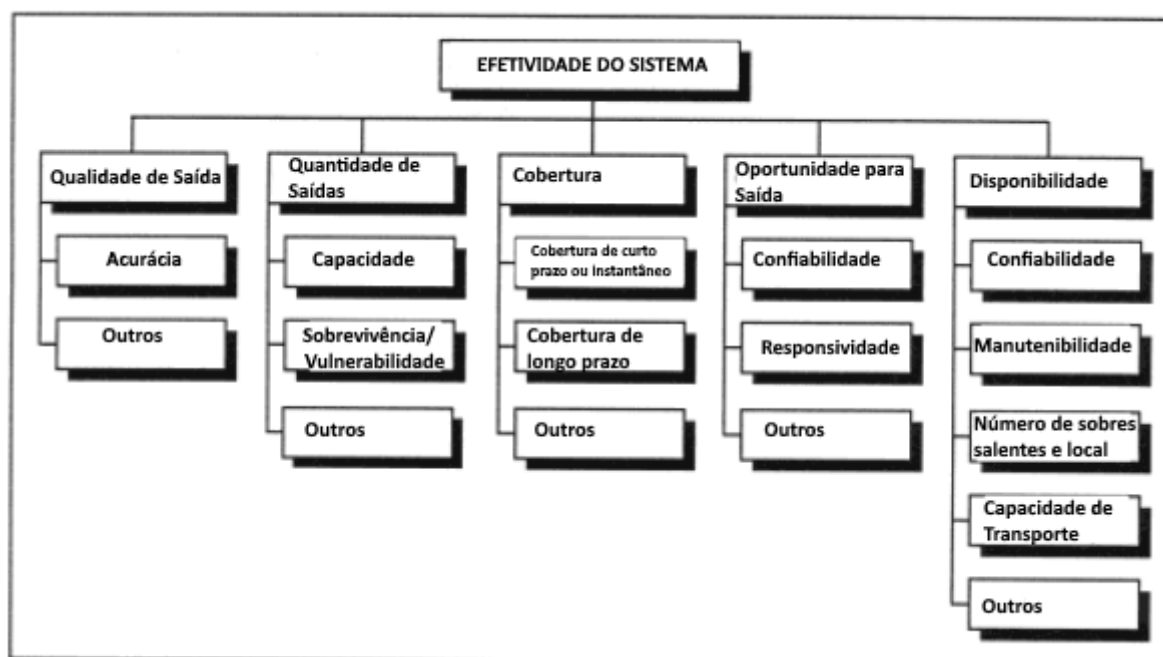


Figura 5 – Componentes de efetividade do sistema (NASA, 1995, p. 74, adaptado).

As figuras 2, 3, 4 e 5 são apenas alguns dos diagramas apresentados por autores de diferentes obras acerca da arquitetura e *design* de sistemas espaciais.

Cada figura oferece um panorama das diferentes abordagens de uma dada missão; contudo, a despeito do caráter lúdico de cada ilustração, existe uma dificuldade: como percorrer, na prática, esses diagramas?

Tanto os motivos da seção 1.1 quanto os problemas expostos na seção 1.3 são frutos de experiências do autor em situações de projetos reais.

## 1.4 Objetivo

Considerando o escopo da seção 1.2 e a problemática enunciada na seção 1.3, o objetivo deste trabalho é prover uma tabela com passos (justificados) para avaliar os requisitos necessários para uma missão espacial de imageamento. Como as variáveis de qualquer missão espacial são interdependentes, a avaliação dos requisitos principais deve ser uma prioridade para a engenharia de sistemas da missão.

## 2 Revisão Bibliográfica

Existem diversas bibliografias sobre arquitetura e *design* de missões espaciais. Contudo, é particularmente difícil organizá-las a ponto de reduzi-las a perguntas simples ao *stakeholder*. Isso ocorre porque ora a bibliografia lida com aspectos muito gerais (apesar de importantes para entender os *trades* básicos da missão), ora a bibliografia lida com aspectos muito especializados (importantes para definir os requisitos dos sensores, por exemplo).

No sentido de prover o fluxo lógico de tarefas e informações auxiliares às tomadas de decisão com respeito à concepção da missão espacial, serão utilizadas três referências principais: o livro *Introduction to Space Systems – Design and Synthesis* (AGUIRRE, 2013), o livro *Space Mission Analysis and Design* (LARSON; WERTZ, 1999) e o livro *Payload and Mission Definition in Space Sciences* (PILLET; APARICIO; SANCHEZ, 2005).

Enquanto os dois primeiros fornecem os parâmetros iniciais para qualquer missão, – sobretudo considerando missões espaciais da NASA – o terceiro fornece um passo-a-passo da elaboração de uma missão espacial científica sob a perspectiva da ESA. Mesmo para as fases preliminares, as referências citadas apresentam diferentes graus de aprofundamento para cada aspecto. Ressalte-se ainda que um dos autores do livro *Space Mission Analysis and Design*, James R. Wertz, é o editor chefe do livro *Introduction to Space Systems – Design and Synthesis*. Ou seja, apesar de propostas de apresentação de conteúdo diferentes, há forte influência deste sobre aquele.

Embora as três referências supracitadas sejam absolutamente relevantes nas fases iniciais de qualquer missão espacial, a quantidade de escolhas e soluções de compromisso (*trades*), quando desprovidas de experiência prática e técnica do gerente, podem levar a um sem número de hipóteses que mais confundem do que propriamente se apresentam como alternativas ao *stakeholder* e/ou cliente. Assim, é preciso limitar tanto quanto possível os requisitos segundo seus graus de importância logo nas primeiras fases da missão, a fim de não provocar a exploração de soluções de projeto desnecessárias.

Tal limitação de requisitos, no caso deste trabalho, se dará principalmente através da escolha da carga útil. Em outras palavras, a partir das prioridades do *stakeholder* e elaboração de documentos pertinentes (notadamente, o *Mission Statement* e o *Mission Requirements*

*Document* (AGUIRRE, 2013, p. 48)), a escolha dos sensores de imageamento será dada segundo parâmetros apresentados nas seguintes bibliografias: Sensoriamento Remoto do Ambiente (JENSEN, 2009), *Space Imaging Processing* (SANCHEZ; CANTON, 2018) e o *Building Earth Observation Cameras* (JOSEPH, 2015).

O livro Sensoriamento Remoto do Ambiente (JENSEN, 2009) fornece uma série assinaturas espectrais para diversos tipos de alvos na Terra. Já o *Space Imaging Processing* (SANCHEZ; CANTON, 2018) lida com as imagens fornecidas pelos satélites e os algoritmos utilizados para interpretá-las.

Finalmente, o livro *Building Earth Observation Cameras* (JOSEPH, 2015), além de trazer o critério estabelecido em 1958 por John Johnson para detecção, reconhecimento e identificação de alvos, traz também critérios objetivos para seleção de cargas úteis ópticas. Esse critério será utilizado para validação de algumas soluções de IGFOV, EIFOV e RAIFOV nos sensores de imageamento.

É importante constatar o porquê conjugar tantas literaturas na parte de imageamento: no caso de uma consulta por informações, *Request for Information* (RFI) e, principalmente, na elaboração dos Requisitos Técnicos, Logísticos e Industriais (RTL), o documento deve estar fundamentado segundo os requisitos da missão e não segundo as fabricantes dos sensores. Nesse sentido, especificações imprecisas podem incorrer em dezenas de sensores passíveis de atender aos requisitos e, portanto, é imprescindível entender e ponderar seus *trades*.

## 2.1 Considerações sobre as bibliografias em *design* de missões

Não é proposta deste trabalho substituir ou mesmo resumir quaisquer das bibliografias citadas na seção 2. Aliás, é recomendável a leitura das obras elencadas na referência para que o objetivo deste trabalho seja alcançado e/ou potencializado.

Outro aspecto relevante é que mesmo levando em conta as diversas bibliografias, a complexidade de um sistema, no âmbito de seus custos e sua dificuldade, é um parâmetro subjetivo, e não raro o passado não é um bom guia para o futuro (AGUIRRE, 2013, p. 123).

Embora este trabalho se proponha a sugerir um caminho para os desafios das escolhas de prioridades do gerente, não há receita pronta para desenvolver um sistema espacial. A figura 6 ilustra o caminho das recursões em função do aumento do nível de detalhamento do projeto.

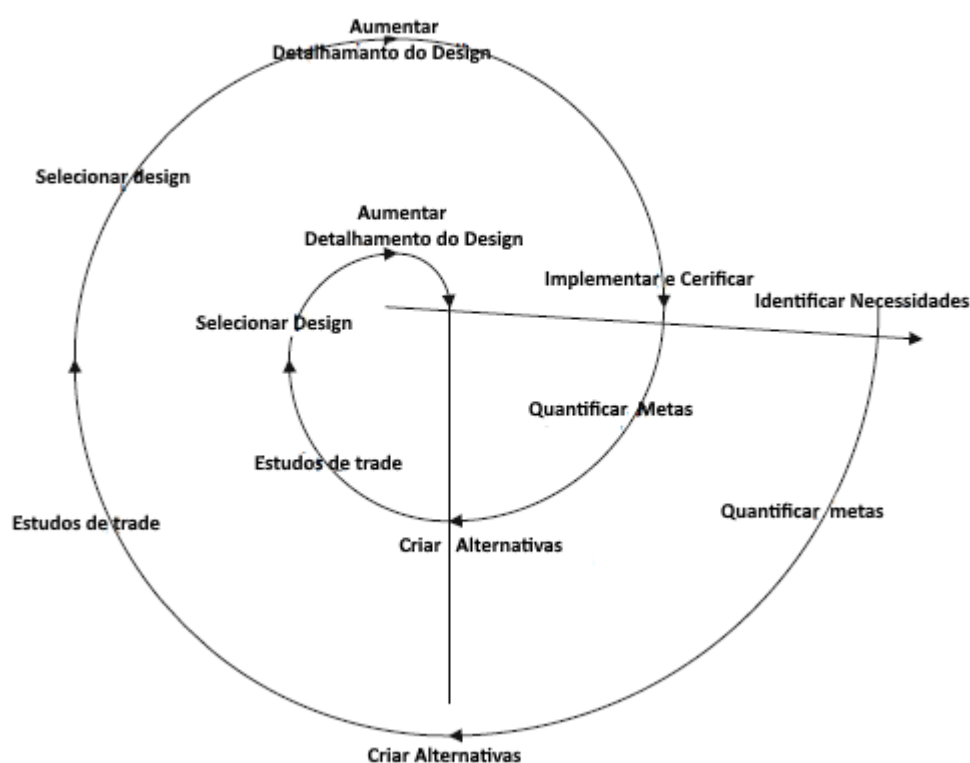


Figura 6 – *Design* como um processo recursivo (AGUIRRE, 2013, p. 11, adaptado).

As técnicas atuais em engenharia de sistemas aeroespaciais não permitem ao gerente escapar da espiral representada na figura 6. Conjugando-se as bibliografias citadas na seção 2 ao escopo estipulado na subseção 1.2 espera-se, contudo, que o gerente possa reduzir o número de recursões nessa espiral.



### 3 Primeiros Passos

Conforme explanado na seção 2.1, não há passo-a-passo infalível para o sucesso de uma missão espacial.

The steps needed to define a successful space science mission are numerous. The science drivers, the unique advantages this mission provides over past missions or earth-based experiments, and the payload that it includes are the key factors to guarantee its success. Finding the required information on such topics is not so straightforward, especially as they are usually outside the scope of undergraduate courses (PILLET; APARICIO; SANCHEZ, 2005, p. 7).

Ainda assim, “os instrumentos a bordo de um satélite, no fim, são os elementos que proporcionam a ciência que deliberou a missão” (PILLET; APARICIO; SANCHEZ, 2005, p. 7, tradução nossa). Também nesse sentido, “a justificativa de existência de qualquer missão espacial é sua carga útil ou seus instrumentos” (AGUIRRE, 2013, p. 36, tradução nossa).

Isso significa que um dos esforços iniciais do gerente e sua equipe consiste em definir a carga útil a ser utilizada na missão. A carga útil é o parâmetro chave para definir o regime de consumo de energia do satélite, a massa e o tamanho da estrutura (e, por conseguinte, o espaço necessário no veículo lançador), a largura de banda necessária para transmissão de dados e telecomandos, além de ser o principal elemento responsável por gerar dados úteis ao consumidor. A Figura 7 ilustra interrelações de diversos domínios da missão espacial.

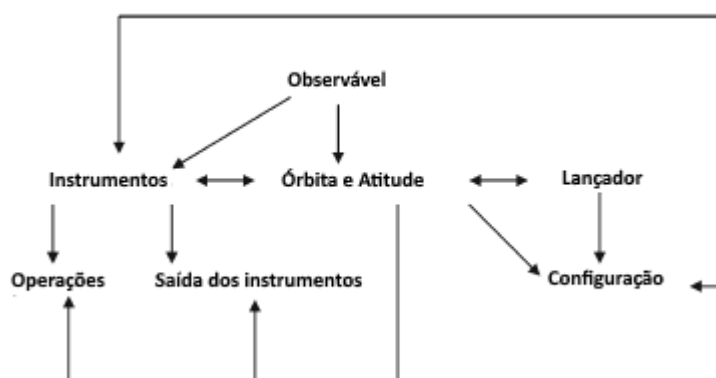


Figura 7 – Interrelações externas entre o domínio da órbita e altitude (AGUIRRE, 2013, p. 228, adaptado).

Por sua vez, a carga útil só pode ser escolhida depois de definido o alvo da missão. Embora essa conclusão pareça lógica à primeira vista, é preciso muita atenção da agência espacial nesse aspecto. Isso porque, via de regra, a prioridade do patrocinador é o menor custo e a prioridade do consumidor é a qualidade dos dados recebidos. Assim, eventualmente o contexto político pode priorizar a utilização ou compra de um determinado instrumento ao invés de definir o alvo.

Aguirre (2013, p. 6) constata que na maioria dos programas espaciais, o *stakeholder* que paga pelo sistema não é seu utilizador. Sugere, ainda, que o projetista deve estar atento ao ambiente político a fim de que seu projeto possa, de fato, ser lançado.

Mas, mesmo que a carga útil não seja uma escolha eminentemente técnica, o projetista deve se cercar, tanto quanto possível, de procedimentos sistêmicos para sua escolha. A próxima subseção tratará sobre tais procedimentos nas fases 0 e A do projeto.

### 3.1 Chamadas

Antes de implementar uma missão científica, a ESA propõe, publicamente, uma consulta para ideias (PILLET; APARICIO; SANCHEZ, 2005, p. 1). Essa consulta busca relacionar os temas passíveis de serem selecionados para uma nova missão espacial e pode ser divulgada através do site da instituição da agência espacial, a exemplo do que faz a própria ESA.

Também na chamada para ideias é definida uma data para que as partes interessadas submetam uma carta de intenção referente ao tema. Vide Figura 8, a ESA, em geral, propõe um prazo de 3 semanas a partir da data para chamada de ideias para o envio da carta de intenção e em seguida um segundo prazo de 10 semanas para que os interessados enviem uma carta proposta.

Muito embora os prazos supracitados variem de acordo com o contexto político-econômico do país, prazos muito longos podem fazer com que a tecnologia no momento do lançamento do projeto esteja atrasada ou obsoleta em relação aos instrumentos disponíveis.

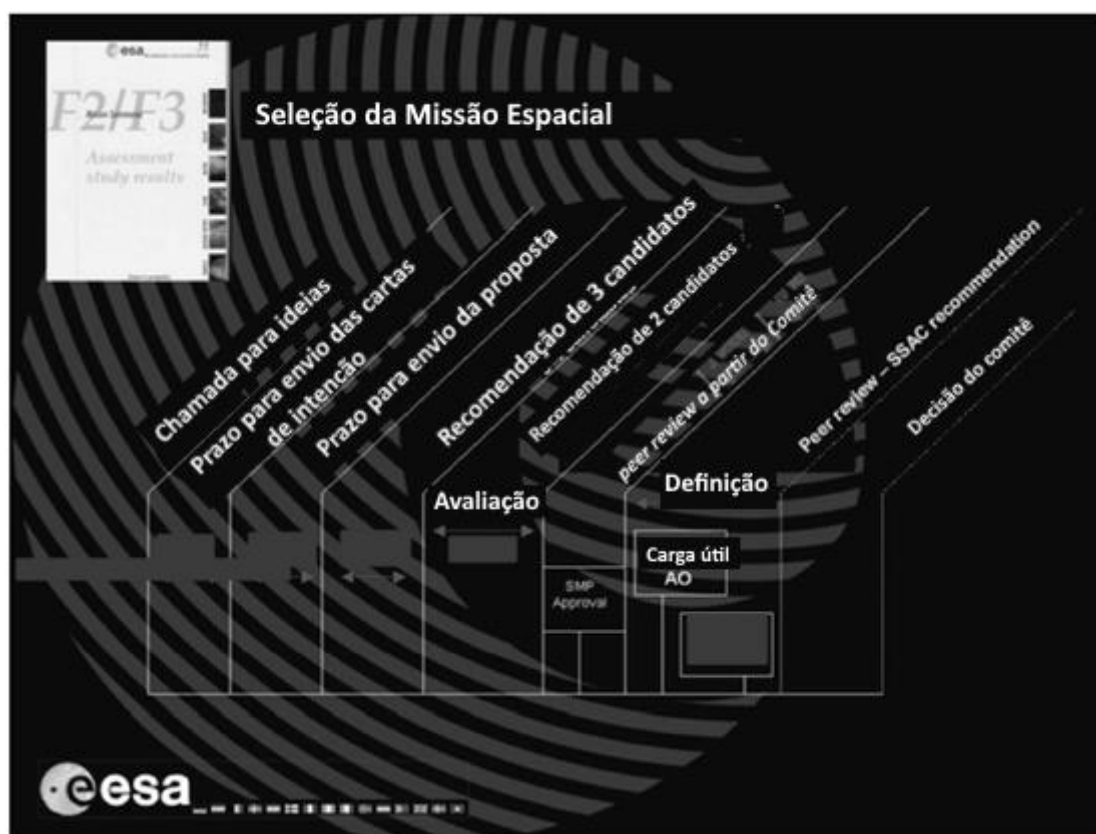


Figura 8 – Seleção da missão (PILLET; APARICIO; SANCHEZ, 2005, p. 3, adaptado).

Após o envio das cartas propostas, sugere-se que o comitê da agência emita um parecer em até 2 semanas contendo, no máximo, 4 propostas; em seguidas, tais propostas passam a ser minuciosamente revisadas na chamada Fase de Avaliação. Essa fase pode durar até 4 meses, donde sairão 2 recomendações de propostas para fase de definição. Embora no caso de missões científicas da ESA a fase de definição fique a cargo do *Science Programme Committee* (SPC), o contexto em que a agência espacial está inserida pode fazer com que a fase de definição fique a cargo de algum ministério ou até mesmo do patrocinador. Em todo caso, o documento mais importante ao término da fase de avaliação é o *Payload Definition Document* (PDD). Esse documento confirma os objetivos da missão proposta através das cartas e processos anteriores.

### 3.1.1 Considerações sobre as chamadas

É importante salientar que as chamadas compõem um roteiro para missões espaciais científicas da ESA. Em outras palavras, como nem toda missão espacial possui cunho

científico, não necessariamente os passos da seção anterior se enquadram nas possibilidades de tarefas do gerente e/ou da agência espacial.

Por outro lado, retomando a problemática exposta neste trabalho, a intenção do autor é o que o gerente tenha amparo sistêmico para suas decisões, agregando essas informações à sua experiência no contexto do projeto que tenha que gerenciar; desse modo, nem tudo (i.e., nem todas as chamadas citadas na seção anterior) pode ser aplicado à missão que gerencia. Mas, em no que for possível, melhor seguir manuais.

De modo geral, seguindo o roteiro da seção anterior, temos:

- a) *Call for Ideas* (publicar em site, prazo de 2 semanas para envio da carta de intenção);
- b) *Call for Proposals* (publicar em site, prazo de 10 semanas para envio da carta proposta);
- c) *Peer Review* (revisar as propostas recebidas em até 2 semanas, cujo parecer define os projetos que seguem para fase de avaliação);
- d) *Assessment Phase (Peer Review)* (os projetos aprovados no item anterior são minuciosamente revisados em até 4 meses, seguindo no máximo 2 para fase de definição, com seu(s) respectivo(s) PDDs);
- e) *Definition Phase* (consultados patrocinadores e/ou demais *stakeholders*, um projeto segue para fase de implantação).

Conforme apresentado no início da seção 3, a carga útil é o componente mais importante da missão. Por isso é imprescindível definir exatamente o alvo a ser detectado pelo satélite. Uma má definição de alvo pode, dentre outros efeitos, implicar confusão entre requisitos e necessidades e assim restringir soluções. Os itens enumerados anteriormente tencionam conduzir o gerente a um processo que justifique para os *stakeholders* e para o próprio projeto o porquê escolher esse alvo e não aquele.

### 3.2 Temas de interesse frequente

As chamadas para ideias ou temas podem ser advindas de diversos interesses estratégicos para o país. Naturalmente, o cenário político, econômico, social, científico e ambiental enseja qual tipo de missão espacial trará maior benefício à sociedade.

Evidentemente, decidir qual é o tema mais importante para envidar recursos na ordem de milhões de reais não é uma tarefa simples. Por isso, a importância de um comitê composto por autoridades ministeriais e científicas que possa avaliar as cartas de intenção e cartas propostas a fim de chegar a um consenso sobre o tema. A Tabela 1 elenca alguns temas de interesse frequente em missões espaciais.

Tabela 1 – Exemplos de temas de interesse para missões espaciais (ESA, 2018, n.p.).

| Tema                                                | Exemplo                                                                                                |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Saúde                                               | Vigilância médica remota e diagnóstico                                                                 |
| Transporte                                          | Controle e monitoramento de trens, operações do Sistema de Aeronaves Não Tripuladas                    |
| Segurança                                           | Segurança cibernética: aumento da resiliência a incidentes cibernéticos e redução a ameaça cibernética |
| Aplicações para consumo                             | Cinema digital, realidade aumentada                                                                    |
| Emergências                                         | Deteção de incêndios florestais, detecção de poluição da água                                          |
| eLearning                                           | Treinamento de professores por satélite                                                                |
| Energia                                             | Leituras de medidores via satélite, monitoramento de campo de petróleo e gás offshore                  |
| Informações confidenciais ou criticamente sensíveis | Infraestrutura de telecomunicações por satélite                                                        |

Note-se que a Tabela 1 não esgota todos os temas que possam ser de interesse do país. Ademais, nem todos os itens elencados na Tabela 1 estão no escopo deste trabalho.

## 4 Alvos

A hipótese fundamental deste trabalho é a de que a escolha do alvo é a decisão mais importante do *stakeholder*. Uma vez que o alvo tenha sido escolhido, o *stakeholder* ainda precisará ser instado a tomar outras decisões como, por exemplo, a frequência de disponibilidade da imagem (posteriormente entendida como parâmetro para estabelecer o tempo de revisita do satélite). Contudo, justamente a escolha do alvo permitirá ao projetista fazer a pergunta supra munido de algumas estimativas sobre custos e tempo de desenvolvimento (ora, sem apresentar os *trades*, a priori, o *stakeholder* irá responder que deseja uma nova imagem a cada instante).

Esse ponto é importante porque substituir a decisão do alvo por uma finalidade não específica (por exemplo, “o imageamento de melhor custo-benefício”), fixa uma solução de projeto antes mesmo de o projeto existir. Em outras palavras, especialmente nas fases de concepção, o *stakeholder* – eventualmente, sob a forma da Fase de Decisão, conforme seção 3 - deve ser questionado sobre qual alvo lhe traria maior benefício; à engenharia, então, caberia a melhor solução de projeto. Caso as estimativas de custo estejam dentro do orçamento do patrocinador, o projeto pode seguir.

Assim, as chamadas enumeradas na subseção 3.1.1 apontam para a escolha de possíveis alvos. Considerando tais alvos – supostamente de potencial interesse em missões de imageamento –, esta seção busca embasar o gerente quanto suas viabilidades e implicações técnicas.

### 4.1 Visão geral

Cada missão espacial possui um grau de ineditismo. Mesmo em missões cujos instrumentos ópticos, lançador e processos sejam semelhantes, no mínimo a órbita do satélite será diferente, implicando em considerações sobre energia e radiação recebida (a energia eletromagnética recebida pelos sensores depende, por exemplo, se é dia ou noite).

Contudo, duas características fundamentais em EOS podem ser estimadas (ou pelo menos ser tomadas como comparação) a partir de dados de missões anteriores: a resolução temporal e a resolução espacial.

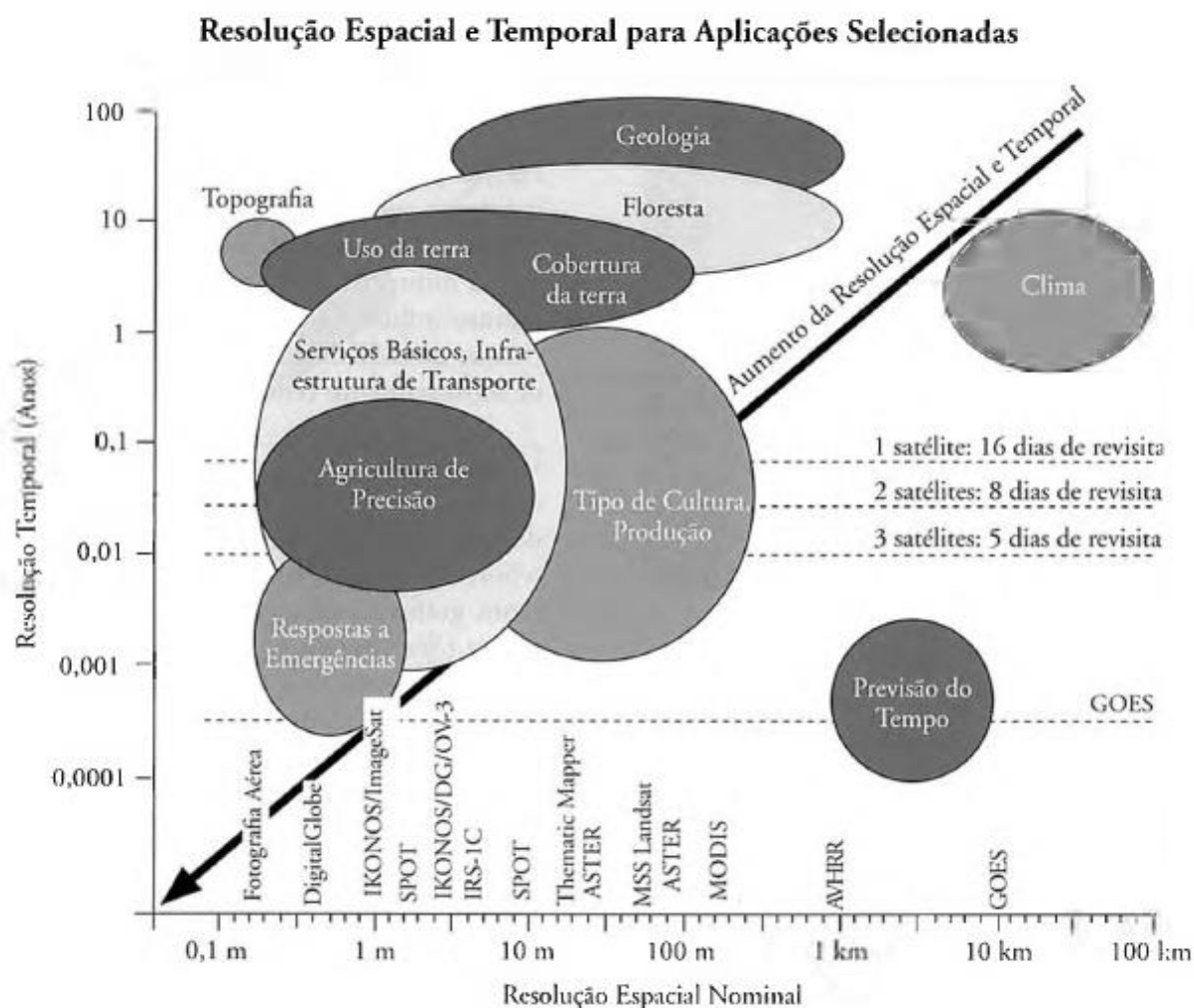


Figura 9 - Considerações sobre resolução espacial e temporal que precisam ser feitas para certas aplicações (JENSEN, 2009, p. 21).

A Figura 9 serve como um parâmetro inicial para o *trade* entre alvo e custo, uma vez que resoluções temporais e tempos de revisita menores implicam em mais satélites, aumentando os custos do projeto. Além disso, certos alvos implicam maiores resoluções espaciais nominais (i.e., sentido esquerdo do eixo horizontal), o que pode constituir um desafio tecnológico em termos de sensores.

Infelizmente, a despeito da noção do *trade* supracitado, majorar os custos de uma missão espacial só é possível a partir do *Peer Review*. Isso ocorre porque algumas parcelas significativas dos custos da missão dependem de perguntas que não podem ser respondidas por regras práticas gerais. Por exemplo, se o volume do satélite o permite que seja lançado como “carona” no lançamento de outro satélite maior ou se as operações de solo podem ser executadas por estações pré-existentes; em ambos casos, as respostas correspondem a milhões de reais a mais ou a menos.

Como referência para piso em termos de custos, estima-se que o custo do ITASAT-1 (um nanosat universitário) tenha sido de R\$ 3 milhões (ITA, 2015), incluído o lançamento.

Tabela 2 – Dados do ITASAT-1 (AEB, 2018; UCS, 2019).

| Característica | Dados                                                                                                                                                                               |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dimensões      | 10x20x30 centímetros cúbicos                                                                                                                                                        |
| Massa          | 5,2 kg                                                                                                                                                                              |
| Carga útil     | Transponder de coleta de dados, receptor GPS, câmera comercial com resolução de 80m por pixel no espectro visível e um experimento de comunicação com a comunidade de radioamadores |
| Órbita         | Sol síncrona, com altitude entre 573 e 582 km                                                                                                                                       |

Se por um lado a Figura 9 não pode, por si, estimar diretamente os custos de uma missão espacial, por outro, há um dado bastante relevante na avaliação da viabilidade do projeto: a resolução espacial.

A caracterização da resolução espacial e temporal será abordada com maiores detalhes na seção 5. Mas, sem entrar ainda no mérito dos requisitos para carga útil, o gerente deve ser capaz de estimar, ainda que grosseiramente, a resolução espacial necessária para atingir as necessidades do consumidor. Em outras palavras, não se pode estipular para uma mesma missão objetivar detectar incêndios florestais (cuja ordem de grandeza da resolução é métrica, enquadrado como “respostas a emergências” na Figura 9) e, ao mesmo tempo, ser utilizado para previsão do tempo (cuja ordem de grandeza é, a priori, quilométrica).



É importante notar o papel do gerente na avaliação do alvo. O alvo (ou observável) faz gerar requisitos para a carga útil. Por sua vez, ao avaliar a viabilidade de um alvo, o gerente deve ter alguma propriedade sobre as características dos instrumentos ópticos sem, contudo, aprofundar-se em seu *desgin* (tarefa da equipe de especialistas).

The design of optical instruments – optical concept, spectrometer concept, focal plane and detector array concepts, aperture size, and focal length – is a highly specialized task and all design decisions related to them are left in the hands of specialists (AGUIRRE, 2013, p. 185).

Chama atenção na citação anterior o trecho “*all design decisions*”. Não é intenção deste trabalho definir os limites de atuação da gerência geral e da gerência de cada subsistema. A proposta é que o gerente proveja ao subsistema de carga útil a escolha do alvo segundo as necessidades do consumidor e segundo uma avaliação preliminar da viabilidade de uma carga útil compatível com o alvo.

## 4.2 Alvos de interesse frequente

Da mesma forma que a Tabela 1 apresenta temas frequentes, também os alvos decorrentes de tais temas acabam por apresentar certa repetitividade. Entretanto, a abordagem de temas é diferente da abordagem de alvos: enquanto essa depende do contexto político-econômico, esta depende do avanço da tecnologia óptica, sobretudo considerando a resolução espacial e as capacidades de câmeras multiespectrais e hiperspectrais (tais termos serão mais bem explicados na subseção 5.1.2).

Assim, se antes era possível apenas identificar o tipo de vegetação em uma dada área, hoje é possível estimar sua emissão de CO<sub>2</sub> e/ou se há alguma doença botânica assolando a região. Nesse sentido, a evolução dos sensores ópticos pode renovar as propriedades identificáveis de um mesmo alvo.

Um ponto importante a ser esclarecido neste trabalho é que o “alvo” não necessariamente se refere a um corpo material contínuo, ou seja, o alvo do satélite pode ser um fenômeno como uma descarga elétrica (raio) ou a dispersão de gases numa região.

A Tabela 3 elenca alguns dos principais alvos observados por satélites em missões de imageamento realizadas entre 1991 e 2018.

Tabela 3 – Alvos de interesse frequente e nomes de algumas cargas úteis já utilizadas (QIAN, 2016, p. 94 - 964).

| (continua)                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alvo                                                               | Exemplos de cargas úteis                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Oceanos                                                            | <i>Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Medium Resolution Imaging Spectrometer for Ocean Color (MERIS), Ocean and Land Color Imager (OLCI), Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR)</i> |
| Atmosfera                                                          | <i>Atmospheric Chemistry Experiment - Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS)</i>                                                                                                                                                                                       |
| Meio ambiente (bioquímica, biofísica, dados geológicos, vegetação) | <i>Environmental Mapping and Analysis Program (EnMap), Infrared Scanner (IRS), Low-cost Vegetation-monitoring Camera (HMCAM)</i>                                                                                                                                         |
| Agricultura e recursos energéticos                                 | <i>Hyperspectral Imager Suite (HISUI), Infrared Scanner (IRS), MUX Multispectral Imager for CBERS 3&amp;4 (MUXCAM), IKONOS</i>                                                                                                                                           |
| Incêndios e monitoramento de desastres                             | <i>Infrared Scanner (IRS), Hodoyoshi-1, Low-Resolution Camera and Medium-Resolution Camera (in Hodoyoshi-3), High-Resolution Camera (in Hodoyoshi-4), Medium Resolution Imaging Spectrometer for Ocean Colour (MERIS), IKONOS</i>                                        |
| Cartografia                                                        | <i>Medium Resolution Imaging Spectrometer for Ocean Colour (MERIS), MUX Multispectral Imager for CBERS 3&amp;4 (MUXCAM)</i>                                                                                                                                              |
| Eventos luminosos transientes (descargas elétricas)                | <i>Remote Sensing Instrument (RSI)</i>                                                                                                                                                                                                                                   |

Tabela 3 – Alvos de interesse frequente e nomes de algumas cargas úteis já utilizadas  
(QIAN, 2016, p. 94 - 964).

(conclusão)

| Alvo                                                               | Exemplos de cargas úteis                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Previsão do tempo                                                  | <i>Cross-track Infrared Sounder (CrIS)</i>                                                                                                                  |
| Ventos atmosféricos                                                | <i>WIND Imaging Interferometer (WINDII)</i>                                                                                                                 |
| Distribuição de ozônio na atmosfera                                | <i>Optical Spectrograph and Infrared Imager System for Measurements of Atmospheric Composition and Emissions (OSIRIS)</i>                                   |
| Monitoramento de Gases<br>(medidas de metano e dióxido de Carbono) | <i>Thermal and Near infrared Sensor for carbon Observation<br/>Fourier Transform Spectrometer (TANSO-FTS) and the<br/>Cloud, Aerosol Imager (TANSO-CAI)</i> |
| Poluição na troposfera<br>(medidas de monóxido de carbono)         | <i>Measurements of Pollution in The Troposphere (MOPITT)</i>                                                                                                |
| Comunicações ópticas                                               | <i>Small Optical Transponder (SOTA)</i>                                                                                                                     |

A partir da Tabela 3 é possível obter referência sobre as cargas úteis já utilizadas no imageamento de muitos alvos. Ainda sobre a Tabela 3, é importante notar a frequência da presença de instrumentos infravermelho: aplicam-se na agricultura, no monitoramento de desastres, na previsão do tempo e na detecção de gases. Embora nem todas as missões tenham real necessidade de empregá-los, tal versatilidade faz com que a capacidade de infravermelho seja normalmente bem-vinda em qualquer missão espacial.

Nas subseções seguintes, alguns dos alvos elencados na Tabela 3, considerando suas importâncias, serão detalhados em termos de assinaturas espectrais e outras propriedades esperadas. Retomando o propósito desta seção, conhecer os alvos permite ao gerente emitir algum juízo de valor preliminar quando avaliando as propostas de missão, além de subsidiar melhor a equipe de especialistas da carga útil.

### 4.2.1 Vegetação

Existem diversas características que podem ser avaliadas a partir da reflectância foliar de uma planta. Ainda que tais características requeiram estudos aprofundados no sentido de definir quais são as bandas adequadas para identificar doenças ou desidratação, por exemplo, de antemão é possível estimar quais comprimentos de onda são normalmente úteis quando avaliando uma vegetação.

Começemos pela fotossíntese. Segundo Jensen, (2009, p. 358), “o processo fotossintético começa quando a luz solar atinge os cloroplastos, pequenos corpos existentes nas folhas, os quais contêm uma substância verde chamada clorofila”. A equação que descreve o processo pode ser escrita como (JENSEN, 2009, p. 359):



Conforme equação (1), a energia luminosa tem grande relevância no ciclo vital da planta, além da água e do dióxido de carbono.

As plantas adaptaram sua estrutura interna e externa para realizar a fotossíntese. Esta estrutura e suas interações com a energia eletromagnética têm um impacto direto na forma como as folhas e os dosséis vegetais aparecem espectralmente quando registrados usando instrumentos de sensoriamento remoto (JENSEN, 2009, p. 359).

O comprimento de onda da luz verde encontra-se tipicamente entre 0,495  $\mu\text{m}$  e 0,570  $\mu\text{m}$ . Ocorre que, em uma planta sadia, as clorofilas *a* e *b*, ambas absorvem particularmente as radiações compreendidas entre 0,45  $\mu\text{m}$  - 0,52  $\mu\text{m}$  e entre 0,63  $\mu\text{m}$  - 0,69  $\mu\text{m}$ . Justamente por isso, a coloração típica de uma planta sadia é verde, porquanto significa que a presença de clorofila está normal. Por outro lado, plantas amareladas ou amarronzadas indicam um processo senescência e/ou estresse, na medida em que a produção de clorofila diminui.

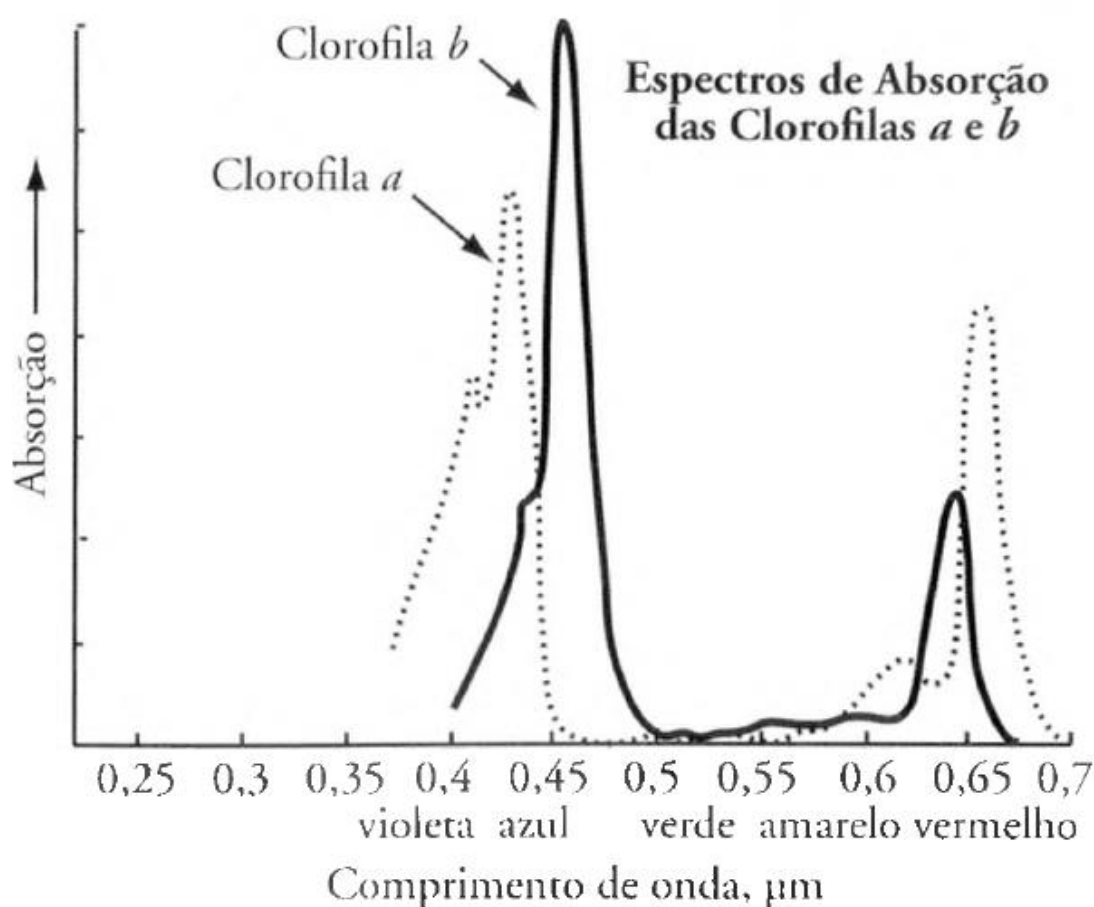


Figura 10 - Espectros de absorção dos pigmentos clorofila *a* e clorofila *b*. As clorofilas *a* e *b* da folha vegetal absorvem grande parte da energia azul e da energia vermelha incidentes (JENSEN, 2009, p. 362).

Além das indicações sobre a saúde de uma plantação a partir de bandas no espectro visível, outras 2 bandas podem revelar dados úteis acerca da absorção de água por uma planta: o infravermelho próximo e o infravermelho médio. Segundo Jensen (2009, p. 363), “na região do infravermelho, a vegetação verde sadia é geralmente caracterizada por uma alta reflectância (40 - 60%), alta transmitância (40 - 60%) e relativamente baixa absorvância (5 - 10%)”. Como existe uma banda de absorção de água entre 0,92  $\mu\text{m}$  e 0,98  $\mu\text{m}$ , a região espectral ótima para o sensoriamento no infravermelho próximo é indicada como sendo em 0,74 - 0,90  $\mu\text{m}$  (TUCKER, 1978 *apud* JENSEN, 2009, p. 364). Na prática, a análise da banda no infravermelho próximo (tipicamente definido entre 0,7  $\mu\text{m}$  e 1,3  $\mu\text{m}$ ) é importante porque quanto mais secas as folhas, maior a reflectância na região do infravermelho próximo.

No caso do infravermelho médio, a aquisição de dados é um pouco mais complexa. A água líquida na atmosfera gera bandas de absorção em diversos comprimentos de onda que podem, a priori, ser confundidas com a água absorvida pelas plantas.

Os sistemas de sensoriamento remoto ópticos (exceto os radares) são geralmente limitados a funcionarem em intervalos espectrais de 0,3 - 1,3; de 1,5 - 1,8 e de 2,0 - 2,6  $\mu\text{m}$ , devido a fortes bandas de absorção pela água atmosférica em 1,45; 1,94 e 2,7  $\mu\text{m}$ . Felizmente, como mostrado na Figura 11-7, há uma forte sensibilidade “suplementar” ao conteúdo de água nas regiões em 1,5 - 1,8  $\mu\text{m}$  e em 2,0 - 2,6  $\mu\text{m}$ , que são adjacentes às principais bandas de absorção pela água. Esta é a razão pela qual os sensores *Thematic Mapper* (TM/Landsat-4 e TM/Landsat-5) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+/Landsat-7) tiveram duas bandas escolhidas nas citadas regiões espectrais: a banda 5 (1,55 - 1,75  $\mu\text{m}$ ) e a banda 7 (2,08 - 2,35  $\mu\text{m}$ ). Já foi consistentemente demonstrado que a banda no infravermelho médio (1,55 - 1,75  $\mu\text{m}$ ) é sensível ao conteúdo de umidade do dossel (JENSEN, 2009, p. 367).

A figura 11-7 mencionada no texto segue reproduzida na Figura 11:

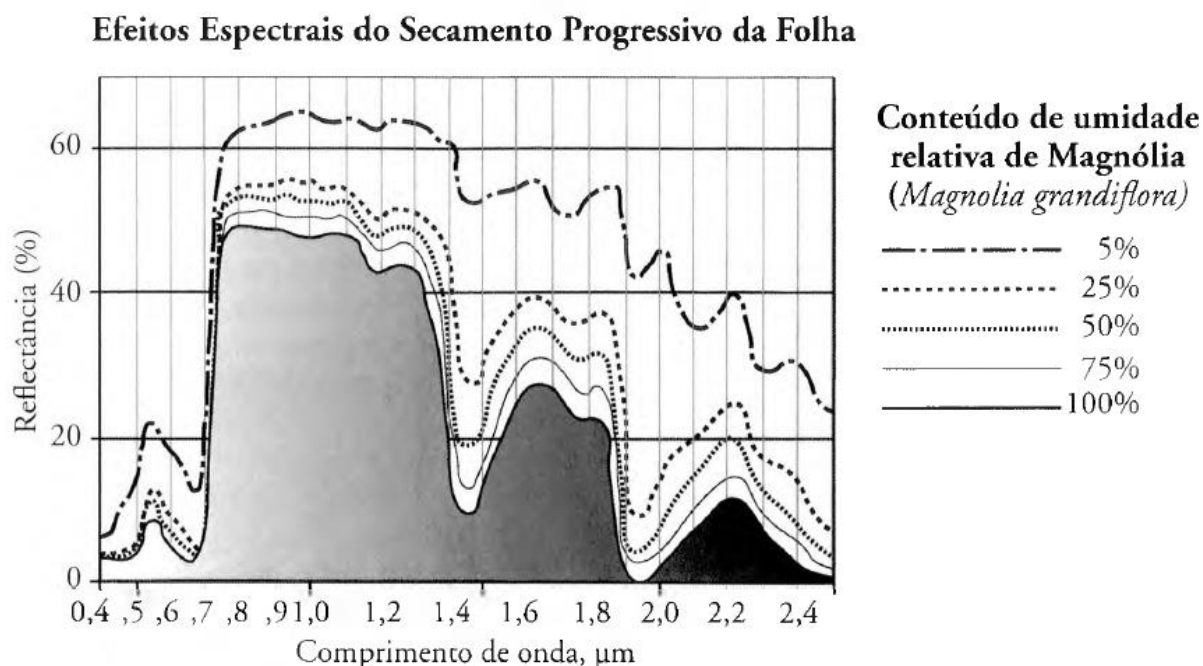


Figura 11 - Resposta de reflectância de uma folha de Magnólia a diferentes conteúdos de umidade. À medida que o conteúdo de umidade diminuiu, a reflectância aumentou ao longo da região 0,4 - 2,5  $\mu\text{m}$ . Entretanto, o maior aumento ocorreu na região do infravermelho médio (1,3 - 2,5  $\mu\text{m}$ ) (CARTER, 1991 *apud* JENSEN, 2009, p. 368).

Existem outras características (a exemplo da Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional) que são importantes no estudo da reflectância espectral da vegetação, mas fogem ao escopo deste trabalho. E embora os detalhes de comprimentos de onda supracitados possam parecer, à primeira vista, muito específicos, permitem ao gerente a avaliação preliminar mencionada ao final da subseção 4.2.

O ponto principal é compreender que um satélite com sensores apenas pancromáticos terá baixíssima capacidade de avaliar a saúde de uma plantação. Já um satélite com sensores apenas no espectro visível será capaz de prover alguma informação de valor sobre a vegetação, mas certamente não tanto quanto um satélite com sensores no infravermelho. Eventualmente, este pode ser aplicado para detectar desmatamento enquanto aquele pode ser aplicado em agricultura de precisão, por exemplo. A fim de elucidar tais diferenças, a Figura 12 ilustra o comportamento da reflectância da vegetação ao longo do espectro entre 0,25  $\mu\text{m}$  e 2,5  $\mu\text{m}$ .

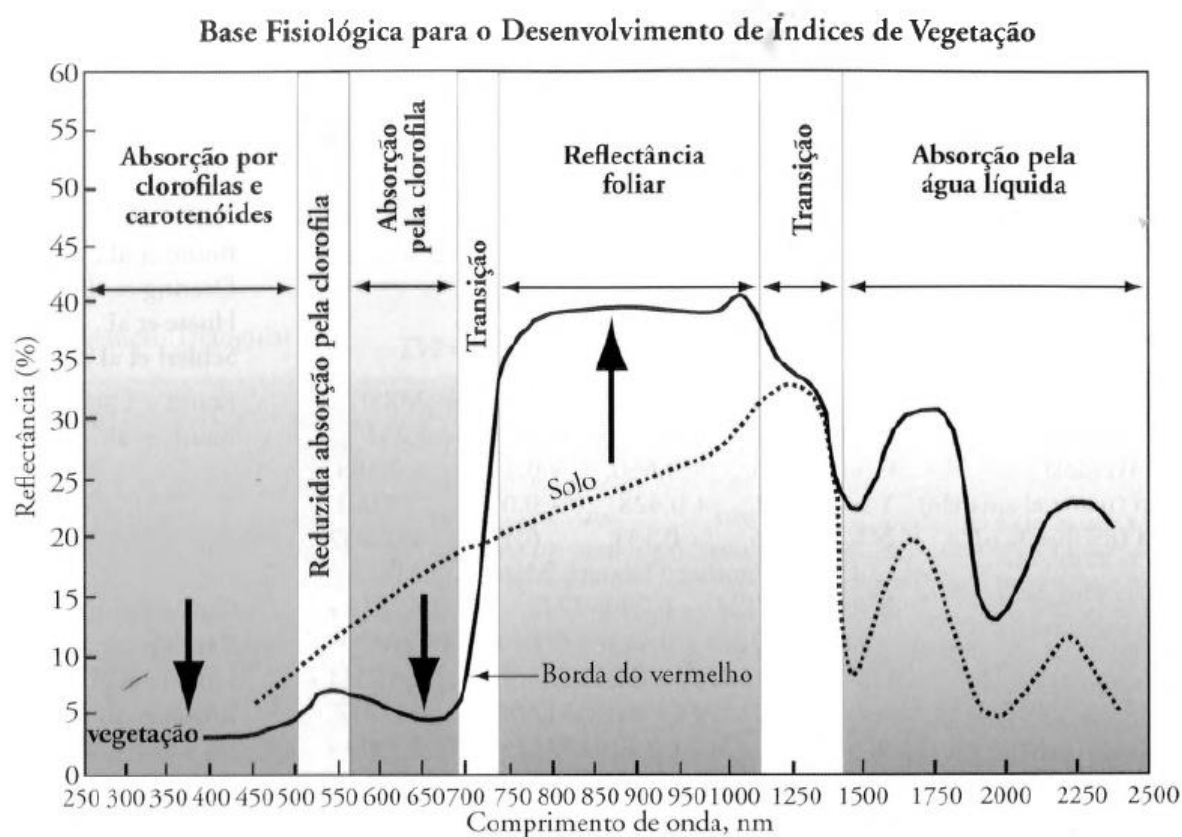


Figura 12 - Base fisiológica para o desenvolvimento de índices de vegetação. Características típicas de reflectância espectral para gramínea verde sadia e para solo seco exposto, no intervalo entre 250 e 1.000 nm (adaptado de HUETE et al., 2002, *apud* JENSEN, 2009, p. 385).

Finalmente, a Tabela 4 sintetiza as características detectáveis na vegetação conforme a banda espectral.



Tabela 4 – Característica observável da vegetação conforme a banda

| Banda recomendada                                                                   | Faixa total                                                                         | Dados observáveis                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,37 $\mu\text{m}$ – 0,75 $\mu\text{m}$                                             | 0,37 $\mu\text{m}$ – 0,75 $\mu\text{m}$<br>(Visível)                                | Vegetação sadia (plantas verdes);<br>Vegetação em processo de senescência ou estresse;<br>Vegetação seca, em estágio avançado.                    |
| 0,74 $\mu\text{m}$ – 0,90 $\mu\text{m}$                                             | 0,7 $\mu\text{m}$ - 1,4 $\mu\text{m}$<br><i>Near-infrared</i> (NIR)                 | Vegetação seca, em estágios iniciais;<br>Diferenciação rápida entre alvos verdes (e.g., grama sintética) e vegetação sadia (e.g., grama natural). |
| 1,5 $\mu\text{m}$ - 1,8 $\mu\text{m}$ e<br>de 2,0 $\mu\text{m}$ - 2,6 $\mu\text{m}$ | 1,4 $\mu\text{m}$ – 3,0 $\mu\text{m}$<br><i>Short-wavelength infrared</i><br>(SWIR) | Taxa de absorção de água pela vegetação.                                                                                                          |

#### 4.2.2 Água

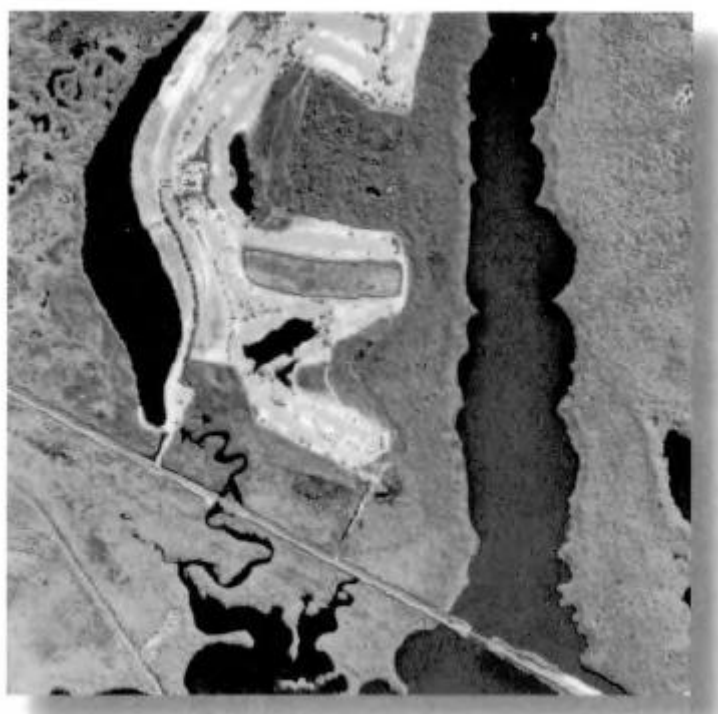
O sensoriamento remoto da água possui inúmeras vertentes: observação de corpos d'água na superfície terrestre (e.g. oceanos profundos, águas interiores e águas costeiras), observação e previsão de precipitação, aerossóis e nuvens, vapor d'água e neve. Ainda, como para cada uma das vertentes supracitadas existe mais de um aspecto a ser explorado, esta subseção tratará sucintamente apenas de corpos d'água na superfície terrestre considerando: a água pura, a água com sedimentos, a presença de clorofila na água e quanto as bandas indicadas para batimetria.

Enquanto a vegetação prescinde das bandas do infravermelho para observações primárias, o mesmo não ocorre para água pura, quando se trata de delinear a superfície terra-água.

As melhores regiões de comprimento de onda para discriminar terra de água pura são o infravermelho próximo e o infravermelho médio (comprimentos de onda entre 740 e 2500 nm). Nas regiões do infravermelho próximo e médio, os corpos d'água aparecem muito escuro, mesmo pretos, porque eles absorvem praticamente todo o fluxo radiante incidente, especialmente

quando a água é profunda e pura ou sem a presença de sedimentos em suspensão ou matéria orgânica (p.ex., Figura 12-2a). De forma oposta, as coberturas da terra, tipicamente compostas por vegetação e solo exposto, refletem quantidades significativas de energia no infravermelho próximo e médio, como discutido em capítulos anteriores. Consequentemente, essas coberturas aparecem relativamente claras nas imagens obtidas em bandas do infravermelho próximo e médio (JENSEN, 2009, p. 415).

Reproduz-se a figura 12-2a mencionada na citação anterior na Figura 13.



a. Fotografia infravermelho preto-e-branco de corpos d'água na Flórida.

Figura 13 - Fotografia infravermelho preto-e-branco de uma área na Flórida contendo vegetação natural, um campo de golfe e corpos d'água profundos e não-túrbidos (JENSEN, 2009, p. 413).

Além da água pura, também as águas de oceanos profundos, por apresentarem sedimentos menores que  $1\text{ }\mu\text{m}$ , são normalmente observados na faixa do infravermelho médio e infravermelho próximo – ao contrário de águas interiores e corpos d'água costeiros, que por

geralmente apresentarem muitos sedimentos, afetam dramaticamente a característica da reflectância espectral (MILLER; MCKEE, 2004 *apud* JENSEN, 2009, p. 417).

No caso de corpos d'água com sedimentos em suspensão, o sensoriamento remoto pode prevenir situações de grande impacto ambiental (ou financeiro).

[...], a erosão do solo em uma bacia hidrográfica lança uma carga de sedimentos nos corpos d'água, que resulta em assoreamentos mais rápidos dos principais rios, reservatórios, obras para controle de inundação e estuários. Isso pode diminuir a vida útil dos reservatórios, lagos e dos mecanismos de controle de inundação, resultando na necessidade de dragagem de rios e estuários. Por exemplo, a redução na capacidade de armazenamento nos reservatórios dos Estados Unidos causada pelo assoreamento (sedimentos em suspensão) produz uma perda anual superior a 100 milhões de dólares. Os sedimentos também afetam a qualidade da água e a sua adequação para consumo humano, recreação e uso industrial. Os sedimentos servem como um agente transportador e armazenador de pesticidas, fósforo e nitrogênio absorvidos, e compostos orgânicos e podem ser um indicador de poluição. Os sedimentos em suspensão podem impedir a transmissão de radiação solar e reduzir a fotossíntese em vegetação aquática submersa e fitoplâncton próximo ao substrato. A vegetação aquática e o fitoplâncton têm um papel vital na cadeia alimentar do ecossistema aquático (JENSEN, 2009, p. 417).

Conforme a citação acima, a análise dos sedimentos na água possui aplicações em diversas áreas. Curiosamente, de maneira inversa à vegetação, análises mais complexas da água requerem sensores no espectro visível, a fim de estimar a concentração de algas e outros sedimentos.

Embora não haja uma regra estatística universal para a reflectância de corpos d'água com sedimentos em suspensão, Jensen (2009, p. 419) apresenta resultados que sugerem que a faixa de comprimento de onda do visível entre 580 – 690 nm pode fornecer informações sobre o tipo de sedimento em suspensão nas águas; já a faixa do infravermelho próximo, entre 714 – 880 nm, pode ser útil para determinar a quantidade de sedimentos em suspensão no corpo d'água.

No caso da presença de algas, sua detecção se dá através da medição da presença de clorofila. Contudo, em águas costeiras e interiores, “é geralmente difícil separar, nos dados de sensores remotos, a informação sobre o pigmento do fitoplâncton dos efeitos de materiais inorgânicos em suspensão ou de matéria orgânica dissolvida (DOM)” (JENSEN, 2009, p.423).

Por outro lado, a presença de clorofila em águas oceânicas é normalmente detectada utilizando cobertura espectral a partir de 402 nm. Por exemplo, “as bandas 8-16 do MODIS, variando de 405 - 877 nm com resolução espacial de 1000 x 1000 m, são particularmente adequadas para a obtenção de informação sobre a cor dos oceanos, concentração de fitoplâncton e sobre a biogeoquímica” (MODIS, 2006 *apud* JENSEN, 2009, p. 422). Mais uma vez, fica evidenciada a importância de sensores no espectro visível e NIR.

Finalmente, embora o mapeamento batimétrico seja mais preciso utilizando um sonar ou um sistema LIDAR (*Light Detection And Ranging*), a faixa entre 440nm a 540 nm é a melhor para se obter informação batimétrica (até 30m profundidade, em águas claras) utilizando sensoriamento remoto passivo (JENSEN, 2009, p. 425).

No caso de um canal com águas escuras (i.e., com sedimentação na superfície), ainda é possível estimar a profundidade, mas sendo essencial, nesse caso, que alguns dados coletados *in situ*.

A Tabela 5 resume a característica observável em corpos d'água em função da faixa de comprimentos de onda.

Tabela 5 - Característica observável do corpo d'água conforme a banda

| Banda recomendada                       | Faixa         | Dados observáveis                                                                                        |
|-----------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,74 $\mu\text{m}$ – 2,5 $\mu\text{m}$  | NIR e SWIR    | Delineamento água-terra para corpos d'água sem sedimentos ou com sedimentos inferiores a 1 $\mu\text{m}$ |
| 0,58 $\mu\text{m}$ – 0,69 $\mu\text{m}$ | Visível       | Tipo de sedimento presente na água                                                                       |
| 0,71 $\mu\text{m}$ – 0,88 $\mu\text{m}$ | Visível e NIR | Concentração de sedimento presente na água                                                               |
| 0,41 $\mu\text{m}$ – 0,49 $\mu\text{m}$ | Visível       | Presença de clorofila (i.e., algas) na água                                                              |

Não raro, bandas adicionais no infravermelho próximo em 765 e 865 nm são utilizadas para ajudar na correção atmosférica, a exemplo do *Sea-viewing Wide Field of View Sensor* (JENSEN, 2009, p. 422).

#### 4.2.3 Outros alvos frequentes

Além da água e da vegetação, alvos como paisagem urbana, solos, minerais e geomorfologia são frequentemente escolhidos por suas potenciais aplicações. Foge ao escopo deste trabalho lidar detalhadamente com cada uma dessas possibilidades, mas cabem algumas considerações.

Com respeito à paisagem urbana, segundo Jensen (2009, p. 449 – 450), é mais importante elevada resolução espacial, de ordem métrica ou submétrica, do que uma elevada resolução espectral (i.e., muitas bandas).

A Tabela 6 relaciona vários atributos com sugestões de resoluções temporais, espectrais e espaciais.

Tabela 6 - Relação entre os atributos urbanos/periurbanos e as resoluções mínimas de sensores remotos para o fornecimento desses dados (adaptado de JENSEN et al, 1999; JENSEN et al, 2004; JENSEN, 2005 *apud* JENSEN, 2009, p. 449).

| (continua)                                                                           |             |              |                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|------------------------|
| Atributos                                                                            | Temporal    | Espacial     | Espectral              |
| <b>Uso da Terra/Cobertura da Terra</b>                                               |             |              |                        |
| L1 - Nível I USGS                                                                    | 5 - 10 anos | 20- 100 m    | V-NIR-MIR-Radar        |
| L2 - Nível II USGS                                                                   | 5 - 10 anos | 5 -20 m      | V-NIR-MIR-Radar        |
| L3 - Nível III USGS                                                                  | 3 - 5 anos  | 1 - 5 m      | Pan -V-NIR-MIR         |
| L4 - Nível IV USGS                                                                   | 1 - 3 anos  | 0,25 - 1 m   | Pancromático (Pan)     |
| <b>Infraestrutura Construtiva e Cadastral (Limites de Propriedades Imobiliárias)</b> |             |              |                        |
| B1 - Perímetro, área, volume e altura da construção                                  | 1 - 5 anos  | 0,25-0,5 m   | Estéreo Pan - V, LIDAR |
| B2 - Informação cadastral (limites de propriedades)                                  | 1 - 6 meses | 0,25-0,5 m   | Estéreo Pan - V        |
| <b>Características Socioeconômicas</b>                                               |             |              |                        |
| 51- Inferência da população local                                                    | 5 - 7 anos  | 0,25 - 5 m   | Pan -V-NIR, LIDAR      |
| 52- Inferência da população regional/nacional                                        | 5 - 15 anos | 5 - 20 m     | Pan -V-NIR             |
| 53- Indicadores de qualidade de vida                                                 | 5 - 10 anos | 0,25 - 30 m  | Pan -V-NIR             |
| <b>Demanda e Conservação de Energia</b>                                              |             |              |                        |
| E1 - Demanda de energia e potencial de produção                                      | 1 - 5 anos  | 0,25 - 1 m   | Pan -V-NIR, LIDAR      |
| E2 - Levantamento do isolamento das construções                                      | 1 - 5 anos  | 1 - 5 m      | TIR                    |
| <b>Infraestrutura de Transporte</b>                                                  |             |              |                        |
| T1 - Eixo de simetria de vias em geral                                               | 1 - 5 anos  | 1 -30m       | Pan -V-NIR             |
| T2 - Largura de vias com precisão                                                    | 1 - 2 anos  | 0,25-0,5 m   | Pan - Visível          |
| T3 - Estudos de contagem de tráfego (carros, aviões, etc.)                           | 5 - 10 min  | 0,25 - 0,5 m | Pan - Visível          |
| T4 - Estudos sobre a necessidade de estacionamentos                                  | 10 - 60 min | 0,25-0,5 m   | Pan - Visível          |
| <b>Infraestrutura de Comunicações e Serviços</b>                                     |             |              |                        |
| UI - Mapeamento e traçado de linhas de infraestrutura                                | 1 - 5 anos  | 1 -30 m      | Pan -V-NIR             |
| U2 - Largura precisa de linhas de infraestrutura e áreas de servidão                 | 1 - 2 anos  | 0,25 - 0,6 m | Pan -V, LIDAR          |
| U3 - Localização de postes e torres, poços de inspeção, subestações                  | 1 - 2 anos  | 0,25 - 0,6 m | Pancromático, LIDAR    |
| <b>Modelo Digital de Elevação (MDE)</b>                                              |             |              |                        |
| D1 - Modelo digital de superfície (MDS) e/ou modelo digital de terreno (MDT)         | 5 - 10 anos | 0,25 - 0,5 m | Estéreo Pan - V, LIDAR |
| D2 - Mapa de declividade (derivado do MDT)                                           | 5 - 10 anos | 0,25-0,5 m   | Estéreo Pan - V, LIDAR |

Tabela 6 - Relação entre os atributos urbanos/periurbanos e as resoluções mínimas de sensores remotos para o fornecimento desses dados (adaptado de JENSEN et al, 1999; JENSEN et al, 2004; JENSEN, 2005 *apud* JENSEN, 2009, p. 449).

| (conclusão)                                               |              |             |                  |
|-----------------------------------------------------------|--------------|-------------|------------------|
| Atributos                                                 | Temporal     | Espacial    | Espectral        |
| <b>Dados Meteorológicos</b>                               |              |             |                  |
| M1 - Previsão de tempo                                    | 3 - 25 min   | 1-8 km      | V-NIR-TIR        |
| M2 - Temperatura atual                                    | 3 - 25 min   | 1 - 8 km    | TIR              |
| M3 - Modo de tempo limpo e modo de precipitação           | 5-10 min     | 1 - 4 km    | WSR-88D Radar    |
| M4 - Modo de tempestade e condições adversas de tempo     | 5-10 min     | 1 - 4 km    | WSR-88D Radar    |
| M5 - Monitoramento do efeito de ilha de calor urbana      | 12 - 24 h    | 5-30 m      | TIR              |
| <b>Hidrologia Urbana</b>                                  |              |             |                  |
| H1 - Mapeamento da superfície impermeabilizada            | 1 - 5 anos   | 0,25 - 10 m | V-NIR-MIR, LIDAR |
| H2 - Fluxo de vazão e delimitação de planícies inundáveis | 1 - 5 anos   | 1 - 30 m    | V-NIR-MIR, LIDAR |
| <b>Identificação de Áreas Ambientais Críticas</b>         |              |             |                  |
| C1 - Ambientes estáveis sensíveis                         | 1 - 2 anos   | 1 - 10 m    | V-NIR-MIR        |
| C2 - Ambientes dinâmicos sensíveis                        | 1 - 6 meses  | 0,25 - 2 m  | V-NIR-MIR-TIR    |
| <b>Resposta a Emergências em Desastres</b>                |              |             |                  |
| DE1 - Imageamento pré-emergência                          | 1 - 5 anos   | 1 - 5 m     | Pan -V-NIR       |
| DE2 - Imageamento pós-emergência                          | 12h - 2 dias | 0,25 - 2 m  | Pan -NIR - Radar |
| DE3 - Estoque habitacional danificado                     | 1 - 2 dias   | 0,25 - 1 m  | Pan -NIR         |
| DE4 - Sistema de transporte danificado                    | 1 - 2 dias   | 0,25 - 1 m  | Pan -NIR         |
| DE5 - Rede de infraestrutura subterrânea danificada       | 1 - 2 dias   | 0,25 - 1 m  | Pan -NIR         |

No caso do sensoriamento remoto de solos, é importante ter em conta que a capacidade de sistemas espaciais não funciona da mesma forma que nos demais casos apresentados.

[...], não é realístico ter como expectativa que o sensoriamento remoto possa ser uma panaceia universal que permita executar mapeamentos de categorias de solos sem contar com coletas de dados in situ. Ao invés disso, é necessário entender que, sob certas condições, é possível que os dados de sensoriamento remoto tenham valor para o pedólogo na medida em que ele

colete todos os materiais pertinentes necessários para executar classificações de solos seguras (JENSEN, 2009, p. 515).

Dentre outras propriedades, o sensoriamento remoto pode contribuir na determinação da salinidade do solo, na detecção de matérias orgânicas, na detecção de óxido de ferro, sulfato de alumínio, quartzo, caulinita, buddingtonita, entre outros. Por possuírem distribuição espectral muito específica, normalmente a mineralogia remota requer sensores hiperespectrais. Infelizmente, vide citação anterior, a espectroscopia de cada um desses elementos não é constante, sendo necessária a consulta de bibliotecas de espectroscopia ou a medição de dados *in situ*.



## 5 Sensores

A chamada para ideias, a chamada para propostas e a avaliação dos alvos – incluindo o final da seção 4, ao lidar com os aspectos técnicos de alguns alvos de interesse frequente em sensoriamento remoto – culminam na definição da carga útil, o elemento mais importante da missão.

Quanto aos tipos de sensores remotos, podemos classificá-los segundo os grupos elencados na Figura 14.

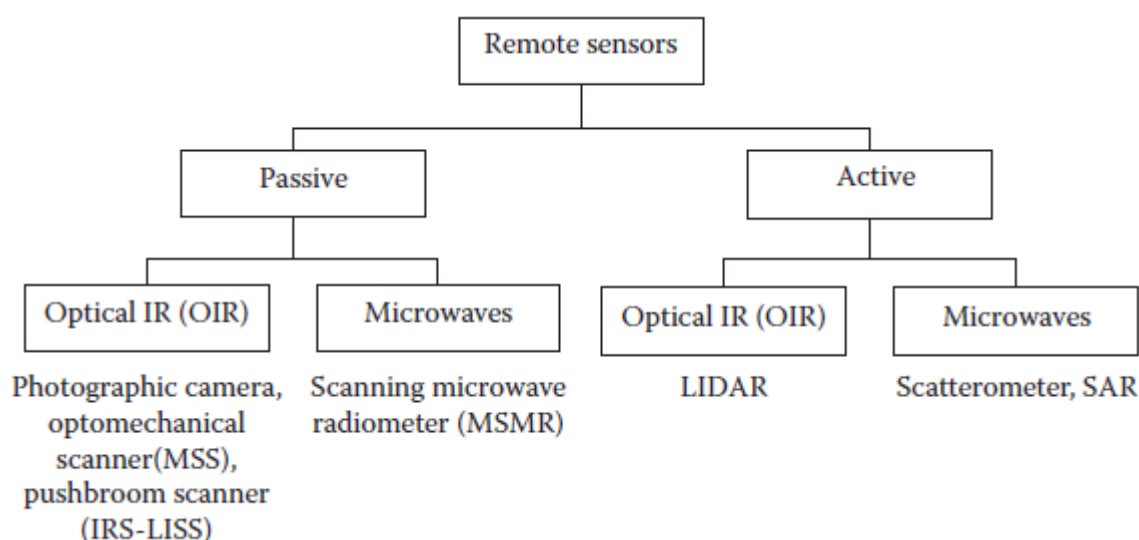


Figura 14 – Classificação de sensores remotos (JOSEPH, 2005 *apud* JOSEPH, 2015).

Conforme seção 1, o escopo deste trabalho limita-se aos sensores passivos ópticos.

Mais uma vez, ressalta-se que o *design* dos instrumentos ópticos é uma tarefa muito especializada. E, assim como nas seções anteriores, a proposta desta seção não é aprofundar o conhecimento do gerente nas nuances dos sensores, mas sim prepará-lo a emitir algum juízo de valor preliminar quando avaliando ou revisando as propostas de missão.

E, se até o ponto da escolha do alvo a ser observado temos aspectos bem definidos em termos de espectroscopia (vide as Tabelas 4, 5 e 6), as especificações de uma câmera de sensoriamento remoto envolvem *trades* entre seus parâmetros característicos.

Then the important question is, “What is the optimum set of specifications for a remote sensor?” Unfortunately, there is no unique answer, since the

choice of the optimum parameters depends on the theme under study. Even if we identify an ideal set of parameters, the realization of a combination of these ideal parameters (i.e., spatial resolution, number of spectral bands, spectral bandwidth, and signal-to-noise ratio) in a sensor system is a complex problem due to the strong interrelationship these parameters have with one another and the engineering requirements of the sensor (JOSEPH 2015, p. 76).

## 5.1 Domínios

Podemos considerar os parâmetros de um sensor segundo 4 domínios: espacial, espectral, radiométrico e temporal (JOSEPH, 2015, p. 76). Antes de explorar tais domínios, pode restar a pergunta: “Por que o gerente supostamente deveria aprofundar seus conhecimentos em um subsistema tão especializado?”. Conforme será apresentado adiante, a razão é que parâmetros como resolução espacial não podem ser definidos por um único parâmetro. Assim, é preciso cautela ao supor que quanto maior a resolução, melhor.

Um adendo interessante sobre as resoluções é que algumas unidades com que são apresentadas não são exatamente intuitivas. Uma maior resolução espacial significa um menor valor de comprimento (e.g., considerando um satélite com resolução espacial nominal de 30m e outro com 50m, o primeiro tem resolução espacial maior que o segundo). A lógica é a mesma para a resolução espectral (em uma mesma banda) e para resolução temporal, mas não para resolução radiométrica (nesta, quanto maior o número de bits, maior a resolução radiométrica). No caso das três primeiras, portanto, pode-se pensar como uma razão entre uma cena e o valor nominal apresentado.

### 5.1.1 Resolução espacial

Primeiramente, é importante definir o conceito de *Instantaneous Geometric Field of View* (IGFOV). O IGFOV corresponde ao o tamanho geométrico da imagem projetada pelo detector no solo através do sistema óptico (JOSEPH, 2015, p. 78). Muito embora o IGFOV corresponda a uma área, o comprimento do lado é o comumente apresentado como resolução espacial de um satélite (em nadir). A Figura 15 ilustra os conceitos de IGFOV, *Field of View* (FOV), *Instantaneous Field of View* (IFOV) e *swath*.

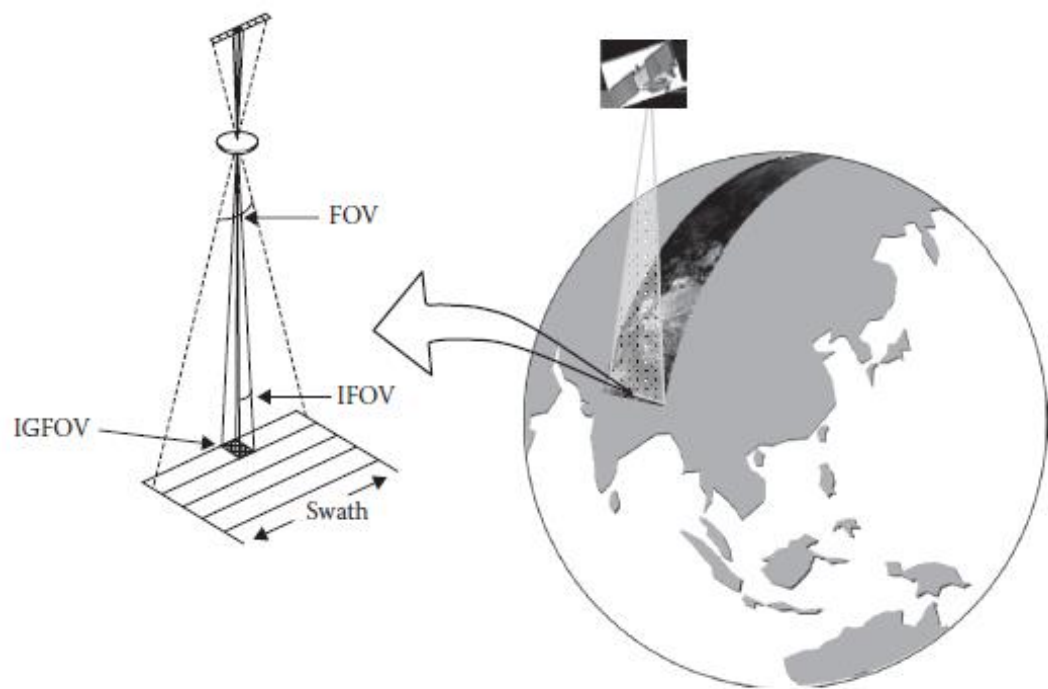


Figura 15 – Ilustração esquemática do conceito de FOV, IFOV e IGFOV (JOSEPH, 2005 *apud* JOSEPH, 2015, p. 79).

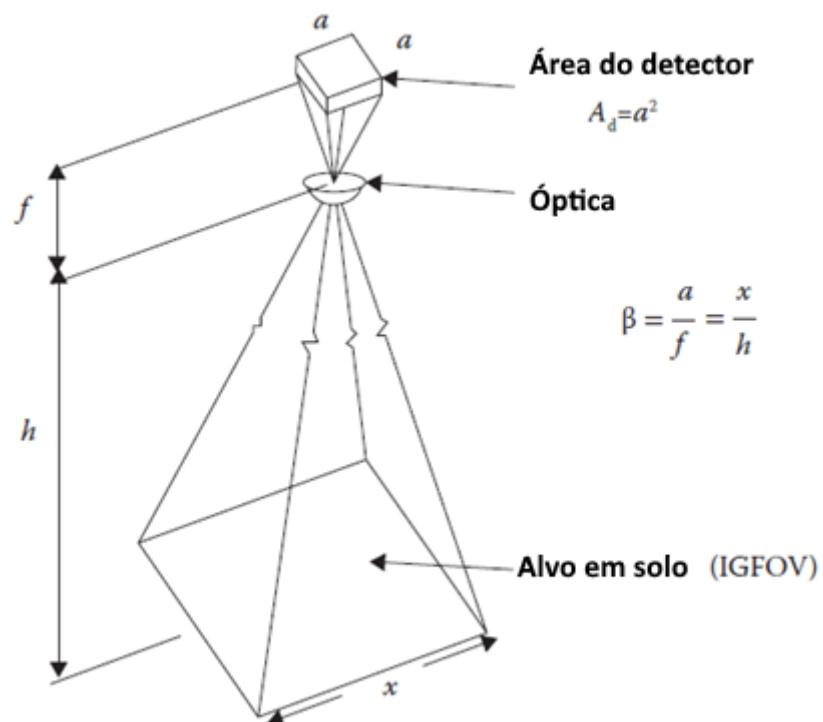


Figura 16 – Geometria de um sistema de imageamento óptico (JOSEPH, 2005 *apud* JOSEPH, 2015, p. 32, adaptado).

Consideremos agora a variável MTF (*Modulation Transfer Function*) como uma medida de degradação da imagem. Essa variável varia de 0 a 1, onde 1 representa uma imagem sem degradação. O MTF geral de um sistema de imagem é dado por (JOSEPH, 2015, p. 29):

$$MTF_{System} = MTF_{Optics} \times MTF_{Detector} \times MTF_{Image\ motion} \times MTF_{Atmosphere} \times \dots \quad (2)$$

Assim, em dois sensores com mesma resolução espacial nominal (i.e., com mesmo IGFOV), o que tiver maior MTF, a priori, teria maior qualidade de imagem.

Infelizmente, mesmo um maior MTF e maior resolução espacial não são suficientes para determinar qual sensor possui a maior qualidade de imagem. Isso ocorre porque a maneira como a função de transferência é calculada importa, sobretudo considerando o quanto o cálculo do MTF reduz o contraste entre objetos adjacentes. Se esses objetos estiverem abaixo do limite detectável pelo sistema, não serão detectados. “Portanto, objetos menores de maior contraste podem ser detectados em comparação com objetos maiores que têm menos contraste” (JOSEPH, 2015, p. 80). Assim, para diferenciar mais níveis de contraste, é necessária uma maior resolução radiométrica. Não obstante, além do IGFOV, MTF e resolução radiométrica, outro parâmetro essencial é a relação sinal ruído: uma câmera com maior razão sinal ruído e baixo MTF pode apresentar imagem de mais qualidade do que uma com alto MTF, mas baixa razão sinal ruído (JOSEPH, 2015, p. 81).

Embora os cálculos dessas características – em separado – não sejam excepcionalmente complexos, sua interrelação a fim de estabelecer um critério simples de resolução espacial ainda é um problema. Por essa razão, o IGFOV apenas não deve ser encarado como um requisito absoluto no PDD quanto ao critério separação de alvos adjacentes. A subseção 5.2 irá propor algumas métricas para avaliação da performance de sensores ópticos.

All the above explanations point out that it is not possible to define spatial resolution by a single performance parameter. Therefore, to name a single performance parameter to compare different sensors, to establish their capability to resolve smallest object, is an unresolved task (JOSEPH, 2015, p. 81).

### 5.1.2 Resolução espectral

Antes de definir resolução espectral, é importante diferenciar sensores multiespectrais de hiperespectrais. Enquanto esse provê leituras da radiação ao longo do espectro em intervalos de comprimento de onda específicos, este faz medições contínuas ao longo do espectro eletromagnético em bandas relativamente mais estreitas (quando comparadas às bandas de sensores multiespectrais) (JOSEPH, 2015, p. 251). Por essa razão, a mineralogia por sensoriamento remoto é realizada frequentemente por sensores hiperespectrais. A Figura 17 ilustra o problema de identificar minerais a partir de um sensor multiespectral.

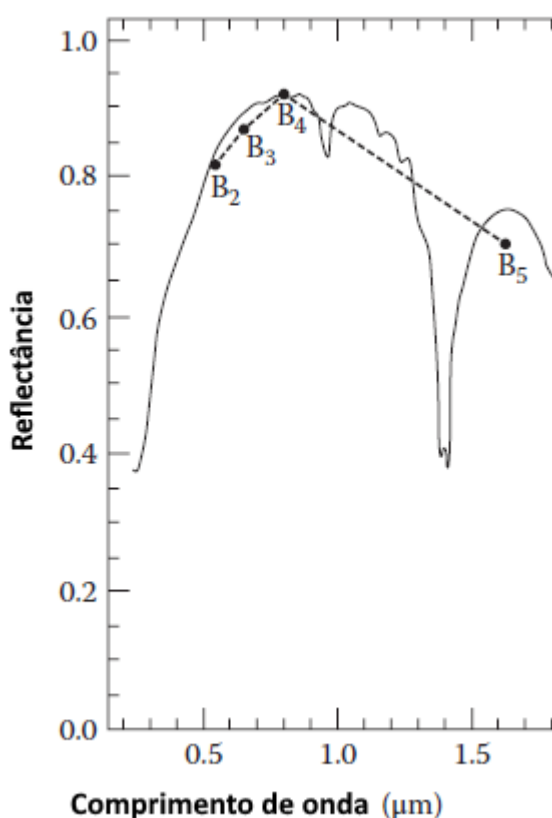


Figura 17 - Espectros de reflectância do haloisita mineral. A curva sólida fornece os dados do espectrômetro de laboratório e a curva pontilhada mostra como os espectros serão se os dados forem obtidos através do IRS LISS-3 (JOSEPH, 2015, p. 252, adaptado).

Apesar de fornecerem mais dados que sensores multiespectrais, sensores hiperespectrais têm sua resolução espectral limitada pela razão sinal ruído; em outras

palavras, resoluções espaciais maiores implicam resoluções espectrais menores em sensores hiperespectrais.

A resolução espectral é dada pelo “número e a dimensão (tamanho) de intervalos de comprimentos de onda específicos (chamados de bandas ou canais) no espectro eletromagnético aos quais um instrumento de sensoriamento remoto é sensível” (JENSEN, 2009, p. 16). Por isso, embora muitas vezes mencionada apenas como o valor da diferença entre os comprimentos de onda superior e inferior de uma banda, a resolução espectral não deve ser dada apenas por um valor em sua especificação, uma vez que sua definição diz respeito tanto à largura de banda quanto à quantidade de bandas de um sensor – e, evidentemente, se o sensor é multiespectral ou hiperespectral.

Existem diversos aspectos importantes com relação a resolução espectral de um sensor. Dentre as mais importantes, pode-se citar:

- a) Considerar o percentual tolerável de radiação admitida fora das bandas estipuladas (embora se apresentem como precisamente especificadas, na prática os filtros de banda passa-faixa admitem alguma radiação fora dos intervalos nominais das bandas);
- b) A utilização de bandas da janela atmosférica (i.e., bandas onde não excessiva atenuação da radiação pela atmosfera). Geralmente, essas bandas estão localizadas em 0,4 - 1,3; 1,5 - 1,8; 2,0 - 2,26; 3,0 - 3,6; 4,2 - 5,0; e 7,0 – 15,0  $\mu\text{m}$  e entre 1 - 30 cm (JOSEPH, 2015, p. 31);
- c) Em sensores multiespectrais, adotar o mínimo de bandas necessárias para atender à demanda desejada pelo cliente com respeito ao alvo (em outras palavras, excesso de bandas provocam informações redundantes que dificultam discriminar o alvo) (JOSEPH, 2015, p. 86).

O item c) deve ser cuidadosamente avaliado pelo gerente de projeto. Na medida que uma carga útil cujo sensor ofereça muito mais bandas que as necessárias para observar o alvo, não apenas o sensor será mais caro como potencialmente o excesso de informações coletadas nas diversas bandas dificultará o próprio estudo do alvo. Por outro lado, se a intenção do consumidor é analisar o perfil espectral de um corpo d'água ou de uma certa vegetação, o recomendado é prover bandas no visível e no infravermelho, com larguras de banda

adequadas. Como exemplo, Joseph (2015, p. 85) cita que oceanos são usualmente observados em larguras de banda entre 10 e 20 nm (i.e., diferença entre comprimentos de onda superior e inferior de uma dada banda), compatível, portanto, com a identificação de sedimentos na água apresentada na Tabela 5.

### **5.1.3 Resolução radiométrica**

A resolução radiométrica é frequentemente definida apenas por um parâmetro: o número de bits de quantização. O número de bits determina a quantidade de níveis com que a radiação percebida pelo sistema é separada (e.g., 7 bits de quantização implicam em  $2^7$  (128) níveis discretos).

Assim como nos demais domínios, a resolução radiométrica não deve ser tomada isoladamente como um requisito. A razão sinal ruído e a radiação de saturação (que equivale à intensidade de radiação que ocupará o maior nível da quantização) são relevantes quando avaliando a resolução radiométrica porque dizem respeito a como o sinal é distribuído ao longo dos níveis. Em outras palavras, ainda que o sensor possua muitos níveis de quantização, se a razão sinal ruído for inadequada ao tipo de alvo observado, a resolução radiométrica deste sensor não será melhor do que a de um outro sensor com menos níveis de quantização, mas melhor razão sinal ruído (JOSEPH, 2015, p. 88).

Finalmente, a despeito das considerações anteriores, Joseph (2015, p. 88) aponta haver vantagem em um sensor com maiores níveis de quantização: mais níveis permitem que alvos de reflectância diferentes possam ser capturados em uma única cena sem necessariamente variar o ganho.

### **5.1.4 Resolução temporal**

A resolução temporal é a frequência com que um satélite pode capturar uma mesma cena, normalmente expressa em dias (JOSEPH, 2015, p. 90). Satélites com maiores faixas de visada (*SWATH*), terão resoluções temporais maiores, ou seja, levam menos dias para capturar uma mesma cena sob o mesmo ângulo.

No caso da resolução temporal, o gerente deve estar atento à sutil diferença entre capacidade de revisita e a resolução temporal. A capacidade de revisita de um satélite pode ser maior que sua resolução temporal se este puder variar a direção da câmera. Nesse caso, a

cena que normalmente seria detectada se não houvesse variação da direção da câmera precisará de uma nova revisita para ser capturada (JOSEPH, 2015, p. 90).

### 5.1.5 Exemplos de *trade-offs* entre domínios

A seção 4 deste trabalho dedica-se a explorar as características espectrais de alvos frequentes. A complexidade dos diversos parâmetros técnicos de um sensor óptico requer um alvo bem definido a fim de atender às expectativas do cliente.

Joseph (2015, p. 90 - 91), cita alguns interessantes exemplos de *trade-offs*, a saber:

- a) Aumentar a resolução espacial implica reduzir o IFOV, o que reduz a energia coletada pelo sensor, reduzindo a razão sinal ruído, o que leva a um empobrecimento da resolução radiométrica;
- b) Mantendo a resolução espacial, é possível melhorar a resolução radiométrica aumentando a largura de banda (absorvendo assim mais energia), ou seja, reduzindo a resolução espectral.

## 5.2 Critérios para avaliação de performance

Estabelecer os requisitos da carga útil depende fundamentalmente do alvo. O alvo determina características primárias como resolução espacial, espectral ou temporal. Por outro lado, num processo de elaboração de requisitos, fixar tais parâmetros pode facilmente inviabilizar soluções de projeto que seriam adequadas para estudar o alvo em questão.

Assim, uma possibilidade para estipular requisitos de performance seria através do grau de interpretação possível a partir da qualidade da imagem. Tal critério existe e é conhecido como NIIRS (*National Image Interpretation Rating Scales*). Infelizmente, embora útil, o critério não é universalmente adotado, donde nem sempre é viável estipular uma nota NIIRS como requisito de projeto (JENSEN, 2009, p. 452).



Outro critério útil é o critério de Johnson, segundo o qual são estabelecidos o número mínimo de pares de linhas por dimensão para alcançar 50% de probabilidade de sucesso em diversas tarefas de reconhecimento (JOSEPH, 2015, p. 82). O critério de Johnson será mais bem explicado na subseção 5.2.2.

Ademais, ainda que os critérios supracitados busquem não restringir as soluções de projeto dos instrumentos ópticos, não raro será necessário comparar dois ou mais sensores. Esse caso será abordado na subseção 5.2.4.

### **5.2.1 O critério NIIRS**

“Os critérios de NIIRS constituem a métrica usada pela comunidade de inteligência norte-americana para caracterizar a utilidade de imagens com propósitos de inteligência” (LEACHTENAUER et al., 1998; LOGICON, 1997; PIKE, 2006; FAS, 2006 *apud* JENSEN, 2009, p. 452). São divididos em 10 níveis de avaliação (0-9) para um determinado tipo de imagem, onde 0 é a pior qualidade e 9 é a melhor qualidade.

Trata-se de uma classificação da interpretação da imagem baseada na resolução espacial, qualidade do filme, bruma atmosférica, contraste, ângulo de visada e ruído (JENSEN, 2009, p. 452).

A Tabela 7 elenca os níveis NIIRS no espectro visível (o critério possui equivalências em infravermelho, multiespectral e radar) com suas respectivas descrições no âmbito de uso civil. Note-se que apesar do esforço em detalhar o critério da maneira mais completa possível, o padrão NIIRS ainda é subjetivo, na medida em que dois analistas podem classificar uma mesma imagem em níveis diferentes.

Tabela 7 – Critério NIIRS civil para o espectro visível (FAS, 1996, tradução nossa).

(continua)

| Nível          | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nível 0</b> | A interpretabilidade das imagens é impedida por obscurecimento, degradação ou resolução muito baixa.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Nível 1</b> | Distinção entre as principais classes de uso da terra (por exemplo, urbana, agrícola, floresta, água, estéril).<br>Detecção uma instalação portuária de tamanho médio.<br>Distinção entre pistas e pistas de táxi em um grande aeroporto.<br>Identificação de padrões de drenagem de grandes áreas por tipo (por exemplo, dendrítico, treliça, radial).                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Nível 2</b> | Identificação de campos irrigados com pivô central grande (ou seja, com mais de 160 acres) durante a estação de crescimento.<br>Detecção grandes edifícios (por exemplo, hospitais, fábricas).<br>Identificação padrões de estradas, como folhas de trevo, nos principais sistemas rodoviários.<br>Detecção de faixas do quebra-gelo.<br>Detecção da esteira de um navio grande (por exemplo, maior que 300m).                                                                                                                                                                                  |
| <b>Nível 3</b> | Detecção do contorno de áreas grandes (ou seja, maiores que 160 acres).<br>Detecção de casas individuais em bairros residenciais.<br>Detecção de trens ou linhas de material rodante padrão nos trilhos da ferrovia (não em carros individuais).<br>Identificação de vias navegáveis interiores navegáveis por barcas.<br>Distinção entre áreas florestais e pomares naturais.                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Nível 4</b> | Identificação de edifícios agrícolas como celeiros, silos ou residências.<br>Contagem de trilhos de trem desocupados ao longo da faixa de passagem ou no pátio de uma ferrovia.<br>Detecção de quadra de basquete, quadra de tênis, quadra de vôlei em áreas urbanas.<br>Identificação faixas individuais, pares de trilhos, torres de controle, pontos de comutação em pátios ferroviários.<br>Detecção trilhas de jipe pelas pastagens.                                                                                                                                                       |
| <b>Nível 5</b> | Identificação de plantações de árvores de Natal.<br>Identificação de vagões individuais por tipo (por exemplo, gôndola, apartamento, caixa) e locomotivas por tipo (por exemplo, vapor, diesel).<br>Detecção de portas de compartimento abertas dos edifícios de armazenamento de veículos.<br>Identificação de tendas (maiores que duas pessoas) em áreas de acampamento recreativas estabelecidas.<br>Distinção entre estandes de árvores coníferas e caducifólias durante a condição de folga.<br>Detecção de animais grandes (por exemplo, elefantes, rinocerontes, girafas) nas pastagens. |

Tabela 7 – Critério NIIRS civil para o espectro visível (FAS, 1996, tradução nossa).

(conclusão)

| Nível          | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nível 6</b> | <p>Detecção de plantação de narcóticos com base na textura.</p> <p>Distinção entre culturas em linha (por exemplo, milho, soja) e culturas de grãos pequenos (por exemplo, trigo, aveia).</p> <p>Identificação de automóveis como sedãs ou peruas.</p> <p>Identificação de cabines telefônicas / postes elétricos em bairros residenciais.</p> <p>Detecção de trilhas a pé por áreas áridas.</p>                                                              |
| <b>Nível 7</b> | <p>Identificação de plantas de algodão maduras individuais em um campo de algodão conhecido.</p> <p>Identificação de ligações ferroviárias individuais.</p> <p>Detecção de degraus individuais em uma escada.</p> <p>Detecção de tocos e rochas em clareiras e prados da floresta.</p>                                                                                                                                                                        |
| <b>Nível 8</b> | <p>Contagem de porcos individuais.</p> <p>Identificação de um conjunto de referência do Serviço Geológico dos Estados Unidos em uma superfície pavimentada.</p> <p>Identificação dos detalhes da grade e / ou a matrícula em um veículo do tipo passageiro / caminhão.</p> <p>Identificação de mudas de pinheiro individuais.</p> <p>Identificação de nenúfares individuais em uma lagoa.</p> <p>Identificação de limpadores de pára-brisa em um veículo.</p> |
| <b>Nível 9</b> | <p>Identificação de grãos individuais em plantação de grãos pequenos (por exemplo, trigo, aveia, cevada).</p> <p>Identificação de farpas individuais em uma cerca de arame farpado.</p> <p>Detecção de picos individuais em ligações ferroviárias.</p> <p>Identificação de cachos individuais de agulhas de pinheiro.</p> <p>Identificação de uma marca auricular em animais de caça de grande porte (por exemplo, veados, alces, alces).</p>                 |

### 5.2.2 O critério de Johnson

Para entendermos o critério de Johnson, é necessário antes compreender o conceito de par de linhas. Suponhamos um alvo que consista em 3 linhas pretas e 2 linhas brancas (vide Figura 18), todas de mesmas dimensões, compondo um quadrado. Se as linhas pretas puderem ser identificadas separadamente pelo sensor, então são chamadas de espacialmente resolvidas. A menor distância composta por uma linha preta e uma linha branca – em um alvo cujas

linhas pretas estejam espacialmente resolvidas – é definida como o comprimento de um par de linhas (LIU, 2006, n.p.).

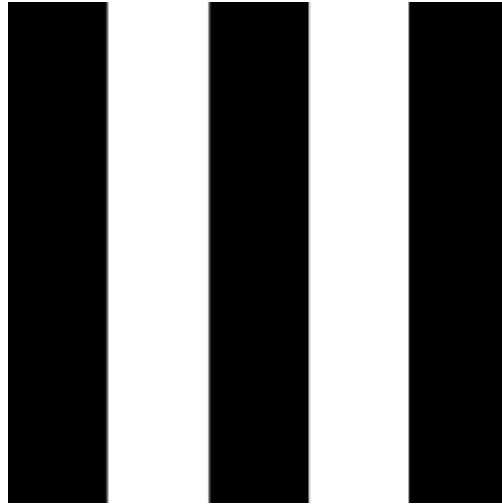


Figura 18 – Exemplo de alvo.

Chamando por  $d$  o comprimento de um par de linhas,  $f_J = \frac{1}{d}$  é a maior frequência espacial passível de ser capturada pelo sensor. Multiplicando-se o comprimento do alvo  $c$  por  $f_J$ , temos  $p = \frac{c}{d}$ , onde  $p$  é o número de par linhas por alvo. Pelo critério de Johnson, há 50% de probabilidade de sucesso para (JOSEPH, 2015, p. 82):

- a) Detectar se um alvo está presente na cena se  $p = 1$  ;
- b) Reconhecer o alvo (i.e., o alvo é um tanque ou um caminhão) se  $p = 3$  ;
- c) Identificar o alvo (i.e., o tipo de tanque) se  $p = 6$ .

### 5.2.3 Relação entre os critérios NIIRS e de Johnson

Apesar da aparente utilidade dos critérios, infelizmente ambos não são livres de subjetividades, uma vez que dependem da capacidade e/ou experiência do observador da imagem para classificá-la em qualquer dos critérios. Ainda assim, é possível traçar alguma correlação entre os critérios NIIRS e de Johnson, vide Figura 19.

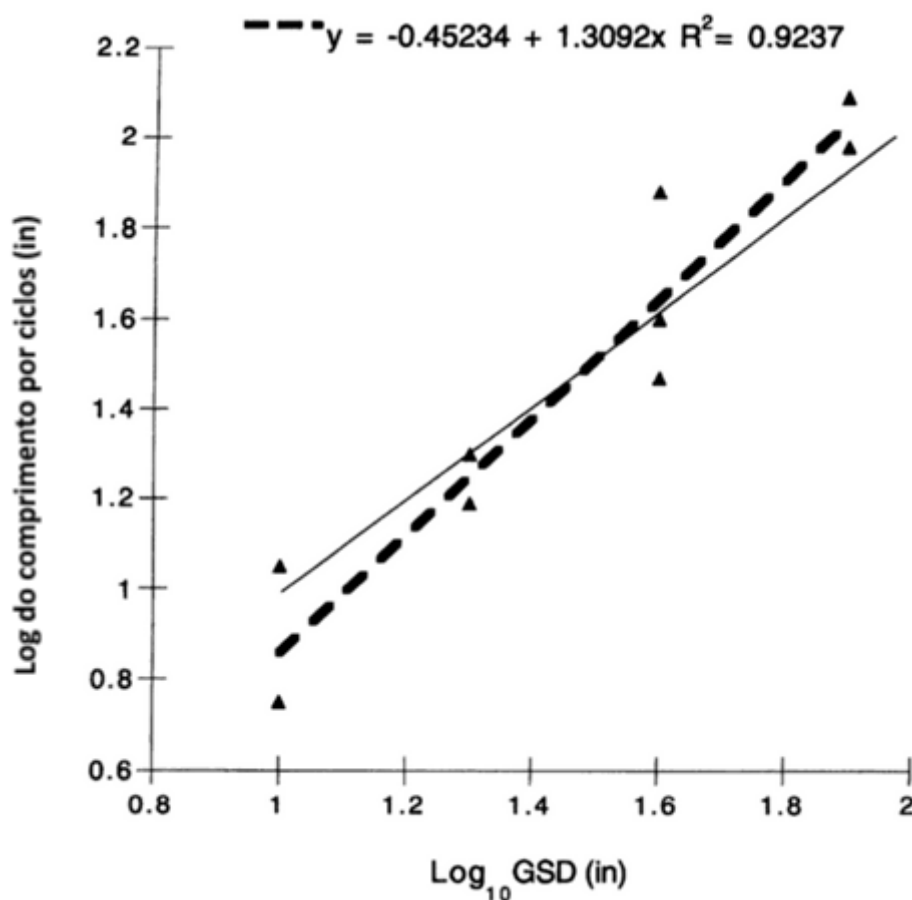


Figura 19 – Relação entre os critérios NIIRS e de Johnson para algumas amostras de distância do solo. (LEACHTENAUER; DRIGGERS, 2001, p. 352, adaptado)

A compreensão da Figura 19 não é direta. Na prática, o eixo vertical diz respeito ao logaritmo da distância entre os pares de linha necessários para cumprir o requisito de Johnson e o eixo horizontal corresponde ao logaritmo da distância em solo para a classificação equivalente em NIIRS. Embora individualmente os pontos (triangulares no gráfico) possam apresentar razões de até 2:1, a linha de tendência representativa do critério de Johnson (pontilhada) se aproxima da linha correspondente à correlação 1:1.

#### 5.2.4 Avaliação de sensores como critério

Conforme exposto nas subseções acima, a definição de critérios precisos para definir a carga útil de um satélite é uma tarefa complexa e envolve soluções de compromisso. Contudo, Joseph (2015, p. 91), elenca os seguintes parâmetros como recomendados para serem especificados em qualquer missão de observação da Terra:

Tabela 8 – Parâmetros recomendados para especificação de performance em EOS (JOSEPH, 2015, p. 91 - 92).

| Domínio      | Parâmetro                                       |
|--------------|-------------------------------------------------|
| Espacial     | IFOV/IGFOV                                      |
|              | EIFOV                                           |
|              | RAIFOV                                          |
|              | FOV/Swath                                       |
|              | MTF em IFOV                                     |
|              | MTF no dobro IFOV                               |
| Espectral    | Comprimento de onda central                     |
|              | Largura de banda (usando o método dos momentos) |
|              | Contribuição de radiação fora da banda          |
| Radiométrica | Radiação de saturação                           |
|              | Sinal/ruído em 90% Sinal/ruído em 10% SR        |
|              | Número de bits de quantização                   |

Como não foram apresentados anteriormente, seguem os conceitos de EIFOV (*Effective Instantaneous Field of View*) e RAIFOV (*Radiometrically Accurate Instantaneous Field of View*).

- a) O EIFOV é definido como a resolução na qual o MTF do sistema é de 50% (JOSEPH, 2015, p. 80 - 81);
- b) O RAIFOV é definido como a resolução para a qual o MTF é maior que 95% (JOSEPH, 2015, p. 80 - 81).

## 6 Interações pós definição da carga útil

É interessante notar que, a despeito da rica bibliografia existente nas diversas áreas de um sistema espacial, é particularmente difícil encontrar um guia que percorra os requisitos de um EOS em *top-down*.

As bibliografias especializadas, que tratam dos subsistemas eletrônicos, ópticos, de controle, lançamento, dentre outras, são fartas e estão em constante evolução. Novas tecnologias fazem surgir novos conceitos e trabalhos acadêmicos no sentido de tornar um EOS mais barato e com mais capacidade de captura e interpretação de imagens.

No sentido de gerenciar todos os subsistemas supra, há também uma engenharia de sistemas cujas técnicas e ferramentas de controle (e.g., *softwares*) dão suporte ao gerente no exercício de suas funções. “A engenharia de sistemas é uma disciplina de engenharia bem consolidada, enquanto a arquitetura de sistemas ainda não é tão conhecida” (AGUIRRE, 2013, p, 23, tradução nossa).

Aliás, o problema apontado por Aguirre (2013, p. 23) no parágrafo anterior remete à dificuldade reportada no início desta seção. Isso acontece porque as variáveis de interface dos diversos subsistemas não percorrem um único sentido, conforme as Figuras 2, 3, 4 e 7. Além disso, arquitetar um sistema requer uma série de conhecimentos tácitos que raramente são divulgados pelas agências ou publicados em trabalhos acadêmicos. Não obstante, alguns poucos documentos que procuram registrar tais conhecimentos são frequentemente compilados em *handbooks*, que parecem funcionar como uma espécie de coletânea de boas práticas em engenharia de sistemas. Apesar de valorosos, esses *handbooks* não são suficientes para amparar o gerente nas decisões técnicas.

Até este ponto do presente trabalho, foi proposto um caminho razoavelmente linear para o gerente: apresentam-se as áreas de interesse, filtram-se as propostas mais relevantes, avaliam-se os alvos mais valorosos e define-se a carga útil. As seções anteriores buscaram mostrar que cada um dos passos mencionados envolve nuances que não devem ser desmerecidas pelo gerente, a fim de evitar uma falha na definição do projeto que acarrete grandes custos posteriormente, vide Figura 1. Mas, supondo que o gerente tenha chegado até a definição dos sensores (seção 5 deste trabalho), o que fazer depois?

Mais uma vez, não há resposta única e este trabalho não se propõe a substituir a experiência do gerente de sistemas ou da equipe do projeto. Mas, segundo o objetivo apresentado na subseção 1.4 e os passos apresentados na subseção 3.1.1, cumpre seguir algum protocolo referenciado na literatura. E o protocolo escolhido está baseado no *Observation Payload Design Process*, de Larson e Wertz (1999, p. 287 - 290), exceto que alguns dos valores de entrada serão dados pela escolha da carga útil.

## 6.1 Valores iniciais para iterações

Em qualquer processo iterativo, é necessário arbitrar valores iniciais de uma ou mais variáveis a fim de fazê-las convergir através de cada iteração. Em sistemas espaciais, essa tarefa é especialmente complicada porque as variáveis afetam mais de uma equação ao mesmo tempo, de forma que o ajustar o projeto requer tempo e uma boa dose de intervenções manuais.

Nesse sentido, o projetista deve escolher quais variáveis priorizar, ou seja, quais parâmetros mantém constantes (i.e., as variáveis prioritárias) e quais parâmetros faz variar a fim de chegar a uma solução. Na verdade, boa parte deste trabalho se resume a justificar tecnicamente quais devem ser as variáveis prioritárias do projeto.

E muito embora as seções 3, 4 e 5 descrevam um caminho razoavelmente linear em que se busca demonstrar critérios para escolha do alvo e, em seguida, da carga útil, não se pode perder de vista que é a necessidade do cliente que formaliza o alvo, que por sua vez formaliza a carga útil. Os instrumentos ópticos podem ser os elementos mais importantes do sistema, mas o sistema só deve existir e só será útil se atender à necessidade formal do cliente (por isso a importância do *Mission Statement* e do *Mission Requirements*).

Por tais razões, este trabalho considera que os dados produzidos pelo satélite são as variáveis prioritárias. E, se eventualmente a manutenção da qualidade da imagem implicar em custos acima do orçamento previsto, melhor considerar não seguir adiante com o projeto. Segundo uma máxima no *design* de sistemas heurísticos: “clientes vão aceitar atrasos, mas só vão tolerar custos acima do orçamento com extrema dificuldade” (AGUIRRE, 2013, p. 101, tradução nossa).



Suponhamos que o alvo escolhido tenha sido o monitoramento de desastres em perímetro urbano. De acordo com a Tabela 3, o monitoramento de desastres compõe a missão dos seguintes sensores: *Infrared Scanner (IRS)*, *Hodoyoshi-1*, *Low-Resolution Camera and Medium-Resolution Camera (in Hodoyoshi-3)*, *High-Resolution Camera (in Hodoyoshi-4)*, *Medium Resolution Imaging Spectrometer for Ocean Colour (MERIS)* e *IKONOS*.

Por outro lado, em perímetros urbanos, vide a seção 4.2.3 e principalmente a Tabela 6, os critérios mais importantes são: a alta resolução espacial (de ordem métrica ou submétrica) e a alta resolução temporal (de ordem diária). Dentre as possibilidades elencadas no parágrafo anterior, o *IKONOS* (descomissionado em 2015) é o mais adequado.

A aproximação mais direta para estimar tamanho, peso e consumo de uma carga útil é a partir de sistemas pré-existentes (LARSON, WERTZ, 1999, p. 285). Por isso a importância de determinarmos o sensor (no caso deste exemplo, o *IKONOS*).

Além do método supracitado, Larson e Wertz (1999, p. 285) propõem uma estimativa mais precisa a partir do diâmetro de abertura do sensor. Dado que o alvo diz respeito a perímetros urbanos, a prioridade é uma alta resolução espacial. Utilizando a equação da resolução angular (JOSEPH, 2015, p. 77), temos:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (3)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de abertura do sensor,  $\lambda$  é o comprimento de onda central da banda em questão e  $D$  é o diâmetro de abertura do sensor.

Suponhamos, portanto, uma resolução espacial de 2 metros considerando o espectro pancromático. Embora o comprimento de onda central na banda pancromática varie, tomaremos o intervalo da *IKONOS* (526 nm – 929 nm). Nesse caso, temos:

$$\lambda = \frac{0.526 + 0.929}{2} = 0.727 \text{ } \mu\text{m} \quad (4)$$

$$2 = \theta \times h = 1.22 \frac{\lambda}{D} \times h \therefore D = 0.443h \text{ } \mu\text{m} \quad (5)$$

Onde  $h$  é altitude do satélite. Note-se aí um primeiro *trade-off*, em que foi priorizada a resolução espacial: quanto maior  $h$ , pior a resolução. E antes que possa parecer estranho aumentar  $h$  (maior  $h$ , via de regra, implica em maior custo de lançamento), lembremos que quanto maior a altitude, maior o tempo de vida da missão. Ainda, antes de prosseguir, vale a pena notar, vide equação (5), o porquê a resolução no pancromático é normalmente maior que em outras bandas: como a largura de banda é maior, começando em comprimentos de onda na faixa do ultravioleta e indo até os comprimentos de onda em faixas do infravermelho, o comprimento de onda central é maior do que tomando apenas a banda correspondente ao verde, por exemplo.

De acordo com Larson e Wertz (1999, p. 275), a abertura de referência  $A_o$  para um satélite cujo propósito seja o monitoramento de recursos (a exemplo do *Thematic Mapper*), é de 0.406 m. Assim, a razão de abertura  $R$  vale (LARSON, WERTZ, 1999, p. 285):

$$R = \frac{D}{A_o} = \frac{0.443h \times 10^{-6}}{40.6 \times 10^{-2}} = 1.0911h \times 10^{-6} \quad (6)$$

Da mesma forma que  $A_o$ , o comprimento de referência  $L_o$  (sendo conservador, tomando a maior medida), o peso de referência  $W_o$  e o consumo de referência  $P_o$  estão expressos nas equações abaixo (LARSON, WERTZ, 1999, p. 285):

$$L_i \approx RL_o = (1.0911h \times 10^{-6}) \times 2 = 2.1822h \times 10^{-6} \text{ m} \quad (7)$$

$$S_i \approx L_i^2 = (2.1822h \times 10^{-6})^2 = 4.762h^2 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \quad (8)$$

$$V_i \approx L_i^3 = (2.1822h \times 10^{-6})^3 = 10.3916h^3 \times 10^{-18} \text{ m}^3 \quad (9)$$

$$W_i \approx KR^3W_o = K(1.0911h \times 10^{-6})^3 \cdot (239) = 310.4499Kh^3 \times 10^{-18} \text{ kg} \quad (10)$$

$$P_i \approx KR^3P_o = K(1.0911h \times 10^{-6})^3 \cdot (280) = 363.707Kh^3 \times 10^{-18} \text{ W} \quad (11)$$

Onde  $L_i, S_i, V_i, W_i, P_i$  são o comprimento, área, volume, peso e consumo estimados do satélite, respectivamente. Ainda, o parâmetro  $K$  vale 2, se  $R < 0.5$  ou, caso contrário,  $K$  vale 1. As equações de (7) à (11) não apenas estimam os parâmetros da carga útil em função da altitude do satélite, bem como fornecem uma maneira para estimar o impacto em cada um dos parâmetros no caso de uma variação de  $h$ . Por exemplo, tomando a equação (8) e derivando-a em  $h$ , temos que a taxa de variação da área do satélite é – aproximadamente – função de  $2h$  (mantendo o parâmetro resolução espacial constante, conveniente para o caso de perímetro urbano).

De posse das equações que registram os *trades* das dimensões da carga útil em função da altitude da órbita, convém estipular valores iniciais para os parâmetros orbitais. Mais uma vez, é importante checar as indicações da bibliografia e os dados de satélites semelhantes. E, nesse caso, a órbita sol-síncrona sugerida por Larson e Wertz (1999, p. 180) de fato era a órbita do IKONOS antes de ser descomissionado. Aliás, a maior parte dos satélites de observação da Terra está em órbita sol-síncrona, entre 600km – 1000km (UNOOSA, 2019, n. p.).

Infelizmente, as estimativas de consumo de energia do satélite (não apenas da carga útil) e tempo de vida envolvem cálculos e simulações que fogem ao escopo deste trabalho. Mais uma vez, contudo, sugere-se adotar a altitude inicial de 700 km, uma vez que, nessa altitude, o clássico livro de *design* de missões espaciais de Larson e Wertz (1999, p. 208) possui uma série de dados ilustrados que dizem respeito à densidade atmosférica (principal fonte de arrasto e, por conseguinte, decaimento do satélite).

Da mesma forma, não se pode esperar que os valores iniciais propostos nessa subseção substituam exaustivas simulações e reuniões técnicas da fase de avaliação do projeto.

## 6.2 Tabela de ações

A fim de cumprir o objetivo deste trabalho, seguem as ações fundamentadas nas seções anteriores. Evidentemente, tais ações não registram todos os detalhes de cada passo nem registram toda a documentação necessária para cada projeto. Por outro lado, elencam-se aqui sugestões dos principais pontos de decisão do gerente.

Tabela 9 – Ordenação de ações sugeridas durante o projeto

(continua)

| # | Ação                   | Referência | Exemplo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---|------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Chamada para ideias    | Seção 3.1  | O Ministério da Ciência e Tecnologia divulga o edital de abertura para temas de missões espaciais. No edital está prevista a data limite para o envio das cartas de intenção e o prazo de 2 semanas para selecioná-las para a fase seguinte. No edital, constam os temas da Tabela 1.                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2 | Chamada para propostas | Seção 3.1  | Um comitê formado pelo ITA, pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e outros órgãos e rejeita as ideias de exploração de água em outros planetas e seleciona temas relacionados a emergência em locais de difícil acesso e monitoramento da malha viária e ferroviária em perímetros urbanos. As ideias selecionadas têm até 10 semanas para o envio de uma proposta formal.                                                                                                                                                                                                      |
| 3 | Peer review            | Seção 3.1  | O comitê aprova para a fase de avaliação as propostas dizem respeito ao: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoramento para fins de prevenção da poluição da água em locais de difícil acesso por terra na região amazônica que pode contaminar comunidades ribeirinhas;</li> <li>- Monitoramento para fins de prevenção da seca nas plantações de morango no centro oeste que fazem o país perder milhões de dólares anualmente; e</li> <li>- Monitoramento de ônibus subutilizados e superlotados no estado de São Paulo, a fim de melhor alocar as linhas.</li> </ul> |

Tabela 9 – Ordenação de ações sugeridas durante o projeto

(conclusão)

| # | Ação              | Referência             | Exemplo                                                                                                                                                                                                                                     |
|---|-------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                   | Seção 3.1              | Depois de meses de simulações, descarta-se o monitoramento da poluição da água essencialmente porque a tecnologia necessária ainda é insuficiente para avaliar com segurança suas condições.                                                |
| 4 | Fase de avaliação | Seção 4.2.2<br>Seção 6 | O monitoramento de ônibus é factível, mas é requerido NIIRS nível 6, o que implica em resoluções espaciais (e, por conseguinte, custos) mais elevados que o monitoramento da seca nos campos de morango. Estas seguem para fase de decisão. |
| 5 | Fase de decisão   | Seção 3.1              | O Ministério da Ciência e Tecnologia aprova o monitoramento dos campos e inicia-se a fase de implantação (Fase C).                                                                                                                          |

## 7 Conclusão e Sugestões

A seção 1 deste trabalho restringe o escopo, relata a problemática e apresenta os objetivos deste trabalho. Em síntese, trata-se de como estimar e/ou estipular parâmetros para um satélite de observação da Terra, dado que as características da missão implicam em múltiplas soluções de compromisso, requerendo do gerente justificativas para quais aspectos priorizar. A eventual falta de embasamento técnico nas decisões iniciais normalmente implica em grandes esforços financeiros nas fases intermediárias ou finais do projeto, demandando do gerente conhecimentos multidisciplinares a fim de não validar ou explorar soluções impraticáveis.

A revisão bibliográfica, na seção 2, apresenta os vieses de diversas literaturas utilizadas como referências básicas para este trabalho. Muito embora as obras tenham diversas conclusões comuns, as abordagens são diferentes e a experiência dos autores faz com que atribuam mais relevância a certos aspectos em detrimento de outros.

Após, a seção 3 fornece uma metodologia para o processo de escolha do alvo da observação. A definição precisa do alvo é fundamental para estabelecer o ponto de partida para o desenvolvimento do sistema. Além disso, a ordem em que o gerente realiza suas decisões impacta justamente nas restrições e requisitos que serão fornecidos ao longo do projeto às equipes dos diversos subsistemas. São elencados no capítulo, portanto, prazos e eventos de consulta (*call for ideas* e *call for proposal*) no intuito de subsidiar o gerente com as possibilidades de alvos e os efeitos desejados por suas observações.

Uma vez propostos, alvos de interesse frequente são explorados na seção 4. O alvo determina as principais escolhas dos componentes da carga útil e, sobretudo, indica ao gerente requisitos básicos na arquitetura do satélite. Tais requisitos básicos são aqueles que, sem adentrar em especificidades aprofundadas da carga útil, permitem ao gerente prontamente recomendar (ou não) uma missão espacial para um dado satélite.

Considerando as características espectrais dos alvos a serem observados, resta avaliar quais cargas úteis melhor se adequam à missão. Aliás, não obstante a influência de cada subsistema de um satélite em outro, o subsistema da carga útil, por si, conjuga domínios (e.g., resolução radiométrica e resolução espectral) mutuamente dependentes que operam em

relação inversa (i.e., aumentar a resolução espectral implica diminuir a resolução radiométrica).

O roteiro para a definição do alvo, o estudo de suas características espectrais e a análise da carga útil adequada provê ao gerente o embasamento necessário para definir as prioridades do sistema espacial. Vide a seção 6, atingir as expectativas do *stakeholder* requer especial atenção ao alvo e, por conseguinte, à carga útil. A conclusão deste trabalho (a despeito do caráter pragmático das demais seções) é a proposição de um método: estabelecidos os parâmetros da carga útil, os principais *trades* devem ser realizados nos domínios da órbita e do lançamento, a fim de garantir a qualidade das imagens e objetivo da missão.

Reter os conhecimentos tácitos dos projetos é um desafio, especialmente no que tange a como catalogá-los. Uma sugestão (adotada em diversos outros âmbitos, especialmente quando lidando com valores da ordem de milhões de reais) é o estabelecimento de um livro-diário do gerente, como forma de manter algum registro sobre os conhecimentos tácitos do projeto. Esse livro conteria todas as decisões – particularmente as mais difíceis – que o gerente tomara ao longo do projeto, além de ser uma forma de registrar temporalmente suas ações. Mesmo projetos malsucedidos poderiam ter seu aspecto sistêmico analisado a fim de evitar repetir o(s) erro(s). Um livro-diário – conjugado com uma base teórica formal – potencializa os ensinamentos aprendidos e permite aos próximos gerentes aprimorarem procedimentos de engenharia de sistemas, além de servir como guia para o próprio autor do diário em seus projetos futuros.

Finalmente, uma sugestão para trabalhos futuros consiste em quantificar o impacto da variação da altitude no consumo, massa e volume da carga útil, vide as equações (6) à (11).

## Referências

- AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **Nanossatélite ITASAT é lançado da Base de Vandenberg nos Estados Unidos**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <http://www.aeb.gov.br/nanossatelite-itasat-e-lancado-da-base-de-vandenberg-na-california-eua/>. Acesso em: 03 out. 2019.
- AGUIRRE, A. A. **Introduction to Space Systems**. New York: Springer, 2013.
- DARIUSZ, W.; ARKADIUSZ, B. **Analysis of the Adoption Rate of Building Information Modeling [BIM] and its Return on Investment [ROI]**. [S.l.]. Procedia Engineering, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/315359204\\_Analysis\\_of\\_the\\_Adoption\\_Rate\\_of\\_Building\\_Information\\_Modeling\\_BIM\\_and\\_its\\_Return\\_on\\_Investment\\_ROI/fulltext/58cd4b254585157b6dae3ffe/Analysis-of-the-Adoption-Rate-of-Building-Information-Modeling-BIM-and-its-Return-on-Investment-ROI.pdf](https://www.researchgate.net/publication/315359204_Analysis_of_the_Adoption_Rate_of_Building_Information_Modeling_BIM_and_its_Return_on_Investment_ROI/fulltext/58cd4b254585157b6dae3ffe/Analysis-of-the-Adoption-Rate-of-Building-Information-Modeling-BIM-and-its-Return-on-Investment-ROI.pdf). Acesso em: 4 de out. 2019.
- ESA. **Call For Ideas on Commercially-Driven Research in Space**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://business.esa.int/taxonomy/term/13> Acesso em: 24 de out. 2019.
- EUROPEAN SPACE IMAGING. **Ikonos Data Sheet**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: [https://www.euspaceimaging.com/wp-content/uploads/2018/06/DG\\_IKONOS\\_DS.pdf](https://www.euspaceimaging.com/wp-content/uploads/2018/06/DG_IKONOS_DS.pdf) Acesso em: 29 de out. 2019.
- FARGION, G. S. **Achievements and Activities FY01 of SIMBIOS Project**. [S.l.: s.n.], 2001. Disponível em: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/meetings/scienceteam/simbios/2001/agenda/ProjectFy01.ppt>. Acesso em: 4 de out. 2019.
- FEDERATION OF AMERICAN SCIENTISTS. **Civil NIIRS Reference Guide**. [S.l.: s.n.], 1996. Disponível em: [https://fas.org/irp/imint/niirs\\_c/guide.htm#14](https://fas.org/irp/imint/niirs_c/guide.htm#14). Acesso em: 28 out. 2019.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA. **Satélite universitário do ITA será lançado em 2015**. São José dos Campos: [s. n.], 2015. Disponível em: [http://www.ita.br/noticias/itasat-1\\_2015](http://www.ita.br/noticias/itasat-1_2015). Acesso em: 03 out. 2019.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres (Tradução da 2ª edição)**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- JOSEPH, G. **Building Earth Observation Cameras**. New York: CRC Press, 2015.
- LARSON, W. J., WERTZ, J. R. **Space Mission Analysis and Design**, 3ª ed. El Dourado: Microcosm Press, 1999.
- LEACHTENAUER, J. C., DRIGGERS, R. G. **Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems: Modeling and Performance Prediction**, Norwood, MA: Artech House, 2001.



LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Uniderp, 2006.

NASA. **Systems Engineering Handbook**. Washington, DC: NASA, 1995. Disponível em: [http://www.barringer1.com/mil\\_files/NASA-SP-610S.pdf](http://www.barringer1.com/mil_files/NASA-SP-610S.pdf) . Acesso em: 07 out. 2019.

PILLET, V. M.; APARICIO, A.; SANCHEZ, F. **Payload and Mission Definition in Space Sciences**. New York: Cambridge University Press, 2005.

QIAN, S. **Optical Payloads for Space Missions-Wiley**. Montreal: John Wiley & Sons, 2016.

SANCHEZ, J., CANTON, M. P. **Space Imaging Processing**. New York: Routledge, 2018.

SATELLITE IMAGING CORPORATION. **IKONOS Satellite Sensor**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos/> Acesso em: 28 out. 2019.

UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. **UCS Satellite Database: In-depth details on the 2,062 satellites currently orbiting Earth, including their country of origin, purpose, and other operational details**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: [https://s3.amazonaws.com/ucs-documents/nuclear-weapons/sat-database/5-9-19-update/UCS\\_Satellite\\_Database\\_4-1-2019.xlsx](https://s3.amazonaws.com/ucs-documents/nuclear-weapons/sat-database/5-9-19-update/UCS_Satellite_Database_4-1-2019.xlsx) . Acesso em: 23 de out. 2019.

UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS. **Online Index of Objects Launched into Outer Space**. Disponível em: [http://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf\\_id=](http://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf_id=). Acesso em: 4 de out. 2019.

## Anexo A – Exemplo de *Mission Statement*



**SIMBIOS Program mission statement  
first draft**

- **I Ocean Color Program Objectives**
  - A. **Science objectives**

Marine ecosystem studies

Physical-biogeochemical process studies

Temporal/spatial variability studies (days to decades/mesoscale to global)

Carbon cycle studies (primary production, etc.)

Provide consistent validated satellite data for model assimilation
  - B. **Operational objectives**

Goal is to produce consistent ocean color data sets

Products (chlorophyll-a, etc.)

Temporal continuity (satellite-to-satellite)

Periodic reprocess entire time series

Take advantage of advancements in capability in any dimension;  
(i.e., algorithm, correction procedure, data storage, computer speed, etc.).

Figura A.1 – Rascunho do *Mission Statement Document* do programa SIMBIOS da NASA (FARGION, 2001).

| FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                   |                                        |                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| 1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO<br>TC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2. DATA<br>14 de novembro de 2019 | 3. REGISTRO Nº<br>DCTA/ITA/TC-083/2019 | 4. Nº DE PÁGINAS<br>73 |
| 5. TÍTULO E SUBTÍTULO:<br>Framework para análise de arquitetura de sensoriamento remoto óptico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                   |                                        |                        |
| 6. AUTOR(ES):<br><b>Alexandre Alli Pereira</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                   |                                        |                        |
| 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):<br>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                   |                                        |                        |
| 8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:<br>1. Sensoriamento remoto. 2. Design de missões espaciais. 3. Características de alvos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                   |                                        |                        |
| 9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:<br>Missões espaciais; Observação por satélite; Sensoriamento remoto, Satélites; Engenharia aeroespacial.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                   |                                        |                        |
| 10. APRESENTAÇÃO:<br><div style="display: flex; justify-content: flex-end; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"><b>X Nacional</b></div> <div><b>Internacional</b></div> </div> ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial. Orientador: Prof. Pedro Kukulka de Albuquerque; coorientador: Prof. Dr. Luis Eduardo Vergueiro Loures da Costa. Publicado em 2019.                                                                                                                                                                                                                                        |                                   |                                        |                        |
| 11. RESUMO:<br><p>É ponto pacífico nas diversas literaturas acerca de sistemas espaciais que os processos de concepção, implantação, operação e descarte são ao mesmo tempo interativos e iterativos. Nesse sentido, as soluções de compromisso estão presentes em cada decisão sobre as características de um satélite. A proposta deste trabalho é fornecer um passo-a-passo para avaliar requisitos de alto e médio nível em missões espaciais de imageamento da Terra. Cada escolha de requisito será fundamentada pela conjugação e análise da literatura pertinente sobre sistemas ópticos satelitais e sobre design de missões espaciais.</p> |                                   |                                        |                        |
| 12. GRAU DE SIGILO:<br><div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span>(X) OSTENSIVO</span> <span>( ) RESERVADO</span> <span>( ) SECRETO</span> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                   |                                        |                        |