

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Felipe de Castro Silva

**CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES
PARA MONITORAMENTO DA COSTA
LITORÂNEA BRASILEIRA**

Trabalho de Graduação
2020

Curso de Engenharia Aeroespacial

Felipe de Castro Silva

**CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES
PARA MONITORAMENTO DA COSTA
LITORÂNEA BRASILEIRA**

Orientador

Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos (ITA)

Coorientadora

Prof^a. Dr^a. Liana Dias Gonçalves (ITA)

ENGENHARIA AEROESPACIAL

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2020

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

Silva, Felipe de Castro

CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA COSTA LITORÂNEA BRASILEIRA / Felipe de Castro Silva.

São José dos Campos, 2020.

101f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeroespacial– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2020. Orientador: Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos. Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Liana Dias Gonçalves.

1. Microssatélites. 2. Monitoramento. 3. Constelações. 4. Satélites. 5. Engenharia aeroespacial. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, Felipe de Castro. **CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA COSTA LITORÂNEA BRASILEIRA**. 2020. 101f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe de Castro Silva

TÍTULO DO TRABALHO: CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA COSTA LITORÂNEA BRASILEIRA.

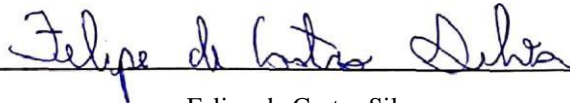
TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2020

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 deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Felipe de Castro Silva
Av. Jorge Zarur, 471
12.243-081 – São José dos Campos–SP

CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA COSTA LITORÂNEA BRASILEIRA

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Felipe de Castro Silva

Autor



Willer Gomes dos Santos (ITA)

Orientador



Liana Dias Gonçalves (ITA)

Goorientadora

**Cristiane Aparecida
Martins**

Assinado digitalmente por Cristiane Aparecida Martins
DN: C=BR, OU=Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
O=Cristiane Martins, CN=Cristiane Aparecida Martins,
E=cristiane@ita.br
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização:
Data: 2020-11-26 11:04:01

Prof^a. Dr^a. Cristiane Aparecida Martins
Coordenadora do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, 16 de novembro de 2020.

À minha família e todos os meus amigos
e pessoas próximas que me ajudaram a
chegar até esse momento. Obrigado por
estarem comigo ao longo de todos esses
anos.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos professores orientadores Dr. Willer Gomes dos Santos e Dra. Liana Dias Gonçalves pela orientação, confiança no trabalho e por estarem sempre solícitos em ajudar no que fosse necessário.

Ao CEI (Centro Espacial ITA) e responsáveis por ele por permitirem o uso do software necessário para a realização desse trabalho.

Aos demais amigos, colegas e professores que tive ao longo desses anos no instituto que marcaram cada ano de forma única para mim.

Por fim, agradeço à minha família que sempre me apoiou nesses longos anos até esse momento.

*"If I have seen farther than others,
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia de estudo de possíveis constelações de pequenos satélites para monitoramento da costa marítima brasileira. Para tal, são estudados dois diferentes *designs* de constelação, a Walker Delta e a Polar (ou *Street of coverage*), sendo analisadas as figuras de mérito referentes ao tempo de revisita da constelação na área de interesse e à taxa de acesso, que é referente ao tempo percentual no qual a área avaliada é coberta em relação ao tempo total de simulação. Assim, verifica-se que a constelação Walker Delta se adequa melhor à solução do problema de monitoramento, sendo verificado que os melhores resultados são obtidos para constelações Walker Delta de configurações $25:6/3/F$ (com F qualquer entre 0 e 2) ou $25:10/5/F$ (para $F \neq 3$). As soluções encontradas utilizam o *software* STK[®] como base para simulação da missão espacial, trabalhando de maneira conjunta com o MATLAB[®] para automatização do método de simulação das constelações de satélites, permitindo obter um grande conjunto de resultados de modo muito mais rápido e eficiente.

Abstract

This work presents a methodology for study of possible constellations of small satellites for monitoring the Brazilian sea coast. To this end, two different constellations designs are studied, the Walker Delta and the Polar (or Street of coverage), analyzing the figures of merit regarding the constellation's revisit time in the area of interest and the rate of access, which refers to the percentage of time in which the assessed area is covered in relation to the total simulation time. Thus, it appears that the Walker Delta constellation is more adequate to solve the monitoring problem and it is verified that the best results are obtained for Walker Delta constellations of configurations $25:6/3/F$ (with F any between 0 and 2) or $25:10/5/F$ (for $F \neq 3$). The solutions found use the software STK[®] as a basis for simulating the space mission, working together with MATLAB[®] to automate the satellite constellation simulation method, allowing to obtain a large set of results much faster and more efficiently.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Representação da Amazônia Azul (DEPUTADOS, 2017).	20
FIGURA 2.1 – Representação gráfica para derivação do potencial gravitacional. Adaptado de Chobotov (2009).	28
FIGURA 2.2 – Estão mostradas: à esquerda, os zonais harmônicos; no centro, os harmônicos setoriais; e à direita os harmônicos tesserais (WERTZ <i>et al.</i> , 2009).	29
FIGURA 2.3 – Representação gráfica do cálculo dos valores de <i>Age of Data</i> e <i>Response Time</i> . Adaptado de AGI (2020a).	31
FIGURA 2.4 – Representação esquemática dos elementos orbitais da órbita de um veículo espacial. Adaptado de Curtis (2005).	32
FIGURA 2.5 – Constelação 65:15/3/2 do tipo Walker Delta (WERTZ <i>et al.</i> , 2009).	33
FIGURA 2.6 – Padrão de constelações polares (GOBETZ, 1963).	34
FIGURA 2.7 – Cones de elevação interior e exterior para sensor SAR. Adaptado de AGI (2020b).	35
FIGURA 2.8 – Cones de exclusão dianteiro e traseiro para sensor SAR. Adaptado de AGI (2020b).	36
FIGURA 2.9 – Padrão de <i>field of regard</i> do sensor SAR. Adaptado de AGI (2020b).	36
FIGURA 3.1 – Procedimentos metodológicos.	38
FIGURA 3.2 – Divisão da Amazônia Azul em 2 áreas.	39
FIGURA 3.3 – Divisão da Amazônia Azul em 15 áreas.	40
FIGURA 4.1 – Walker Delta: Variações de altitude (região das 200 milhas). Para a regressão linear: $R^2 = 0,993$	44

FIGURA 4.2 – Walker Delta: Tempo de revisita em horas por região (divisão conforme Figura 3.3).	45
FIGURA 4.3 – Walker Delta: Variações de inclinação (região das 200 milhas). . . .	46
FIGURA 4.4 – Walker Delta: Tempo de revisita em horas por região (divisão conforme Figura 3.3).	47
FIGURA 4.5 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas). Para a interpolação exponencial : $R^2 = 0,9982$	48
FIGURA 4.6 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas). Para a interpolação exponencial : $R^2 = 0,997$	49
FIGURA 4.7 – Walker Delta: Tempo de revisita (mínima, média e máxima) em horas por região (divisão conforme Figura 3.3) para 2, 8 e 12 satélites em 2 planos.	50
FIGURA 4.8 – Walker Delta: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas).	51
FIGURA 4.9 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para diferentes valores de P (região das 200 milhas).	52
FIGURA 4.10 – Walker Delta: Variações de RAAN (região das 200 milhas).	53
FIGURA 4.11 – Walker Delta: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas).	55
FIGURA 4.12 – Walker Delta: Variações de altitude (região das 200 milhas)- Impacto na taxa de acesso. Para a regressão linear: $R^2 = 0,9969$	57
FIGURA 4.13 – Walker Delta: Variações de inclinação (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	58
FIGURA 4.14 – Walker Delta: Taxa de acesso (%) por região (divisão conforme Figura 3.3) - Impacto na taxa de acesso.	59
FIGURA 4.15 – Taxa de acesso máximo, mínimo e médio (%) por região (divisão conforme Figura 3.3) - Impacto na taxa de acesso.	60
FIGURA 4.16 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.	61
FIGURA 4.17 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.	62

FIGURA 4.18 –Walker Delta: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	63
FIGURA 4.19 –Walker Delta: Variações de número total de satélites para vários P (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	64
FIGURA 4.20 –Walker Delta: Variações de RAAN (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	65
FIGURA 4.21 –Walker Delta: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	65
FIGURA 4.22 –Walker Delta: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a primeira solução proposta.	67
FIGURA 4.23 –Walker Delta: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a segunda solução proposta.	68
FIGURA 5.1 – Polar: Variações de altitude (região das 200 milhas náuticas). . . .	70
FIGURA 5.2 – Polar: Tempo de revisita em horas por região (divisão conforme Figura 3.3).	71
FIGURA 5.3 – Polar: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas).	72
FIGURA 5.4 – Polar: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas).	73
FIGURA 5.5 – Polar: Tempo de revisita (mínima, média e máxima) em horas por região (divisão conforme Figura 3.3) para 3, 6 e 9 satélites em 3 planos.	74
FIGURA 5.6 – Polar: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas).	76
FIGURA 5.7 – Polar: Variações de número total de satélites para diferentes valores de P (região das 200 milhas).	77
FIGURA 5.8 – Polar: Variações de RAAN (região das 200 milhas).	78
FIGURA 5.9 – Polar: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas).	79
FIGURA 5.10 –Polar: Variações de altitude (região das 200 milhas) e impacto na taxa de acesso da região. Para a interpolação linear: $R^2 = 0,998$	80
FIGURA 5.11 –Polar: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.	81

FIGURA 5.12 –Polar: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.	82
FIGURA 5.13 –Polar: Variações de T , com $P = 2$ para cada sub-região, valores máximo, mínimo e médio - Impacto na taxa de acesso.	83
FIGURA 5.14 –Polar: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	84
FIGURA 5.15 –Polar: Variações de P , com $T = 12$ - Impacto na taxa de acesso. . .	85
FIGURA 5.16 –Polar: Variações de número total de satélites para vários P (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	86
FIGURA 5.17 –Polar: Variações de RAAN (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.	87
FIGURA 5.18 –Polar: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas).	88
FIGURA 5.19 –Polar: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a primeira solução proposta.	90
FIGURA 5.20 –Polar: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a segunda solução proposta.	91
FIGURA 6.1 – Imagens 3D das soluções de padrão Walker Delta propostas.	93
FIGURA 6.2 – Imagens 3D das soluções de padrão Polar propostas.	93
FIGURA 6.3 – Walker Delta: <i>Ground track</i> da constelação. Solução proposta: 25:6/3/0.	94
FIGURA 6.4 – Walker Delta: <i>Ground track</i> da constelação. Solução proposta: 25:10/5/0.	94
FIGURA 6.5 – Polar: <i>Ground track</i> da constelação. Solução proposta: $T = 9$ e $P = 3$	95
FIGURA 6.6 – Polar: <i>Ground track</i> da constelação. Solução proposta: $T = 12$ e $P = 3$	95

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Valores médios de tempo de revisita e taxa de acesso para diferentes tempos de simulação - constelação fixa.	41
TABELA 3.2 – Valores de <i>field of regard</i> para o sensor SAR.	42
TABELA 4.1 – Elementos fixos para a análise da variação da altitude - Walker Delta.	43
TABELA 4.2 – Elementos fixos para a análise da variação da inclinação - Walker Delta.	46
TABELA 4.3 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Walker Delta.	48
TABELA 4.4 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Walker Delta.	51
TABELA 4.5 – Elementos fixos para a análise da variação do espaço relativo F - Walker Delta.	54
TABELA 5.1 – Elementos fixos para a análise da variação da altitude - Polar.	69
TABELA 5.2 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Polar.	72
TABELA 5.3 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Polar.	75
TABELA 6.1 – Resumo das soluções propostas para cada padrão de constelação.	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

SisGAAZ	Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAB	Força Aérea Brasileira
COTS	<i>Commercial Off-The-Shelf</i>
ECI	<i>Earth-centered inertial</i>
ECEF	<i>Earth-centered Earth-fixed</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
RAAN	<i>Right Ascension of the Ascending Node</i>

Lista de Símbolos

e	Excentricidade
i	Inclinação
r	Distância entre o centro da Terra e o ponto analisado
s	Distância do elemento de massa em relação ao veículo espacial
F	Espaço relativo entre planos adjacentes
G	Constante da Gravitação Universal
M	Massa da Terra
P	Número de planos
S	Número de satélites por plano
T	Número total de satélites
γ	Ponto vernal
δ	Declinação do veículo espacial
λ	Longitude do veículo espacial
θ	Ângulo entre sistemas de coordenadas inercial e o fixo no veículo
μ	Constante gravitacional da Terra
ρ	Distância até o centro da Terra
Φ	Potencial gravitacional da Terra
Ω	Longitude do nodo ascendente
a_e	Raio Equatorial da Terra
J_k	Termos referentes às perturbações originárias da não esfericidade perfeita da Terra

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Definição de Problema	19
1.2	Motivação e Justificativa	21
1.3	Hipóteses	22
1.4	Considerações iniciais	23
1.5	Objetivos	23
2	FORMULAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Revisão da Literatura	25
2.2	Referencial Teórico	27
2.2.1	Dinâmica Orbital	27
2.2.2	Constelação de Satélites	30
2.2.3	Tipos de Constelações utilizadas	31
2.2.4	Sensoriamento - Sensores SAR	34
3	METODOLOGIA	37
3.1	Procedimentos Metodológicos	37
3.2	Considerações iniciais de simulação	38
3.3	Divisão das regiões	39
3.4	Metodologia das simulações	40
3.5	Tempo de simulação	41
3.6	Escolha do <i>grid</i>	42
3.7	Parâmetros dos sensores	42

4	RESULTADOS - CONSTELAÇÃO DO TIPO WALKER DELTA	43
4.1	Resultados para Tempo de revisita	43
4.1.1	Variação de altitude	43
4.1.2	Variação de inclinação	45
4.1.3	Variação do número total de satélites (T)	47
4.1.4	Variação do número de planos (P)	51
4.1.5	Variação da RAAN	53
4.1.6	Variação do Espaço Relativo (F)	54
4.2	Resultados para Taxa de Acesso	56
4.2.1	Variação de Altitude	56
4.2.2	Variação de Inclinação	56
4.2.3	Variação do número total de satélites (T)	58
4.2.4	Variação do número de planos (P)	60
4.2.5	Variação da RAAN	61
4.2.6	Variação do Espaço Relativo (F)	62
4.3	Soluções propostas	64
4.3.1	Primeira solução proposta	66
4.3.2	Segunda solução proposta	66
5	RESULTADOS - CONSTELAÇÃO DO TIPO POLAR	69
5.1	Resultados para Tempo de Revisita	69
5.1.1	Variação de altitude	69
5.1.2	Variação do número total de satélites (T)	71
5.1.3	Variação do número de planos (P)	74
5.1.4	Variação da RAAN	75
5.1.5	Variação do Espaço Relativo (F)	76
5.2	Resultados para Taxa de Acesso	77
5.2.1	Variação de altitude	77
5.2.2	Variação do número total de satélites (T)	78
5.2.3	Variação do número de planos (P)	80

5.2.4	Variação da RAAN	82
5.2.5	Variação do Espaço Relativo (F)	83
5.3	Soluções propostas	89
5.3.1	Primeira solução proposta	89
5.3.2	Segunda solução proposta	90
6	CONCLUSÕES	92
6.1	Comentários finais	92
6.2	Contribuições e melhorias propostas	97
	REFERÊNCIAS	98

1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados as bases nas quais são fundamentadas o problema proposto, além de exibir a motivação e uma justificativa para este trabalho. Em seguida, são levantadas as considerações iniciais e, por fim, os objetivos do trabalho, tanto o objetivo geral como os específicos.

1.1 Definição de Problema

A costa litorânea brasileira e suas águas jurisdicionais, que prosseguem em direção ao oceano 200 milhas marítimas (370,4 quilômetros), possui em torno de 4,5 milhões de quilômetros quadrados e corresponde a 32% de toda a extensão fronteira do Brasil, constituindo a chamada “Amazônia Azul” (MMA, 2019), que pode ser vista na Figura 1.1. Em uma primeira análise dessa região, destaca-se seu grande valor de exploração econômica – com pontos de extração de petróleo, inclusive o pré-sal – como também do ponto de vista dos vastos ecossistemas lá presentes. Ademais, no que tange aos desastres naturais, são poucas tais calamidades que podem ser observadas na costa litorânea brasileira devido ao seu posicionamento geográfico, valendo, no entanto, ser apontados aqueles causados pela elevação do nível do mar em momentos de cheias do oceano (CONFAP, 2017).

Entretanto, conforme pode ser evidenciado pelo episódio ocorrido em 2019 no derramamento de óleo na costa brasileira (ESTADÃO, 2019), existem possibilidades de desastres de causas não naturais que podem causar enorme impacto nas regiões atingidas. Mais além, deve-se citar o recente uso que a fronteira costeira brasileira vem tendo para o crime organizado, em especial o tráfico de drogas e armas, que usa essa região para driblar fiscalizações das forças de segurança do país (OSUL, 2018). A preocupação com tal panorama já é evidenciada nas Forças Armadas com a implementação, por parte da Marinha Brasileira, do Sistema de Defesa SisGAAZ - Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul - que teve seu recomeço em 2018 e é, conforme previsto pela Lei n 12.598/12, estratégico para a defesa nacional, fato corroborado pelo estudo do IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica aplicada (IPEA, 2019).

Nesse contexto, várias são as estratégias pensadas para se resolver tal problema, tanto



FIGURA 1.1 – Representação da Amazônia Azul (DEPUTADOS, 2017).

com saídas que envolvem a parte fronteira terrestre (SANTOS *et al.*, 2020), quanto as que envolvem apenas a marítima (SILVA *et al.*, 2020). No próprio estudo citado anteriormente pelo IPEA, já se prevê o uso de radares, equipamentos de sensoriamento e, especialmente, o uso de satélites. De fato, sistemas de satélites vem há muito tempo sendo aplicados em sistemas de monitoramento de regiões de interesse de vários países, inclusive do próprio Brasil, como pode ser exemplificado pelo uso dos mesmos pela Embrapa - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária para utilização na agropecuária brasileira (EMBRAPA, 2020b).

Dessa forma, atentando para a necessidade das forças armadas de se obter um projeto de cobertura que, ao mesmo tempo que disponha de dados relevantes e atenda as demandas

de mapeamento necessárias, deve possuir preço de implementação que esteja dentro do orçamento da FAB, Força Aérea Brasileira. Nesse contexto, uma possibilidade a ser considerada para a solução desse tipo de problema seria a utilização de CubeSats.

CubeSats são uma padronização que possui como principais características: ser compostos por uma ou várias unidades cúbicas padrão U (podendo ser 1U, 2U, 6U e assim por diante), uso de sistemas de ejeção de órbita padronizados e emprego, nos subsistemas, de componentes chamados COTS (*Commercial Off-The-Shelf*) (NETO *et al.*, 2018). Por consequência, ao se pensar em soluções de missões espaciais com aplicação de satélites do tipo CubeSat, imagina-se ganhar vantagens não apenas no custo de produção, como também no tempo de concepção, fabricação e testes desses artefatos (NETO *et al.*, 2018). Dessa maneira, já se pode dizer que CubeSats se mostram uma ferramenta viável para atender as demandas dos países no que tange ao acesso ao espaço (WOELLERT *et al.*, 2011).

No entanto, apesar da utilização de CubeSats apresentar as vantagens descritas anteriormente, apenas um desses satélites dificilmente completaria a missão proposta em tempo razoável de revisita da região. Assim, o uso de constelações de satélites aparece como meio de possibilidade viável de aplicação dessa tecnologia, mantendo-se o baixo custo de implementação se comparado a construção e operação de satélites de médio e grande porte, por exemplo. Busca-se então, neste trabalho, realizar o estudo de cobertura de determinadas constelações de satélites na região de interesse. Para desenvolver tal atividade, serão utilizados modelamentos de dois diferentes tipos de constelações: as do tipo Walker Delta e a Polar (*Street of Coverage*). Tais métodos de modelagem de constelações de satélites já apresentam modelos e métodos de construção bem definidos e que funcionam mesmo em condições de monitoramento de todo o globo terrestre, inclusive, por exemplo, com número limitado de satélites no primeiro caso (WALKER, 1970).

Assim, o problema a ser resolvido durante o Trabalho de Graduação busca responder os seguintes questionamentos:

“Quais são as soluções de constelações de pequenos satélites cujo número destes a serem utilizados constituem as melhores soluções compromisso, em termos de tempo de revisita e taxa de acesso, para o problema de monitoramento proposto? ”

“Quais são o tempo de revisita e taxa de acesso das constelações propostas sobre a costa litorânea brasileira? ”.

1.2 Motivação e Justificativa

Como já explorado anteriormente, a iniciativa de monitoramento da região chamada de Amazônia Azul já existe no âmbito das Forças Armadas do Brasil, em especial por parte

da Marinha do Brasil, com o programa SisGAAZ, já existindo, portanto, relevância atual no estudo proposto. Vale relembrar ainda a importância econômica, como a indústria de petróleo lá situada, bem como o uso que tal região vem apresentando ao crime organizado.

Ademais, do ponto de vista da análise de missões espaciais na sua concepção, chamadas Pré-fase A e Fase A, existe a necessidade de se obter meios rápidos de se chegar a resultados que são necessários para obter a validação do trabalho pelos *stakeholders* do projeto. Assim, obter meios de se apresentar resultados preliminares de uma análise de missão espacial cujas considerações iniciais tenham pouca variação em relação às condições finais de simulação, de maneira automatizada e mais ágil, constitui importante contribuição no contexto da Engenharia de Sistemas e nos processos de *design* de órbitas de constelações de satélites.

Vale ainda destacar que, na literatura acadêmica, poucas informações relativas ao *design* de constelações podem ser encontradas por se tratar de um assunto complexo, onde os especialistas nessa área do conhecimento pouco divulgam suas estratégias de formação de constelações devido ao potencial lucrativo destas soluções.

Buscar entender como pode ser feito o monitoramento da costa brasileira com uso de pequenos satélites pode, ainda, ser um caminho para outras soluções de monitoramento possíveis que apresentem desafios e particularidades similares aos aqui encontrados.

1.3 Hipóteses

Para o desenvolvimento das hipóteses deste trabalho, deve-se considerar em quanto tempo uma embarcação que pode ser vista pelos sensores a serem utilizados leva para ser detectada e interceptada pelo sistema de defesa brasileiro. Dessa forma, consideramos que no instante inicial de análise a embarcação inimiga atinge o início da região das 200 milhas náuticas ainda no oceano, com cerca de 370 km de distância da costa terrestre.

Considerando que as velocidades das embarcações tem diferentes valores a depender da característica, adotamos como navio que irá realizar a interceptação um do tipo navio-patrolha oceânico (o Amazonas) (DEFESANET, 2012), cuja velocidade máxima é de 25 nós ou 46,3 km/h. Em contrapartida, no pior caso, a embarcação invasora será do tipo cruzador, com velocidade de até 42 nós ou 77,8 km/h (CLEBSCH, 2004).

Sabendo que uma embarcação deve percorrer em relação a outra, no pior caso, os 370 km da costa marítima brasileira e a velocidade relativa entre eles é de 121,4 km/h, então o tempo total que levaria para detectar e interceptar essa embarcação seria de 3 horas.

Assim, podemos tomar, num primeiro momento, um tempo de revisita de 3 horas buscando um mapeamento mais conservador da região. Considerando que queremos um

mapeamento mais preciso, com revisita que permita reavaliar a posição da embarcação inimiga pelo menos mais uma vez antes da interceptação, então dividimos pela metade o tempo obtido para detecção e interceptação de 3 horas e ficamos com um tempo de revisita de 1,5 horas.

Ainda, do ponto de vista do número de satélites, deve-se sempre buscar reduzir essa quantidade para diminuir os custos relacionados à construção, lançamento e manutenção deles em suas órbitas.

Assim, surgem as seguintes hipóteses iniciais:

1. Uma constelação do tipo Walker Delta ou do tipo Polar de menos de 15 pequenos satélites seria capaz de atender às demandas de observação da região escolhida.
2. Espera-se que a solução apresente tempo de revisita máximo de 1 hora e 30 minutos (ou 3 horas, de maneira conservadora).

A validação e testes dessas hipóteses serão constantemente realizadas ao longo de todo o trabalho a ser desenvolvido.

1.4 Considerações iniciais

Numa primeira análise do trabalho a ser desenvolvido, foram tomadas as seguintes considerações iniciais:

- (1) - Não serão feitos estudos de melhorias na solução proposta considerando outros tipos de constelações além das citadas ao longo do trabalho.
- (2) - São suficientes para a análise proposta os softwares STK[®] e MATLAB[®].
- (3) - Uso apenas de constelações de satélites (e não outros métodos, como formações em voo).

1.5 Objetivos

O **objetivo geral** do trabalho de graduação a ser realizado pode ser descrito como:

“Obter as melhores soluções compromisso de monitoramento da costa litorânea brasileira com uso de uma constelação de pequenos satélites.”

Os **objetivos específicos**, que caracterizam os resultados das etapas do projeto e constituem detalhamentos do objetivo geral, são:

- Desenvolver um modelo teórico computacional para obtenção das órbitas e do número de satélites a serem utilizados;
- Obter as melhores órbitas para se fazer a cobertura com modelos computacionais do STK[®];
- Obter as constelações com melhor número de satélites usando os modelos computacionais do STK[®];
- Realizar conexões de rotinas entre MATLAB[®] e STK[®];
- Demarcar de maneira adequada (com os corretos *shapefiles*, arquivos de formato *.shp* que contém dados geoespaciais em forma de vetor da área desejada) a área da região de interesse no STK[®];
- Obter os tempos de revisita das soluções na região;
- Obter as taxas de acesso das soluções na região;
- Comparar as constelações de padrão Walker Delta com a de padrão Polar;
- Confrontar os resultados obtidos com as hipóteses previamente levantadas.

2 Formulação teórica

Neste capítulo, será feita uma revisão da literatura existente de constelações de satélites, observando diversos tipos de aplicações e tipos de coberturas, tanto totais quanto regionais. Em seguida, é levantado o referencial teórico referente à dinâmica orbital utilizada neste trabalho, apresentando efeitos perturbativos referentes ao formato não perfeitamente arredondado da Terra. Ainda, é feita uma discussão sobre conceitos de constelações de satélites, em especial referente às figuras de mérito utilizadas neste estudo, além de apresentar, na sequência, os padrões de constelações empregados nas simulações desenvolvidas. Por fim, é explicado o comportamento esperado dos sensores associados aos satélites deste estudo.

2.1 Revisão da Literatura

Inicialmente, o histórico do estudo de constelações de satélites data de antes da década de 1970, com o trabalho realizado por Gobetz em 1963 (GOBETZ, 1963) que estudou o problema das constelações com foco em posicionar os satélites para que fosse visível pelo menos um deles de qualquer ponto da Terra. Já nas décadas de 1970 e 1980, vários estudos feitos por J.G. Walker - (WALKER, 1970; WALKER, 1971; WALKER, 1973; WALKER, 1977; WALKER, 1978; WALKER, 1982) – apresentavam diferentes metodologias no design de constelações com órbitas circulares de mesma altitude para cobertura global. Em seu trabalho, J. G. Walker apresenta os tipos de constelações chamados Walker *Star* e Walker Delta, com essa última também sendo chamada por Ballard (BALLARD, 1980) de constelações Rosette inclinadas.

Ainda, o trabalho realizado por Beste em 1978 (BESTE, 1978) está direcionado no sentido de se obter configurações com mínima quantidade de satélites para cobertura geral da Terra, ou de uma região que vai de um polo até determinada latitude.

Outra linha de estudo de constelações para cobertura global é aquela apresentada por Adams e Rider (ADAMS; RIDER, 1987) no qual utilizam satélites em órbitas polares (que para a Terra, o caso mais usual é quando o satélites passam por cima ou muito próximo de ambos os polos do planeta), que ficariam conhecidas como constelações polares ou *Street*

of Coverage. Para esses métodos de monitoramento global, Adams e Rider chegam à conclusão da necessidade de não mais do que seis satélites para o completo monitoramento global.

Os trabalhos anteriormente citados tratam de sistemas de monitoramento visando a cobertura total do globo terrestre. Entretanto, outros trabalhos visam obter métodos de monitoramento direcionados a apenas determinada região no globo terrestre. Nesse contexto, o trabalho da equipe de Hanson (HANSON *et al.*, 1992), por exemplo, procura obter constelações para monitoramento regional do globo com a estratégia baseada em minimizar o tempo máximo de intervalo na mínima inclinação possível das órbitas.

O estudo proposto por George em 1997 (GEORGE, 1997) utiliza algoritmos genéticos na obtenção de constelações com cobertura descontínua. Enquanto que o trabalho realizado por Matossian no mesmo ano (MATOSSIAN, 1997), testa e apresenta novos métodos para o design de constelações, para cobertura contínua global, parcial e mesmo regional do globo terrestre.

Ainda, o estudo proposto por Ely e sua equipe em 1999 (ELY *et al.*, 1999) apresenta um método para seleção de órbitas com a finalidade de cobertura regional utilizando algoritmos genéticos, que já havia sido explorado anteriormente por George. O trabalho realizado por Crossley e seus colaboradores em 2000 (CROSSLEY; WILLIAMS, 2000) nos fornece um método de obtenção da constelação buscando minimizar o tempo de revisita máximo dos satélites em um ponto de escolha. O emprego de ferramentas de inteligência artificial também vem sendo usado no design de órbitas de constelações de satélites. Em especial, o trabalho da equipe de Schetter em 2003 (SCHETTER *et al.*, 2003) foca em autonomia múltipla dos satélites formadores da constelação. Já no trabalho de Pontani e seus colaboradores em 2007 (PONTANI; TEOFILATTO, 2007), são apresentados os resultados de órbitas para as constelações visando a maximização da cobertura de determinada região do globo.

Além das metodologias de design de constelações já descritas (Walker *Star*, Walker *Delta* e *Street of Coverage*), outro importante tipo de constelação de satélites, a chamada constelação *Flower*, vem sendo estudada desde o trabalho da equipe de Mortari em 2004 (MORTARI *et al.*, 2004), e tem como base a utilização de órbitas elípticas de mesmas excentricidades para os satélites da constelação. Ademais, o estudo realizado por eles em 2011 (MORTARI *et al.*, 2011) aplica esse conceito para constelações focadas em serviços de telecomunicações.

O artigo de Dai e seus colaboradores em 2017 (DAI *et al.*, 2017), apresenta uma análise de cobertura contínua de regiões do globo utilizando a decomposição da região de interesse em sub-regiões, transformando o problema de múltiplos satélites em vários problemas de cobertura de um único satélite.

Por fim, os estudos feitos pela equipe de Lee em 2020 (LEE *et al.*, 2020) nos mostram um novo método para o design de constelações para cobertura regional, no qual é usado um método baseado em programação inteira binária, com o objetivo de encontrar um padrão de constelação com o número mínimo de satélites. Em especial, para um sistema de cobertura da região amazônica juntamente com a da região do rio Nilo, com tempo de revisita definido como sendo de 12 horas na Amazônia e 6 horas para o rio Nilo, foi obtida a configuração de 30 satélites.

2.2 Referencial Teórico

2.2.1 Dinâmica Orbital

A dinâmica de um sistema formado por uma constelação de satélites pode ser descrita por diversos modelos dinâmicos, podendo ser usados modelos de dois corpos com ou sem influência de perturbações decorrentes do formato não perfeitamente arredondado da esfera terrestre, que causam efeitos relevantes na dinâmica orbital de determinado veículo espacial.

Vale destacar que neste trabalho não serão avaliados os efeitos decorrentes da influência de um terceiro corpo no sistema, uma vez que estamos analisando pequenos satélites cujas massas não são suficientes para causar impactos relevantes na dinâmica orbital. Outros corpos celestes como a Lua e o Sol estão suficientemente afastados do conjunto de órbitas a serem usadas (essencialmente órbitas LEO – até 1000 km de altitude) para seus efeitos serem desprezados (WERTZ *et al.*, 2009).

Nesse contexto, analisa-se o problema com perturbações associadas à não uniformidade da distribuição de massa da Terra, utilizando o potencial gravitacional (por unidade de massa) que nos propicia o cálculo da equação de movimento associada ao problema de dois corpos. Assim, partimos da Equação 2.1 que associa o potencial gravitacional Φ com a equação de movimento do corpo (CHOBOTOV, 2009).

$$\ddot{\vec{r}} = -\vec{\nabla}\Phi \quad (2.1)$$

No caso analisado, a Teoria do Potencial nos leva a considerar um formato esferoide no cálculo do potencial gravitacional da distribuição de massa da Terra. Dessa maneira, considerando o diferencial de massa dm , o potencial a uma distância s desse diferencial de massa e r do centro de massa da Terra, com M representando a sua massa, o potencial

é escrito da forma integral conforme a Equação 2.2.

$$\Phi = G \int \frac{dm}{s} \quad (2.2)$$

Onde G é a constante de Gravitação Universal, dm representa um elemento de massa da Terra e s é a distância do elemento de massa do veículo espacial, conforme pode ser visto na Figura 2.1.

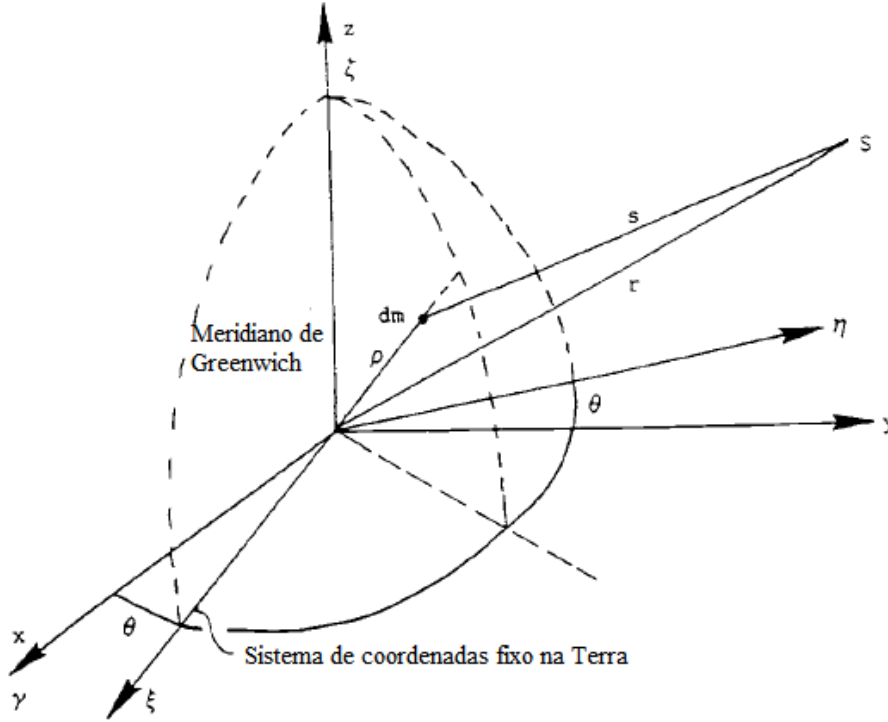


FIGURA 2.1 – Representação gráfica para derivação do potencial gravitacional. Adaptado de Chobotov (2009).

Nessa figura, γ é a direção do ponto vernal (mesma direção do eixo x), ρ é a distância do elemento de massa ao centro da Terra, r é a distância do centro da Terra ao ponto S onde se encontra o veículo espacial e θ é o ângulo momentâneo entre os sistemas de coordenadas.

Dessa forma, ao se realizar o cálculo dessa integral utilizando as formulações matemáticas necessárias e a transformação de coordenadas do referencial inercial (x, y, z) (ECI: *Earth-centered inertial*) para o referencial fixo no veículo espacial (ξ, η, ζ) (ECEF: *Earth-centered Earth-fixed*), obtemos a expressão fornecida pela Equação 2.3.

$$\Phi = \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n P_n^q(w) (C_{n,q} \cos q\lambda + S_{n,q} \sin q\lambda) \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3, μ é a constante gravitacional da Terra, a_e é o raio equatorial da Terra,

λ é a longitude do veículo espacial nas coordenadas (ξ, η, ζ) e $P_n^q(w)$ definem os polinômios de Legendre de ordem n , elevados à potência de q , em função da variável $w = \sin \delta$, com δ sendo a declinação do satélite.

Por fim, se reduzirmos a expressão da Equação 2.3 para se considerar apenas os efeitos referentes aos zonais harmônicos derivados da Equação 2.4, então a expressão se resume àquela vista na Equação 2.5. O texto de Chobotov (2009) apresenta a solução completa com os harmônicos zonais e tesserais.

$$J_k = -C_{k,0} = -C_k = -\frac{1}{ma_e^k} \int \rho^k P_k^\sigma(\sin \lambda) dm \quad (2.4)$$

$$\Phi = \frac{\mu}{r} \left[1 - \sum_{k=2}^{\infty} J_k \left(\frac{a_e}{r} \right)^k P_k(\sin \lambda) \right] \quad (2.5)$$

Na Equação 2.5, os termos J_k correspondem aos termos que atendem às perturbações originárias da não esfericidade da Terra. Ainda, a expressão analisada leva em conta apenas efeitos relacionados aos chamados harmônicos zonais, onde estamos desprezando os efeitos dos harmônicos setoriais e tesserais, cuja representação na esfera terrestre dessas expansões harmônicas estão indicadas na Figura 2.2 (SENGUPTA, 2003).

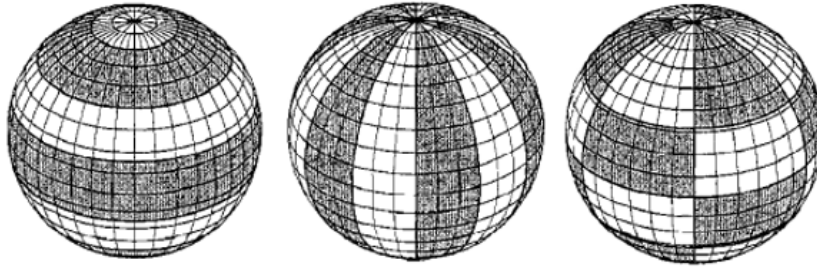


FIGURA 2.2 – Estão mostradas: à esquerda, os zonais harmônicos; no centro, os harmônicos setoriais; e à direita os harmônicos tesserais (WERTZ *et al.*, 2009).

Quando realizamos um estudo dos valores numéricos entre os valores de J_k , aquele que apresenta maior contribuição é J_2 , cuja formulação matemática é derivada da Equação 2.4 e chega-se à Equação 2.6, sendo algumas ordens de grandeza superior aos demais termos (enquanto $J_2 = 0,00108263$, temos que $J_3 = -0,00000254$, por exemplo (WERTZ *et al.*, 2009)).

$$J_2 = -\frac{1}{ma_e^k} \int \frac{\rho^2}{2} (3 \sin^2(\lambda) - 1) dm \quad (2.6)$$

Dessa forma, o impacto sentido pela contribuição zonal harmônica provocada por J_2 afeta de maneira relevante os elementos orbitais das órbitas, em especial o nodo ascen-

dente, de maneira bastante acentuada. Por exemplo, podem ocorrer variações da ascensão reta do nodo ascendente da órbita de satélites de baixa altitude de até $7,7^\circ$ por dia (WERTZ *et al.*, 2009), o que impacta consideravelmente no desempenho de uma missão de monitoramento.

2.2.2 Constelação de Satélites

Constelações são um conjunto de satélites distribuídos no espaço, trabalhando em conjunto para obtenção de objetivos em comum e podem, do ponto de vista de cobertura no globo terrestre, ser destinadas a coberturas globais contínuas, zonais contínuas, regionais contínuas ou parciais (WERTZ *et al.*, 2009). Dessa maneira, seguindo essa definição, este trabalho trata de um sistema de cobertura regional parcial, uma vez que se busca realizar o monitoramento de uma região específica do globo de modo não contínuo.

Não obstante, ao se realizar a análise da teoria necessária no design de constelações proposta, fazem-se necessários alguns conceitos fundamentais para a análise desses sistemas. Inicialmente, para se estudar como se dá a cobertura de determinada região, as figuras de mérito escolhidas são dois parâmetros relevantes no contexto da análise qualitativa da solução de monitoramento: o tempo de revisita e a taxa de acesso.

O **tempo de revisita** pode ser entendido como o tempo entre duas observações de um ponto no globo terrestre por qualquer um dos satélites da constelação, ou, de outra forma, mede o intervalo de tempo no qual a cobertura simplesmente não está sendo realizada (BRACHER; SINNHUBER, 2009). Essa figura de mérito pode ser fornecida pelo seu valor médio, máximo ou mínimo através das simulações do STK[®]. O valor médio computa a média das durações de todos os *gaps* na cobertura sob todo o intervalo de cobertura, enquanto que os valores máximo e mínimo trabalham com os limites superior e inferior da duração dos *gaps* em todo o intervalo de cobertura. Ainda, os valores estudados nesse trabalho dizem respeito ao tempo de revisita máximo para cada ponto no *grid* ao longo de todo o período de simulação.

O tempo de cobertura mede a quantidade de tempo durante o qual os pontos da grade são cobertos (AGI, 2020c). Em especial, no software STK[®] o tempo de cobertura (*Coverage Time*) mede a quantidade de tempo durante o qual os pontos da grade estão sendo cobertos, seja em tempo total, tempo por dia ou como porcentagem (AGI, 2020c). Dessa maneira, o tempo de cobertura fornecido nas simulações realizadas depende fundamentalmente do tempo de simulação utilizado, uma vez que ele tende a apresentar valores maiores conforme maior for o tempo de simulação.

Portanto, tendo em vista a definição de análise do *software*, utiliza-se, na análise do tempo de cobertura, a chamada **taxa de acesso**: essa quantidade mede a porcentagem

do tempo de simulação no qual a região analisada está sendo coberta (ou seja, possui pelo menos um satélite observando a região), sendo portanto calculado como sendo a divisão entre o tempo total em cobertura do ponto pelo tempo total de simulação. Da mesma forma que o tempo de revisita, quando tratamos dos pontos de máximo, mínimo e médio dessa grandeza, estamos falando dos valores em cada ponto do *grid*. Assim, existe um ponto do *grid* que tem valor máximo de cobertura, outro que possui valor mínimo e ao pegar todos os pontos do *grid*, teremos o valor médio dessa grandeza.

A Figura 2.3 ilustra essas figuras de mérito ao exibir graficamente as grandezas *Age of Data* e *Response Time*, onde na análise do STK[®], *Age of Data* mede o tempo decorrido desde o término do intervalo de cobertura anterior mais recente e *Response Time* mede o tempo do fim do *Age of Data* até o início da próxima cobertura (AGI, 2020a). Dessa maneira, o tempo de revisita nada mais é que a soma do valor de *Age of Data* com o de *Response Time*, que é o intervalo entre duas coberturas do sistema, enquanto que a taxa de acesso é o somatório dos intervalos de cobertura dividido pelo tempo total de simulação.

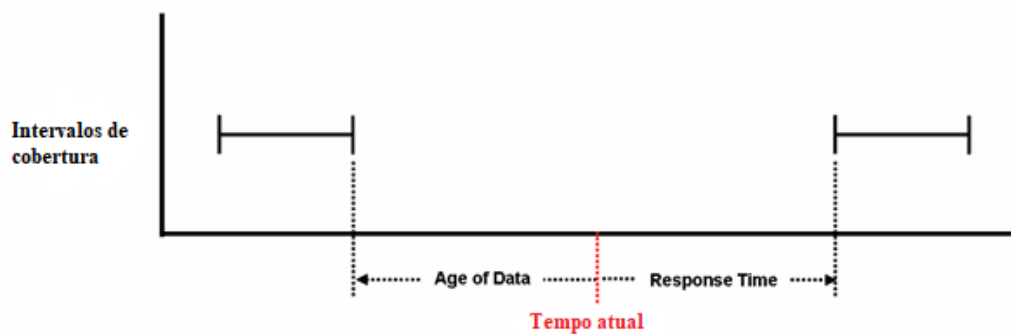


FIGURA 2.3 – Representação gráfica do cálculo dos valores de *Age of Data* e *Response Time*. Adaptado de AGI (2020a).

Por último, vale lembrar que as medidas de cobertura e revisita estão intimamente ligadas ao tipo de sensor usado pelos satélites pertencentes a constelação, bem como com o tempo da simulação, sendo essas variáveis essenciais num trabalho de monitoramento.

2.2.3 Tipos de Constelações utilizadas

A seguir, serão discutidos alguns tipos de constelações dentre as principais conhecidas e que serão utilizadas para se procurar soluções para o problema de monitoramento proposto, sendo também apresentada a geometria relevante para cada padrão de constelação avaliado.

2.2.3.1 Padrão Walker Delta

O padrão Walker Delta é uma das constelações mais conhecidas entre aquelas propostas por J.G. Walker em seus trabalhos e considera um conjunto com um total de T satélites, com S destes igualmente distribuídos em P planos orbitais que se encontram em uma órbita circular, ou seja, com $e = 0$. Ademais, considera-se que todos os satélites apresentam a mesma inclinação i em relação ao plano do equador da Terra. Existe ainda como característica desse tipo de constelação a variável F , o espaço relativo entre planos adjacentes, cuja utilidade será explorada posteriormente.

Considerando ainda o sistema de coordenadas equatorial terrestre com origem no centro da Terra, com o plano de referência no Equador terrestre e no qual um dos eixos aponta em direção ao polo norte (eixo Z) e outro na direção do ponto vernal (eixo X), podemos enfim falar sobre a última variável que define o movimento das órbitas dos satélites em constelações de formato Walker Delta: a ascensão reta do nodo ascendente, chamada de RAAN (*Right Ascension of the Ascending Node*), que nada mais é que o ângulo obtido no plano equatorial terrestre entre o eixo que aponta em direção ao ponto vernal e o ponto no qual a órbita do veículo espacial cruzam o plano do equador (CURTIS, 2005).

A Figura 2.4 mostra o sistema de coordenadas equatorial terrestre usado na definição dos elementos orbitais essenciais à formulação da constelação Walker Delta, onde na Figura 2.4, i é inclinação do plano da órbita e Ω é a longitude do nodo ascendente (ou ascensão reta do nodo ascendente - RAAN).

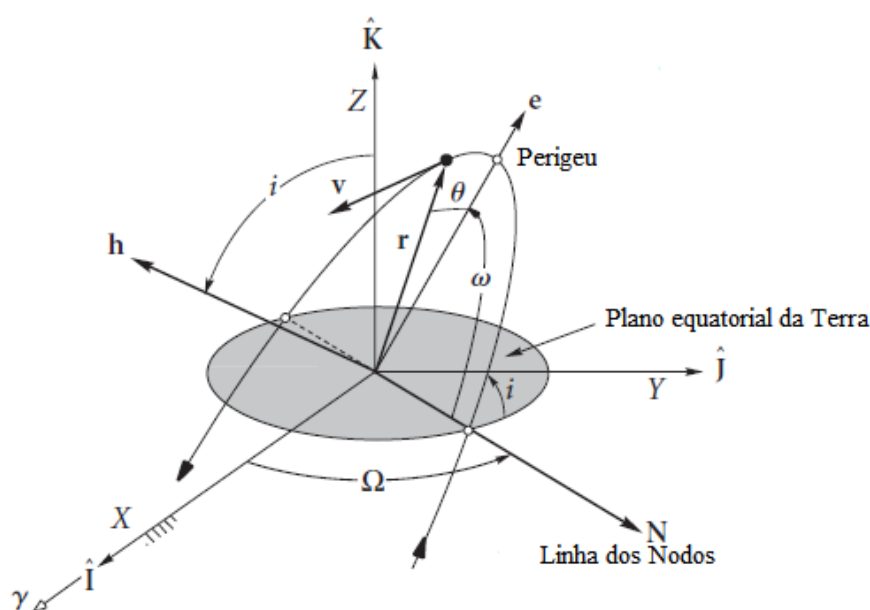


FIGURA 2.4 – Representação esquemática dos elementos orbitais da órbita de um veículo espacial. Adaptado de Curtis (2005).

Portanto, o conjunto de variáveis que caracterizam uma constelação do tipo Walker Delta são: a altitude, i , RAAN, T , P e F , com a escrita usual típica de uma constelação desse tipo sendo feita como $(i : T/P/F)$. Assim, a Figura 2.5 ilustra uma constelação desse formato com configuração 65:15/3/2.



FIGURA 2.5 – Constelação 65:15/3/2 do tipo Walker Delta (WERTZ *et al.*, 2009).

Pela própria definição das grandezas que constituem o formato dessas constelações, o cálculo da distribuição dos satélites participantes dela pode ser realizado de maneira relativamente simples. De fato, inicialmente sabe-se que os planos orbitais estão uniformemente distribuídos ao longo do Equador e a uma distância entre eles de $360^\circ/P$. Da mesma forma, em cada um desses planos orbitais a distância angular entre os satélites é fácil de ser obtida, uma vez que sabemos a quantidade de satélites por plano S : $360^\circ/S$.

Por fim, para obter a distância angular relativa ϕ entre os satélites em relação a planos orbitais adjacentes, utilizamos a variável F . Dessa maneira, para obtermos uma relação que permita a simetria da constelação com todos os planos orbitais tendo valores iguais, fazemos $\phi = \frac{360^\circ \times F}{T}$, com F um número natural variando de 0 a no máximo $P - 1$.

2.2.3.2 Padrão Polar ou *Street of Coverage*

Constelações do tipo Polar (ou *Street of coverage*) são aquelas cujas órbitas dos satélites pertencentes à constelação se interceptam em dois pontos afastados 180° entre si (GOBETZ, 1963), conforme exemplo ilustrado na Figura 2.6. Essas órbitas atendem à condição de estarem na mesma altitude e em órbitas circulares.

Por essa definição, fica claro que não necessariamente esses pontos de intersecção se



FIGURA 2.6 – Padrão de constelações polares (GOBETZ, 1963).

dão nos polos da esfera terrestre. No entanto, costuma-se adotar esses pontos acima dos polos da Terra para se evitar os efeitos da deriva da ascensão reta do nodo ascendente no *ground track* dos satélites uma vez que, quando a excentricidade é nula (órbitas circulares), a variação no tempo na RAAN devido ao efeito do J_2 para órbitas circulares de raio r é dado pela Equação 2.7 (WERTZ *et al.*, 2009). Nota-se que nessa equação, quando a inclinação é $i = 90^\circ$, o efeito dessa variação é anulado, já que $\cos(90^\circ) = 0$.

$$\frac{d(RAAN)}{dt} = -2J_2 r^{-7/2} \cos i \quad (2.7)$$

Por fim, neste trabalho, escolheu-se trabalhar com constelações Polares que obedecem ao padrão de distribuição similar àquele das constelações do tipo Walker Delta, a não ser pela inclinação, que é fixa em constelações *Street of Coverage* ($i = 90^\circ$). Essa escolha foi realizada pela maior simplicidade de implementação computacional necessária para realizar as simulações, além de se adequar bem para comparações com soluções Walker Delta pelo método de construção ser similar.

2.2.4 Sensoriamento - Sensores SAR

Do ponto de vista do sensoriamento remoto proposto ao problema de monitoramento, diversos são os tipos de sensores que podem ser usados, e conforme já dito, serão utilizados neste trabalho sensores do tipo SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Tais sensores apresentam tecnologia que utiliza ondas eletromagnéticas para detectar a presença de objetos e determinar a posição destes, fazendo uso de antenas na obtenção dos dados necessários.

Esses sensores utilizam antenas que captam sinais eletromagnéticos e costumam operar na faixa de micro-ondas, com comprimento de onda variando entre 1 mm a 1 m (PARADELLA *et al.*, 2015).

Portanto, a tecnologia proposta por sensores desse formato permite obter imagens com maior resolução espacial, podendo gerar informações mais detalhadas e mais densas (LOPES; LIMA, 2009), ideal para o problema de monitoramento detalhado da costa litorânea brasileira. Ademais, deve-se atentar para quais são as características fundamentais no funcionamento dessa tecnologia no contexto da aplicação deles para obtenção de dados de monitoramento.

Primeiramente, esses sensores tem seu *field of regard* no software STK[®] composto por 4 cones: 2 cones de elevação, interior e exterior, e 2 cones de exclusão, o traseiro e o dianteiro. Os cones de elevação interior e exterior estão ilustrados na Figura 2.7 e especificam os ângulos máximo e mínimo, respectivamente, entre a posição do satélite e a superfície terrestre, na qual o sensor SAR consegue prover cobertura na altitude de onde ele se encontra (AGI, 2020b).

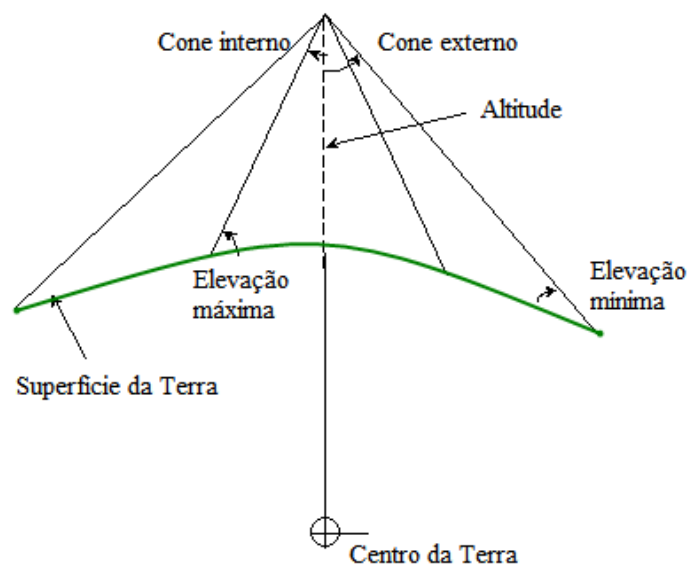


FIGURA 2.7 – Cones de elevação interior e exterior para sensor SAR. Adaptado de AGI (2020b).

Já os cones de exclusão dianteiro e traseiro representam o ângulo mínimo entre a projeção dianteira ou traseira em relação ao vetor velocidade do satélite, conforme mostra a Figura 2.8, e está relacionado ao máximo efeito Doppler no qual o sensor mantém sua operação (AGI, 2020b). Portanto, se esses ângulos forem definidos iguais, então os cones à frente e atrás do movimento do satélite são iguais e o sensor consegue ver simetricamente a direção da sua velocidade.

Por fim, a Figura 2.9 mostra o padrão do *field of regard* do sensor com a utilização dos 4 sensores em conjunto, onde é possível notar que os cones de exclusão traseiro e

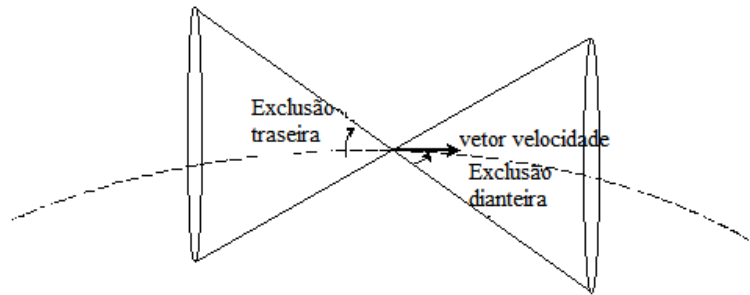


FIGURA 2.8 – Cones de exclusão dianteiro e traseiro para sensor SAR. Adaptado de AGI (2020b).

dianteiro tiram partes do campo de visão definido pelo cone externo de observação do sensor, diminuindo a sua visibilidade.

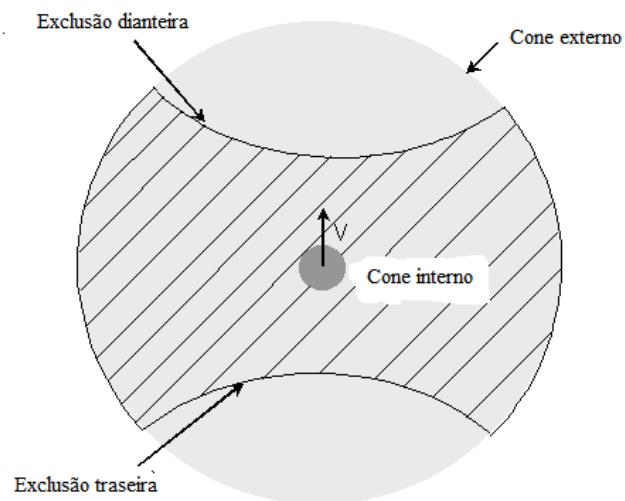


FIGURA 2.9 – Padrão de *field of regard* do sensor SAR. Adaptado de AGI (2020b).

3 Metodologia

Neste capítulo, será apresentado os procedimentos metodológicos empregados no processo de simulação realizado que utiliza diferentes *softwares* em conjunto, seguido das considerações iniciais no desenvolvimento destas simulações. Ademais, é mostrado como é feita a divisão das regiões para fins dos estudos desenvolvidos. Na sequência, explica-se por qual ordem ocorrem as simulações computacionais a fim de se estudar as constelações propostas. Por fim, são explicadas as escolhas do tempo de simulação, da granularidade do *grid* e dos parâmetros dos sensores SAR atrelados aos satélites das constelações.

3.1 Procedimentos Metodológicos

O método utilizado para se desenvolver o trabalho proposto está representado na Figura 3.1. Nesta figura, percebemos que inicialmente devemos ter em mente qual o tipo de constelação (Walker Delta e Polar) será inicialmente avaliado. A partir dessa informação, começa-se o processo de simulação com a checagem inicial se o modelo já está disponível para uso no software STK[®].

Se já estiver disponível o modelo para a constelação desejada, segue-se a simulação a partir da escolha de parâmetros relevantes (altitude, número de satélites, número de satélites por plano, inclinação, entre outros), com a simulação da configuração proposta utilizando a integração possível entre os *softwares* para realizar as simulações e obter os resultados a serem discutidos neste trabalho.

Caso o modelo não exista, usa-se modelos de integração MATLAB[®] com STK[®] para obtenção de um modelo de simulação. A partir desse ponto começa a escolha dos parâmetros relevantes e, na sequência, a repetição do procedimento descrito no parágrafo anterior.

Por fim, caso o resultado seja ruim, com taxas de acesso e tempo de revisita muito destoantes do esperado nas hipóteses e daqueles vistos na revisão bibliográfica, repete-se a escolha dos parâmetros em busca de melhoria na solução obtida. Caso haja um resultado coerente, faz-se a melhoria fina dos parâmetros (pequenas variações) e obtém-se

a simulação para a constelação avaliada.

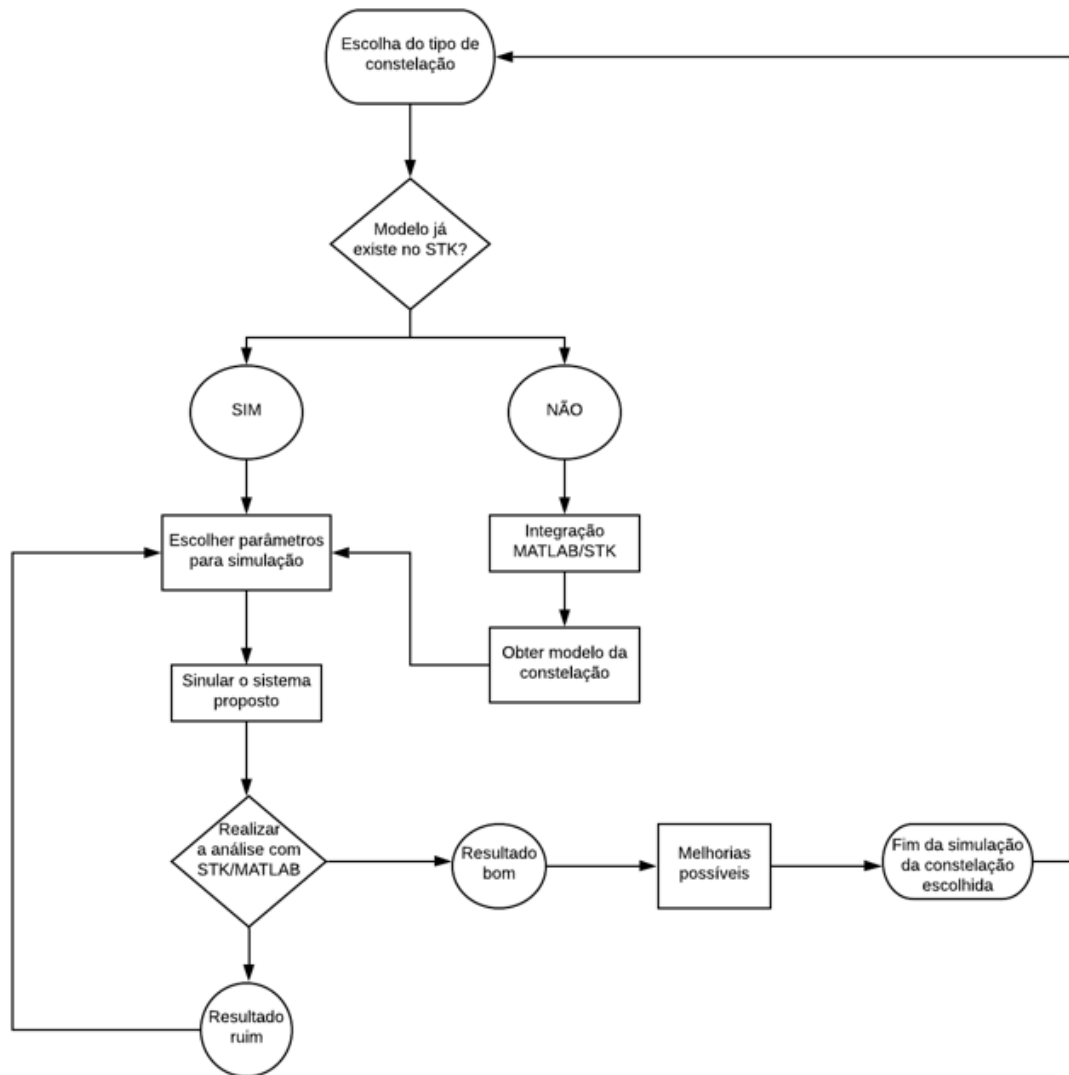


FIGURA 3.1 – Procedimentos metodológicos.

3.2 Considerações iniciais de simulação

Numa primeira análise do trabalho a ser desenvolvido, foram tomadas como base fundamental as seguintes considerações:

1. São suficientes para a análise proposta os softwares STK[®] e MATLAB[®].
2. Serão considerados sensores do tipo SAR para monitoramento da região.
3. Serão avaliadas órbitas com altitude máxima de 1000 km, ou seja, órbitas LEO (*Low Earth Orbit*) (ESA, 2019).

3.3 Divisão das regiões

A princípio, dois diferentes tipos de abordagens foram utilizadas quanto a divisão das áreas da Amazônia Azul. A Figura 3.2 mostra a primeira possibilidade de análise, onde a região de interesse é separada em duas: a primeira trata da região cujo limite está a 200 milhas náuticas de distância da costa brasileira (*AreaTarget1_1*), e a segunda trata de uma parte da Zona Econômica exclusiva, sendo quase circular (*AreaTarget2_1*).



FIGURA 3.2 – Divisão da Amazônia Azul em 2 áreas.

Já a Figura 3.3 mostra uma divisão alternativa, onde a região da Amazônia Azul é dividida em 15 diferentes áreas. Essa divisão é relevante no contexto do estudo proposto devido à grande área a ser analisada. Essa área de grande escala pode causar distorções nos resultados, a medida em que os resultados podem variar enormemente a depender da região em análise. Assim, essa estrutura permite analisar o comportamento segmentado de forma mais precisa da área estudada.



FIGURA 3.3 – Divisão da Amazônia Azul em 15 áreas.

3.4 Metodologia das simulações

As simulações para obtenção das melhores soluções compromisso para o problema de monitoramento proposto foram iniciadas, tanto no caso da constelação Walker Delta quanto da constelação Polar, com um estudo das melhores altitudes a serem utilizadas, respeitando a restrição de órbitas LEO. Ou seja, foram realizadas simulações para altitudes até 800 km.

Após esse processo, são estudadas no caso da constelação Walker Delta as melhores inclinações para o problema proposto. Esse estudo não é realizado em constelações polares, uma vez que elas possuem i fixo e igual a 90° . Na sequência, foram realizadas variações no número de satélites totais na constelação em ambos os casos, onde é mantido constante o número de planos. Em seguida, é analisada a influência do número de planos da constelação Walker Delta, onde, para isso, é mantido constante o valor do número total de satélites. Por fim, analisa-se o impacto da mudança da RAAN e do espaço relativo F nos resultados.

Esses estudos foram realizados através da integração entres os softwares STK[®] e

MATLAB[®], onde foram utilizadas as configurações do primeiro e a capacidade dele de se integrar com o MATLAB[®] para propiciar simulações de modo automático. Dessa maneira, ao invés de se perder bastante tempo ajustando cada conjunto de objetos (como por exemplo os satélites da constelação, as áreas de interesse, os sensores anexados aos satélites e as figuras de mérito de revisita e taxa de acesso) a cada simulação proposta, o que deixaria o trabalho praticamente inviável dado o tempo que tal procedimento gastaria, a associação entre softwares que permite que isso seja feito de modo automático nos faz gerar resultados para análise de modo muito mais rápido, favorecendo as análises a serem feitas na sequência.

3.5 Tempo de simulação

No que diz respeito à análise do tempo de simulação considerado, a princípio, buscou-se analisar o impacto na variação do tempo de simulação nos resultados do tempo de revisita médio e da taxa de acesso na região de interesse para se analisar como o aumento do tempo influencia nos resultados médios.

Para isso, considerou-se numa primeira simulação o começo como sendo dia *1 de julho de 2021*, com final para *1 de julho de 2022*, ou seja, um ano de simulação. A segunda simulação considerada teve seu início em *1 de julho de 2021*, com final para *1 de janeiro de 2022*, sendo ao todo 6 meses de análise. A terceira simulação utilizou 3 meses de análise, com seu início em *1 de julho de 2021*, com final para *1 de outubro de 2021*, cujos resultados podem ser observados na Tabela 3.1, onde foi utilizado nos resultados uma constelação do tipo Walker Delta 45:6/3/0 para resultados de tempo de revisita e uma 25:6/3/0 para taxa de acesso, com altitude de 800 km para ambos.

TABELA 3.1 – Valores médios de tempo de revisita e taxa de acesso para diferentes tempos de simulação - constelação fixa.

Tempos de simulação	Tempo de revisita [s]	Taxa de acesso [%]
3 meses	12913,796134	11,346057
6 meses	12945,865035	11,342847
1 ano	12971,51752	11,342368

Apesar de os tempos de simulação gastos serem consideravelmente superiores conforme são aumentadas as datas de simulação, não ocorreram grandes variações nos valores obtidos em termos de tempo de revisita e taxa de acesso do sistema na região estudada, sendo essas diferenças na ordem de grandeza dos segundos.

Dessa maneira, buscando diminuir o tempo de simulação e aumentar a quantidade de análises com a variação mínima nos resultados obtidos, neste trabalho os estudos realizados

adotaram o conjunto de datas com duração total de 3 meses.

3.6 Escolha do *grid*

Cada análise realizada utiliza uma divisão da região de interesse em pontos no *grid*, com essa variação sendo de V graus, tanto de latitude quanto de longitude. Essa divisão é importante uma vez que é ela que nos diz a granularidade dos pontos a serem vistos pelo sensor, deixando a simulação mais ou menos detalhada, conforme a necessidade dela. Dentro desse contexto, a quantidade de pontos analisada depende diretamente de V , com o nível local de precisão sendo melhor conforme se aumenta V , que, em nosso caso, será adotado $V = 0,5^\circ$, uma vez que nas simulações adotadas não foram observados mudanças significativas de resultados para valores inferiores a este.

3.7 Parâmetros dos sensores

É indubitável que os resultados para taxa de acesso e revisita do sistema dependem diretamente do tipo de sensor utilizado nas simulações. Dessa maneira, conforme definido anteriormente, os sensores do tipo SAR utilizados foram mantidos iguais em todas as simulações realizadas, sendo empregadas nessas simulações as configurações do STK[®] de *field of regard*, conforme mostra a Tabela 3.2.

Esses valores utilizados de angulação para os sensores são semelhantes àqueles vistos no satélite RADARSAT-2 da Embrapa (EMBRAPA, 2020a) que, com os valores mostrados na Tabela 3.2, conseguem resoluções na faixa de 20 a 30 metros a uma altitude de aproximadamente 800 km.

TABELA 3.2 – Valores de *field of regard* para o sensor SAR.

Alcance/Tipo	Ângulos de elevação	Ângulos de exclusão
Máximo/Dianteiro	50°	35°
Mínimo/Traseiro	20°	35°

4 Resultados - Constelação do tipo Walker Delta

Neste capítulo serão exibidos os resultados de tempo de revisita e taxa de acesso para as constelações do tipo Walker Delta. Para tal, serão mostrados as variações de resultados vistas com a variação de cada parâmetro da constelação. Por fim, são propostas duas soluções para o problema de monitoramento da Amazônia Azul.

4.1 Resultados para Tempo de revisita

Nesta seção, serão apresentados gráficos dos resultados obtidos e figuras representativas da região analisada de tempo de revisita quando são variados cada um dos elementos da constelação de satélite de padrão Walker Delta.

4.1.1 Variação de altitude

Utilizou-se uma constelação de padrão Walker Delta com um total (T) de 6 satélites, distribuídas num total de planos (P) igual a 3, onde se variou as altitudes analisadas entre 400 km e 800 km, com passo de 100 km. Assim, para o satélite formador da constelação, foram mantidos constantes os demais parâmetros orbitais mostrados na Tabela 4.1, a fim de se comparar os resultados obtidos a cada altitude.

TABELA 4.1 – Elementos fixos para a análise da variação da altitude - Walker Delta.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Inclinação, i	°	45
Espaço Relativo, F	—	0
RAAN	°	45
Total de satélites, T	—	6
Número de Planos, P	—	3

A Figura 4.1 mostra como variam os resultados do tempo de revisita médio na região

de 200 milhas (Figura 3.2) variando-se as altitudes. Pode-se constatar que o aumento da altitude impacta de maneira praticamente linear a diminuição do tempo de revisita médio da região, fato constatado pela regressão linear realizada, que nos fornece um valor de $R^2 = 0,993$, com a equação da reta dada pela Equação 4.1.

$$y = -0,003083x + 6,027 \quad (4.1)$$

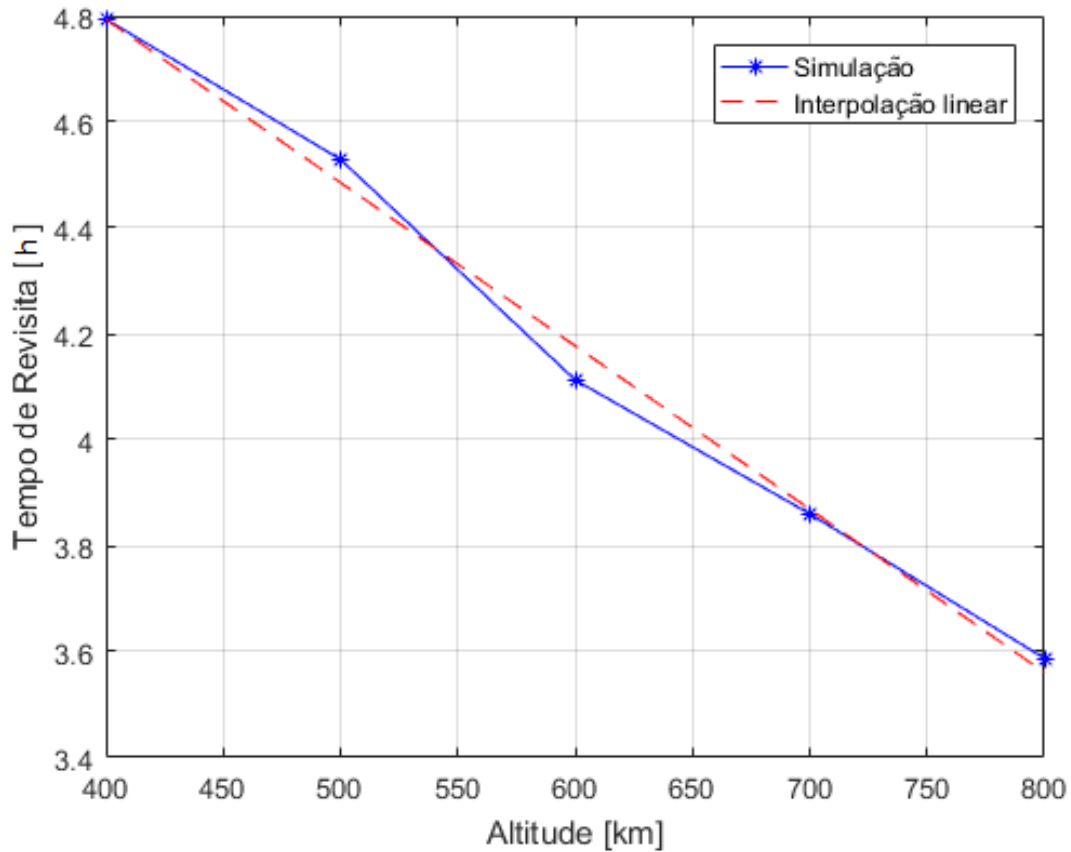


FIGURA 4.1 – Walker Delta: Variações de altitude (região das 200 milhas). Para a regressão linear: $R^2 = 0,993$.

Ainda, a Figura 4.2 apresenta a distribuição dos tempos de revisita médio em cada uma das 15 sub-regiões apresentadas na Figura 3.3. O estudo dos resultados apresentados nos permite concluir que, apesar do comportamento ser o mesmo para a mesma inclinação, o valor do tempo de revisita cai em algumas ordens de grandeza em cada uma das regiões analisadas.

Portanto, já que quanto maior a altitude consideravelmente melhor se tornam nossos resultados em termos de tempo de revisita, serão adotados no conjunto de soluções compromisso desse trabalho constelações cujas altitudes estejam no limite de 800 km, não sendo maior para não causar impactos muito relevantes na observação de imagens feita pelos sensores.

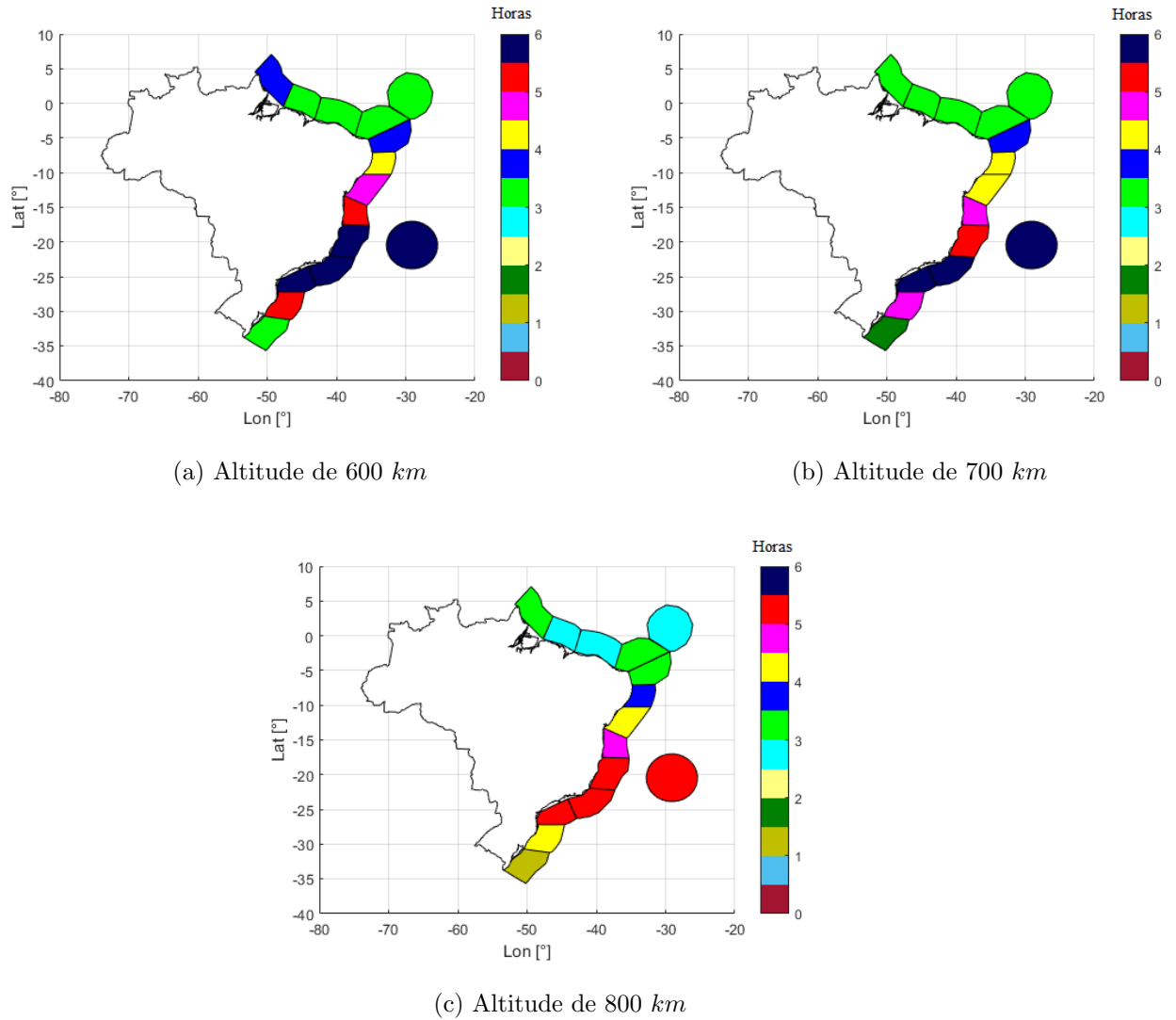


FIGURA 4.2 – Walker Delta: Tempo de revisita em horas por região (divisão conforme Figura 3.3).

4.1.2 Variação de inclinação

Nesse caso, a Tabela 4.2 mostra os valores utilizados nas simulações realizadas, onde, ainda, para se estudar o efeito da variação da inclinação, variou-se tal elemento entre 5° e 85° , com um passo de 5° .

Neste contexto, a Figura 4.3 mostra como variam os resultados em termos do tempo de revisita médio para a região de 200 milhas marítimas. Nessa figura são desconsiderados os valores para 5° a 20° por apresentarem tempos de revisita médio muito maiores que os demais, sem realizar uma revisita em todos os pontos da região analisada.

Desta forma, a análise dos resultados obtidos nos permite constatar que os menores valores médios para tempos de revisita são para as inclinações de 25° , 30° e 35° . Para ajudar na escolha da melhor possibilidade de solução, a Figura 4.4 mostra como variam

TABELA 4.2 – Elementos fixos para a análise da variação da inclinação - Walker Delta.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Altitude, h	km	800
Espaço Relativo, F	—	0
RAAN	°	45
Total de satélites, T	—	6
Número de Planos, P	—	3

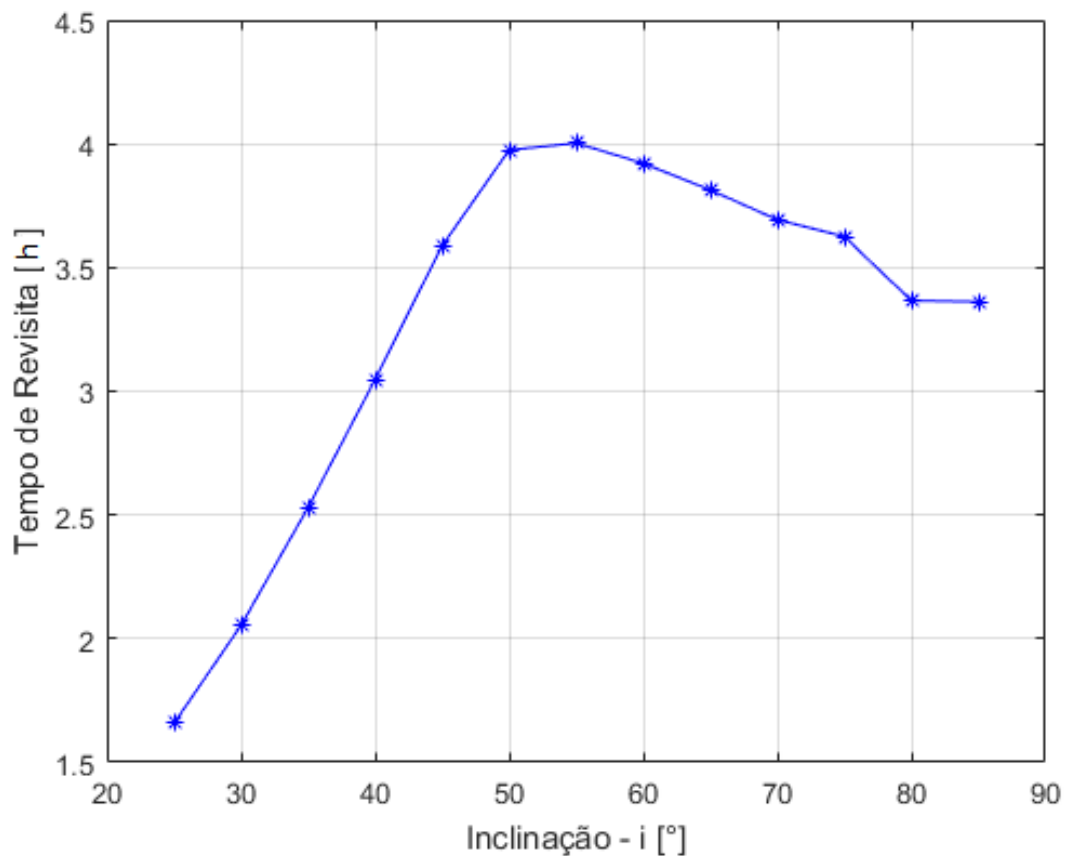


FIGURA 4.3 – Walker Delta: Variações de inclinação (região das 200 milhas).

as horas de revisita por cada uma das 15 regiões da Figura 3.3 para as inclinações citadas.

A análise da Figura 4.4 nos permite notar que, para as inclinações de $i = 30^\circ$ e $i = 35^\circ$ existem mais sub-regiões com tempo de revisita superior a 3 horas (hipótese máxima inicial) do que quando analisada a inclinação $i = 25^\circ$. De fato, esta solução apresenta apenas duas áreas com tempo de revisita superior a 3 horas, enquanto que para $i = 35^\circ$ existem seis dessas áreas, e para $i = 30^\circ$ há duas regiões, mas cujos tempos de revisita superam 4 horas, muito acima da hipótese máxima inicial.

Desta maneira, devido a essa relação e buscando atender a demandas de monitoramento gerais e não específicas para uma determinada sub-região, considerar-se-á como

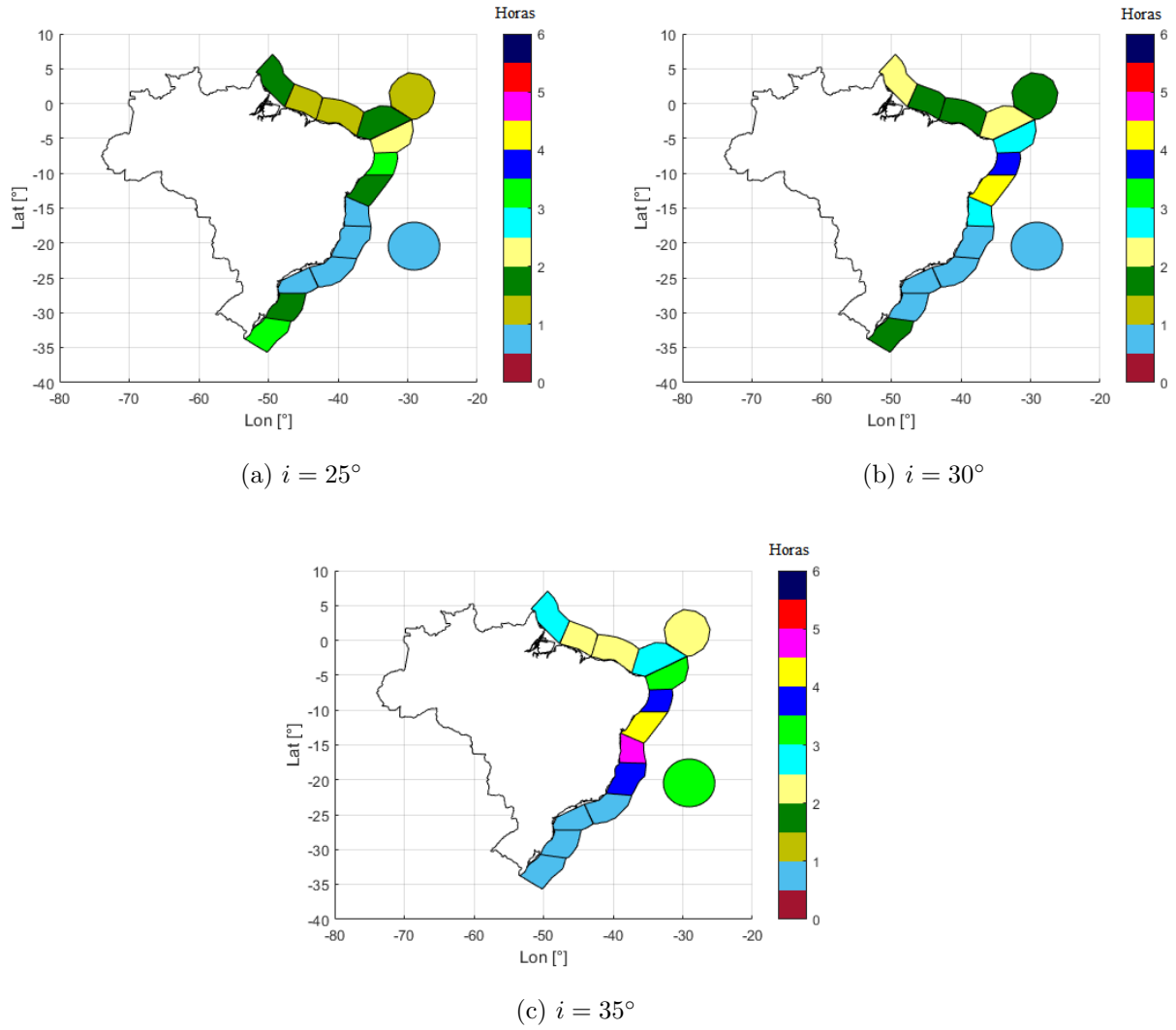


FIGURA 4.4 – Walker Delta: Tempo de revisita em horas por região (divisão conforme Figura 3.3).

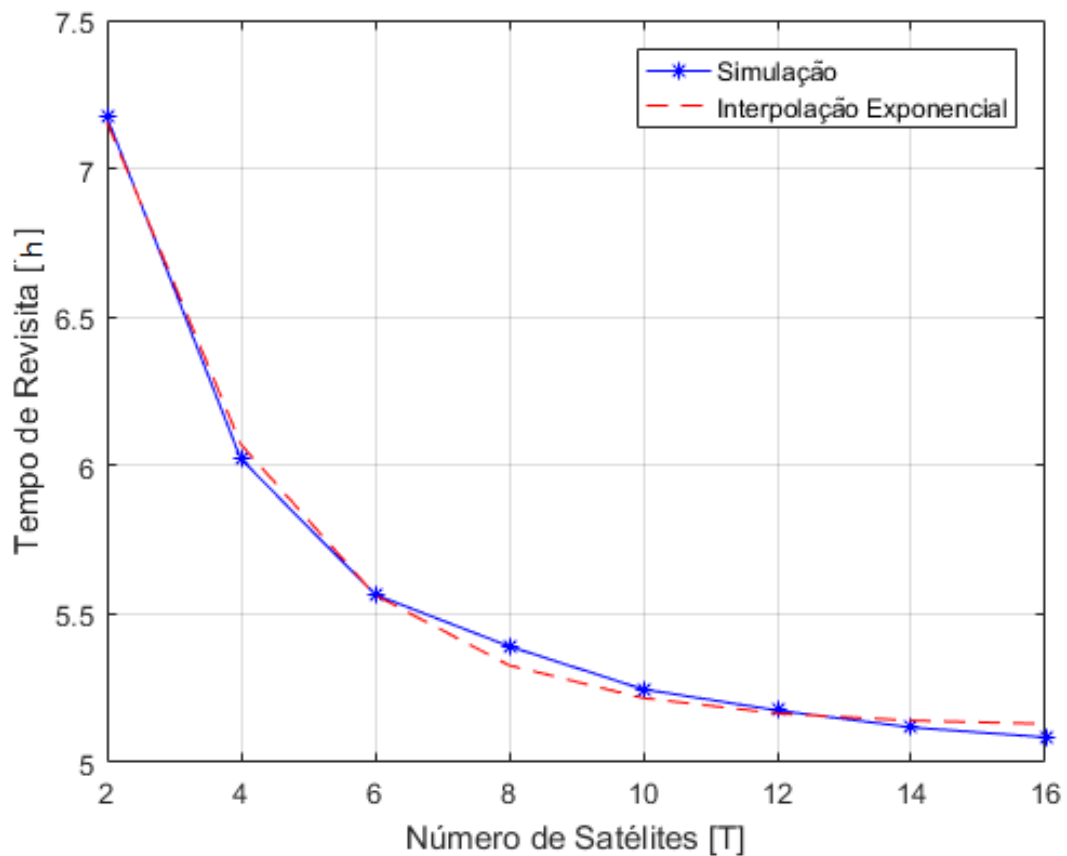
melhor solução compromisso a inclinação de $i = 25^\circ$, por garantir baixo tempo de revisita médio na região como um todo e uma boa uniformidade entre todas as sub-regiões analisadas.

4.1.3 Variação do número total de satélites (T)

Para analisar o impacto da variação do número total de satélites, foram realizadas simulações mantendo constante o número de planos em 2 e 3, e demais elementos orbitais constantes conforme a Tabela 4.3. Assim, a Figura 4.5 apresenta o resultado para o sistema em 2 planos, variando o total de satélites entre 2 e 14, com passo de 2. Ainda, a Figura 4.6 apresenta o resultado em 3 planos, com T entre 3 e 18 satélites, com passo de 3.

TABELA 4.3 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Walker Delta.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Altitude, h	km	800
Espaço Relativo, F	—	0
RAAN	°	45
Inclinação, i	°	25

FIGURA 4.5 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas). Para a interpolação exponencial : $R^2 = 0,9982$.

As figuras citadas apresentam ainda uma interpolação exponencial do tipo mostrado na Equação 4.2, com a , b e c constantes. Dessa forma, em ambos os casos analisados, os valores de R^2 nos permitem dizer que as curvas apresentadas se aproximam bastante de uma exponencial negativa, cujas equações para $P = 2$ e $P = 3$ são dadas pelas Equações 4.3 e 4.4, respectivamente.

$$y = ae^{-bx} + c \quad (4.2)$$

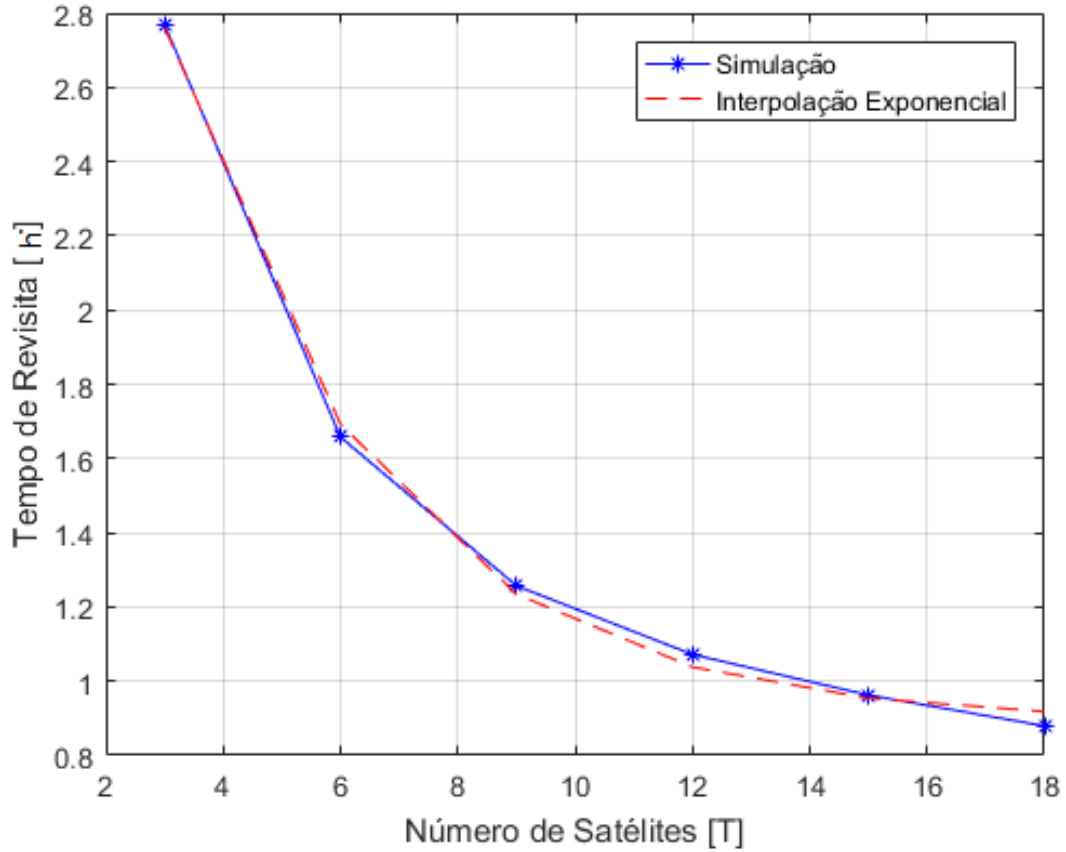


FIGURA 4.6 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas). Para a interpolação exponencial : $R^2 = 0,997$.

$$y = 4,367e^{-0,3811x} + 5,12 \quad (4.3)$$

$$y = 4,368e^{-0,2828x} + 0,8914 \quad (4.4)$$

De fato, em ambos os casos ocorre uma diminuição no tempo de revisita com aumento do número de satélites. No entanto, essa diminuição tende a ser cada vez menor conforme se aumenta o número de satélites utilizados. Podemos ver esse comportamento ao compararmos os dois pontos finais das Figuras 4.5 e 4.6 com os dois pontos iniciais desses gráficos.

Ademais, nota-se ainda que os valores apresentados de tempo de revisita são consideravelmente inferiores no caso em que há um maior número de planos, ou seja, para $P=3$. Tal fato pode ser corroborado ao se constatar que no caso em que o número total de satélites é igual a 6, o tempo de revisita para 2 planos ultrapassa 5,5 horas, enquanto que para 3 planos temos um valor perto de 1,6 horas. Ainda, para 12 satélites, no caso em que $P=2$, novamente teremos tempo de revisita perto de 5,2 horas, enquanto que para 3

planos temos um valor próximo de 1,1 horas.

Tal resultado aponta para um maior impacto no número de planos do que no número de satélites do sistema de monitoramento formado pela constelação do tipo Walker Delta. Esse resultado ainda é corroborado pelo estudo feito por Silva (2020), que apresenta resultado semelhante apesar do uso de um sensor com diferente *field of regard*.

A Figura 4.7 apresenta como variam os tempos de revisita máximo, mínimo e médio para cada área analisada nos casos de número total de satélites 2, 8 e 12, respectivamente, distribuídos em 2 planos. Esses valores mostram que mesmo em cada região analisada separadamente, o comportamento analisado na Figura 4.5 se manteve o mesmo, com menor diminuição relativa nos tempos de revisita com aumento dos satélites a partir de certa quantidade de satélites na constelação.

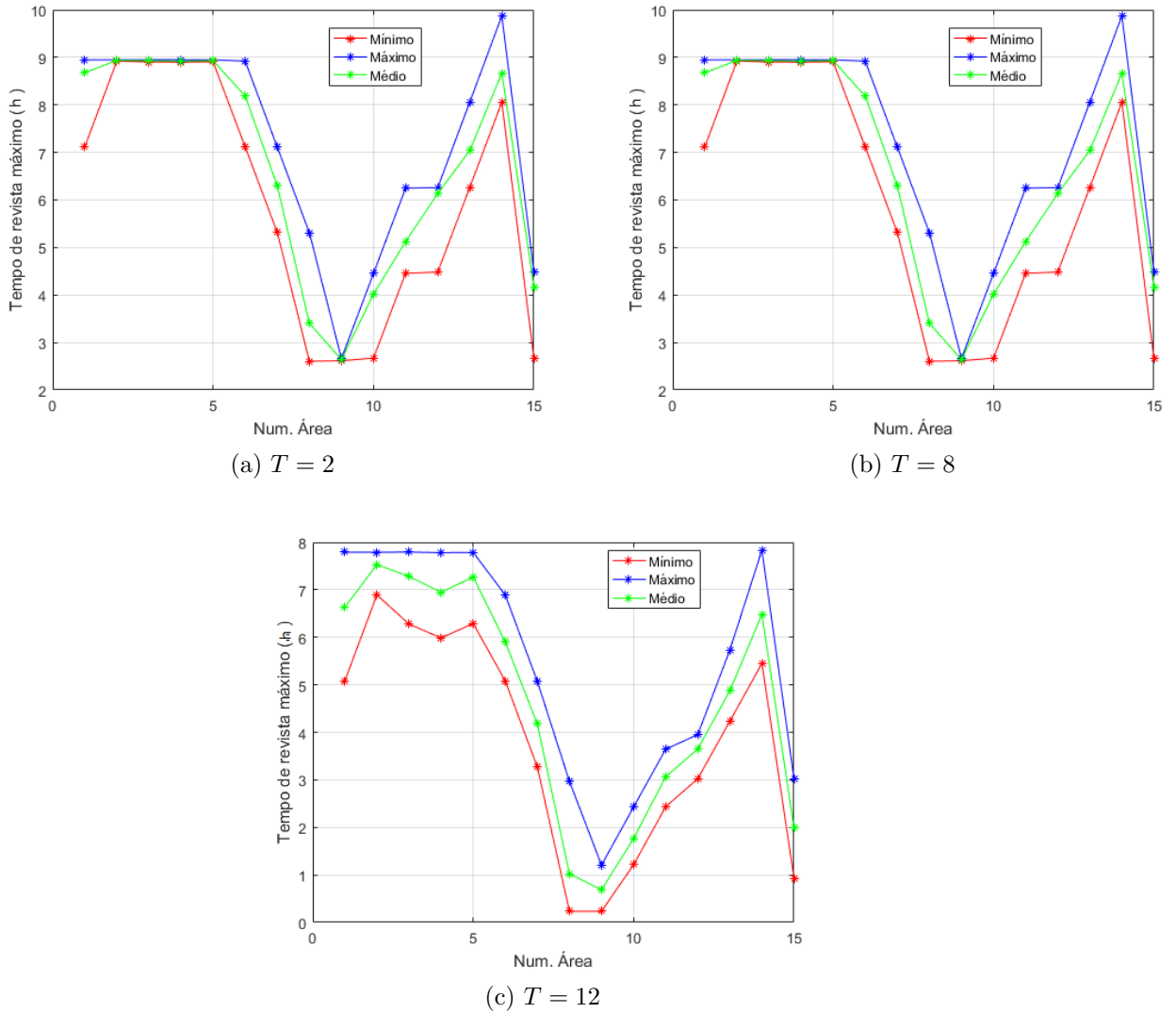


FIGURA 4.7 – Walker Delta: Tempo de revisita (mínima, média e máxima) em horas por região (divisão conforme Figura 3.3) para 2, 8 e 12 satélites em 2 planos.

4.1.4 Variação do número de planos (P)

Ademais, variações no número de planos também foram realizadas, mantendo-se constante o número total de satélites da constelação. Assim, utilizando-se um total de $T = 12$ satélites com o satélite primário com elementos orbitais definidos na Tabela 4.4, a Figura 4.8 mostra como se comportam o tempo de revisita médio na região estudada.

TABELA 4.4 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Walker Delta.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Altitude, h	km	800
Espaço Relativo, F	—	0
RAAN	°	45
Inclinação, i	°	25

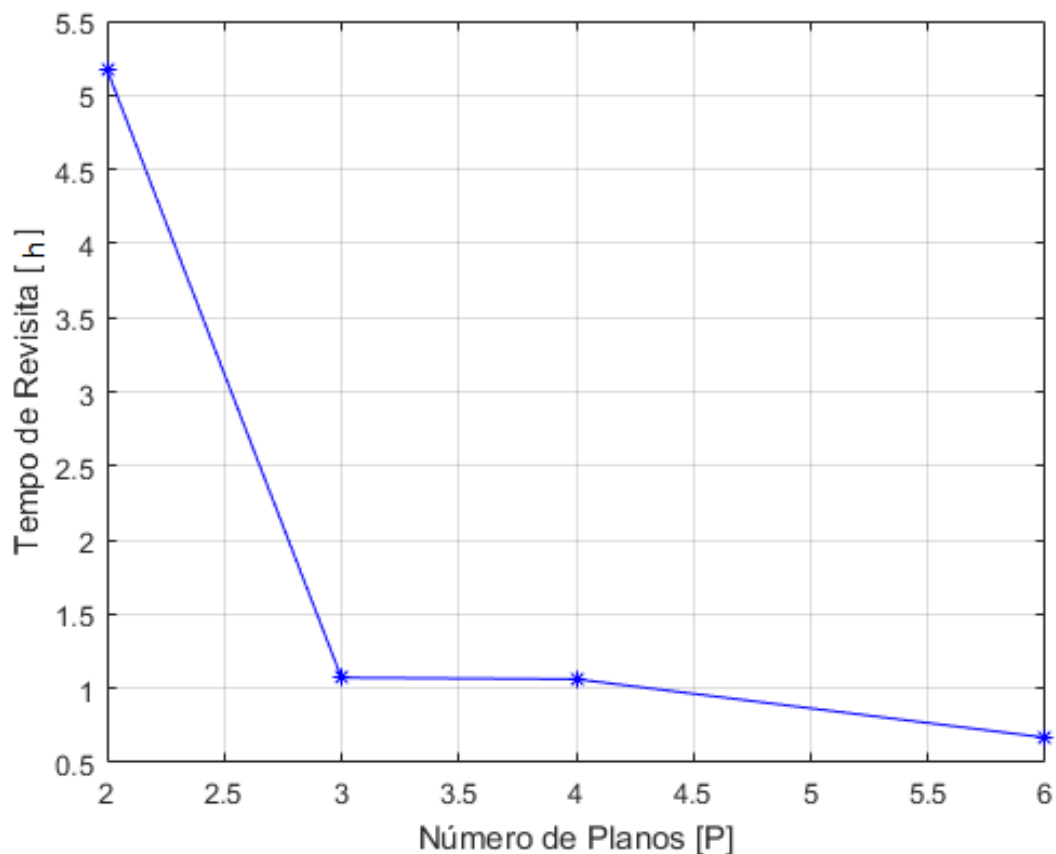


FIGURA 4.8 – Walker Delta: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas).

O estudo da figura citada permite perceber que, nesse caso, há uma relação entre o número de planos e o tempo de revisita médio na região. A priori, pode-se perceber que o aumento de planos, em especial quando se muda de $P = 2$ para $P = 3$, o valor obtido

se mantém praticamente constante. Esse resultado corrobora com a discussão levantada quando feita a análise da variação do número total de satélites. De fato, é possível notar que o impacto do aumento do número de planos é mais sentido em termos de tempo de revisita médio do que do aumento do número de satélites.

Ademais, a Figura 4.9 mostra todos os tempos de revisita obtidos para números de planos variando entre 1 e 7 conforme é variado o número total de satélites, com altitude de 800 km, $RAAN = 45^\circ$, $F = 0$ e $i = 25^\circ$. Portanto, é observado que para número de planos maior que 2 não há grande variação quando é aumentado o número de planos. Dessa forma, sabendo que o aumento do número de planos aumenta o custo da operação de se levar em órbita uma constelação, já que há um grande custo para mudar o plano orbital de um satélite, sendo às vezes necessário um novo lançamento de satélites. Percebe-se assim que as melhores soluções compromissos, que devem atender à condição de baixo custo, devem possuir número de planos $P \geq 3$, uma vez que para $P = 2$ os resultados gerados são menos expressivos que nesses demais casos.

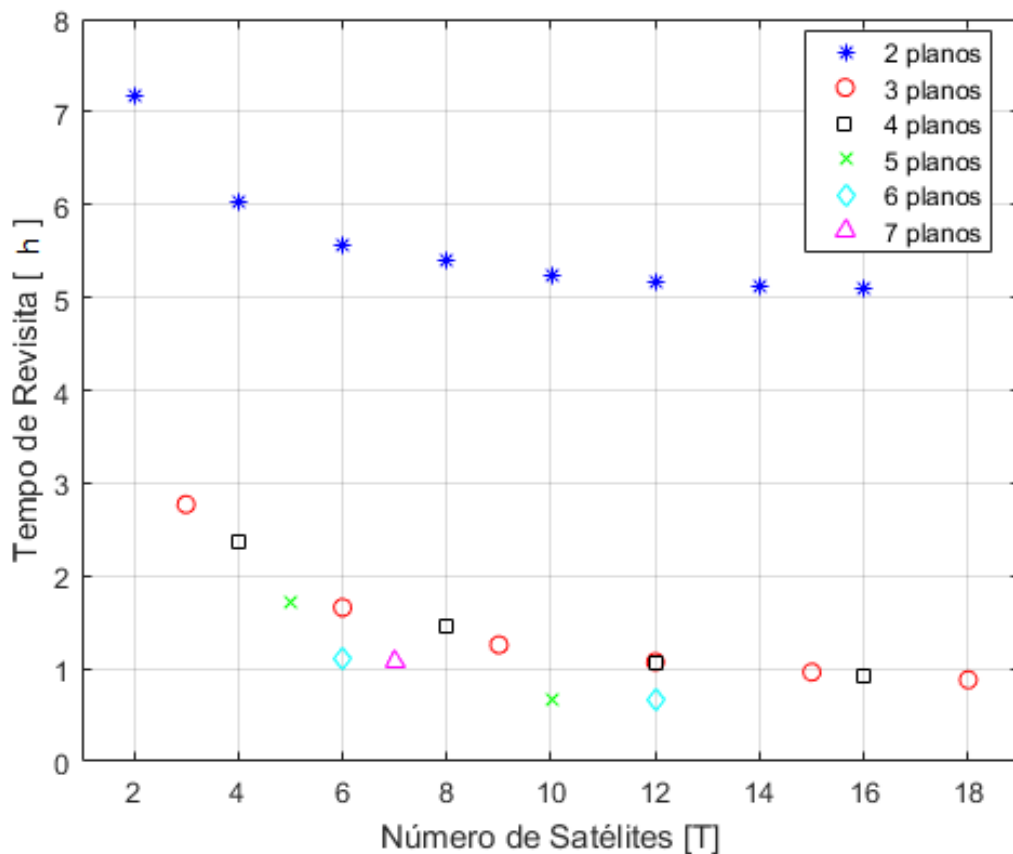


FIGURA 4.9 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para diferentes valores de P (região das 200 milhas).

4.1.5 Variação da RAAN

Utilizando uma configuração com número total de 6 satélites e 3 planos e com demais valores de elementos orbitais idênticos àqueles mostrados na Tabela 4.4 (com exceção da RAAN), variou-se os valores de RAAN a fim de se estudar o impacto desse valor no tempo de revisita médio na região delimitada pelas 200 milhas náuticas. Assim, estudou-se a variação entre 0° e 360° , com passo de 45° , conforme pode ser visto na Figura 4.10. Nota-se que há uma variação mínima entre as simulações realizadas. Dessa maneira, constata-se que a variação desse elemento não impacta significativamente a ordem de grandeza dos resultados.

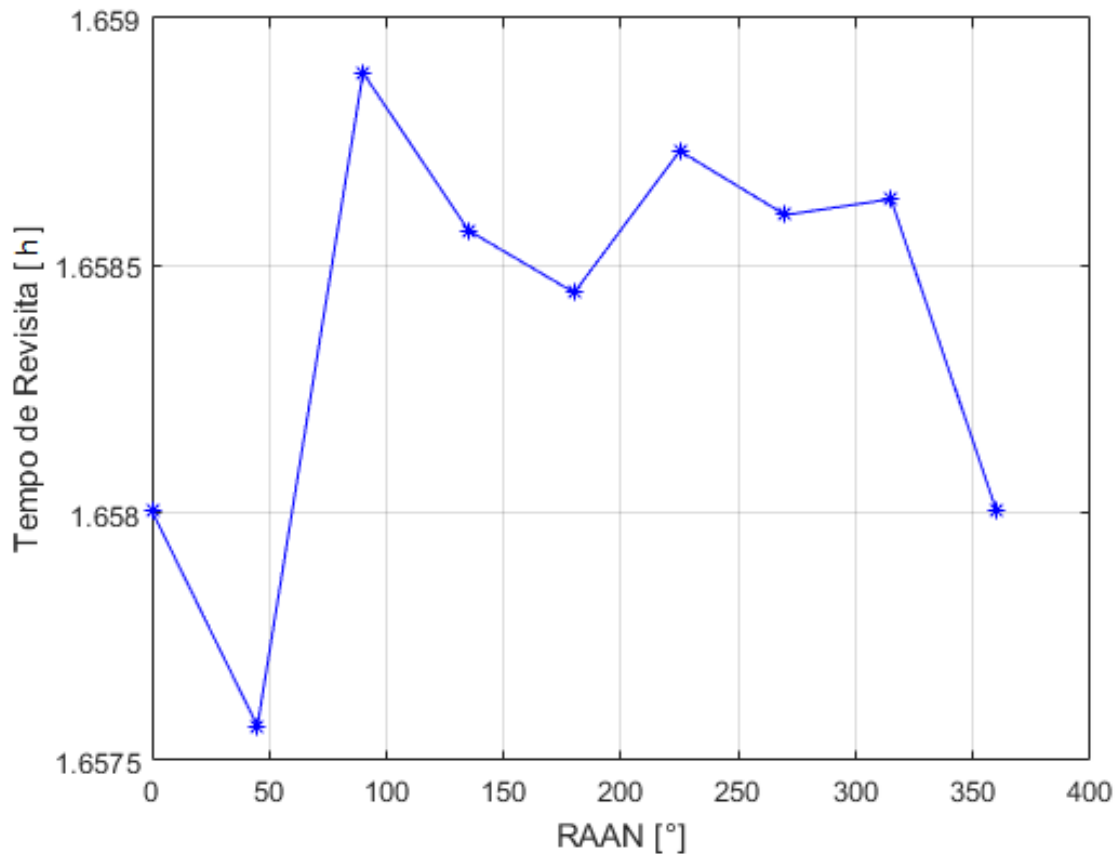


FIGURA 4.10 – Walker Delta: Variações de RAAN (região das 200 milhas).

Tal resultado era o esperado, uma vez que a geometria do problema faz uso de órbitas circulares, e, portanto, não faria sentido o impacto da RAAN no resultado final. As variações percebidas provavelmente advém de erros numéricos das soluções obtidas.

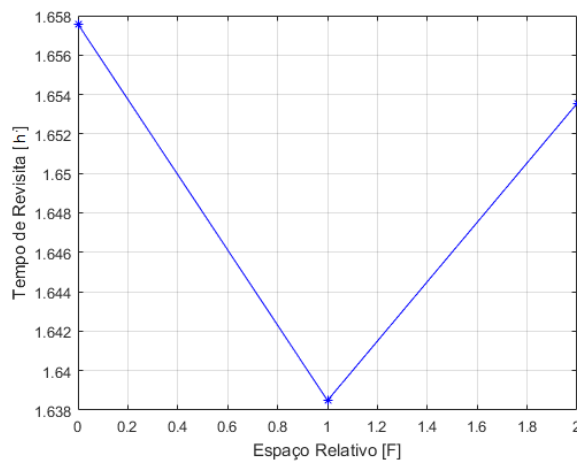
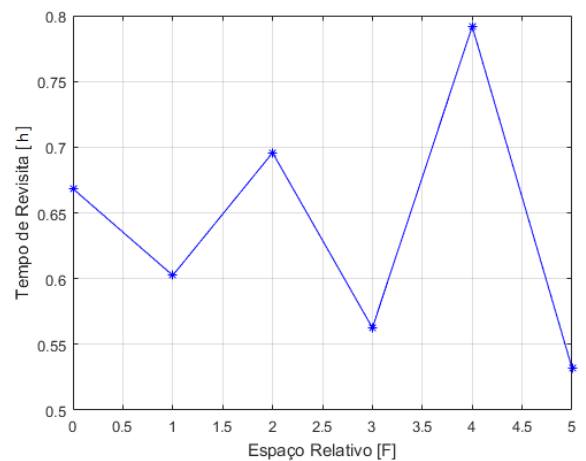
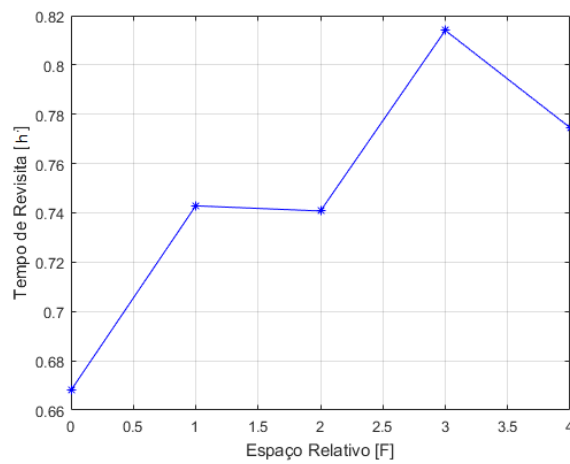
4.1.6 Variação do Espaço Relativo (F)

Para efetuar o estudo do efeito da variação do espaço relativo foram estudados três sistemas: o primeiro, mostrado na Figura 4.11a, apresenta os resultados obtidos numa constelação formada por 6 satélites em 3 planos, com F variando portanto entre 0 e 2. O segundo, conforme visualizado na Figura 4.11b, é composto por 12 satélites em 6 planos e, por fim, o terceiro apresenta (Figura 4.11c) uma constelação com $T = 10$ e $P = 5$. Os demais parâmetros são os mesmos para todas as constelações e estão dispostos na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 – Elementos fixos para a análise da variação do espaço relativo F - Walker Delta.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Altitude, h	km	800
RAAN	°	45
Inclinação, i	°	25

Nesse contexto, a Figura 4.11 apresenta resultados contrastantes. De fato, no primeiro caso, há variações de pouca ordem de grandeza em relação ao tempo de revisita médio na região estudada, enquanto que nos outros dois casos as variações são maiores a depender da escolha de F . Tal resultado nos leva a conclusão que o impacto no tempo de revisita médio varia a depender da configuração a ser escolhida, devendo esse fator ser analisado para cada constelação separadamente.

(a) $T = 6$ e $P = 3$ (b) $T = 12$ e $P = 6$ (c) $T = 10$ e $P = 5$ FIGURA 4.11 – Walker Delta: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas).

4.2 Resultados para Taxa de Acesso

Nesta seção, serão apresentados gráficos dos resultados obtidos e figuras representativas da região analisada de taxa de acesso quando são variados cada um dos elementos da constelação de satélite de padrão Walker Delta. Nas análises percentuais efetuadas, o valor de 100% é o tempo referente a 92 dias e, portanto, quando se fala de uma taxa de 10%, por exemplo, se fala de um tempo de 9,2 dias no qual a região está sendo coberta. Ainda, esse mesmo percentual de 10% significa uma cobertura de 2,4 horas (2 horas e 24 minutos) por dia em média.

4.2.1 Variação de Altitude

Tal qual realizado nas análises de Tempo de Revisita, também foi utilizado uma constelação Walker Delta onde as características da constelação analisada estão também mostradas na Tabela 4.1. Mantêm-se, ainda, a análise partindo de órbitas de 400 km a 800 km, cuja variação acontece com um passo de 100 km.

Dessa maneira, a Figura 4.12 exibe os resultados obtidos quando se trata do percentual de cobertura ao longo do tempo de simulação utilizado. Como no caso do estudo do tempo de revisita, novamente os resultados mostram uma tendência quase linear, evidenciada pelo valor de $R^2 = 0,9985$ e pela equação da reta dada pela Equação 4.5, com aumento na taxa de acesso conforme se aumenta a altitude analisada.

$$y = 0,01234x - 2,823 \quad (4.5)$$

Esse resultado corrobora com o resultado obtido anteriormente, devendo se dar prioridade a valores de altitude maiores dentro das possibilidades de órbita LEO. Ou seja, utilizar-se-á no conjunto de soluções as constelações de altitude de 800 km para se atender à demanda de taxa de acesso (e de revisita).

4.2.2 Variação de Inclinação

Para o caso de variação de inclinação, novamente foram utilizadas as características da constelação Walker Delta conforme apresentado no cálculo de Tempo de Revisita, presente na Tabela 4.2. Dessa maneira, a Figura 4.13 apresenta os resultados obtidos para inclinações variando entre 25° e 85°, com um passo de 5°. Nessa figura, foram desconsiderados os resultados obtidos para a inclinação entre 5°, 10°, 15° e 20°, uma vez que, nesses casos, não ocorre a cobertura completa da região analisada. De fato, as taxas de acesso totais nessas inclinações são, respectivamente: 70,88%, 78,56%, 90,45%

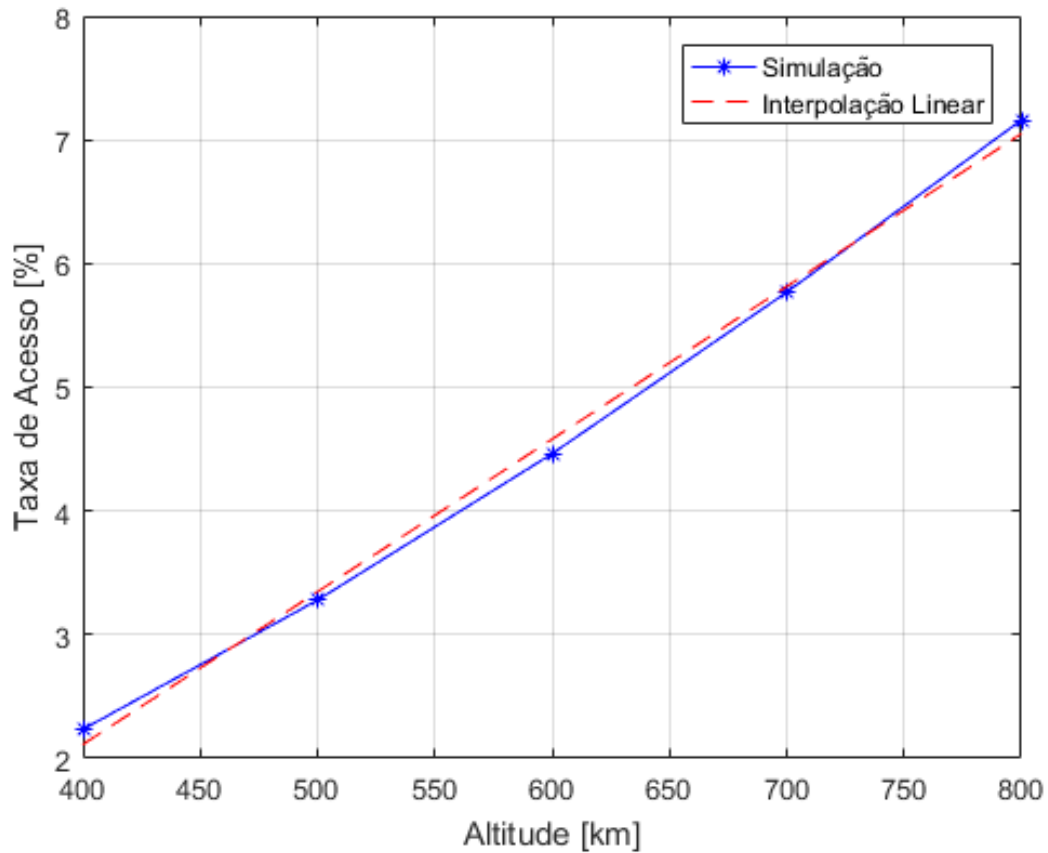


FIGURA 4.12 – Walker Delta: Variações de altitude (região das 200 milhas)- Impacto na taxa de acesso. Para a regressão linear: $R^2 = 0,9969$.

e 98,18%.

A análise do resultado obtido nos permite concluir que ocorre uma diminuição praticamente exponencial na porcentagem de cobertura da região analisada. Assim, a melhor região de inclinação para oferecer a melhor taxa de inclinação de acesso está na região entre 25° a 30° .

Portanto, a Figura 4.14 ilustra como ocorre a variação por região, em cada uma das 15 regiões definidas na Figura 3.3, em cada um dos casos de interesse. Ainda, a Figura 4.15 apresenta os resultados obtidos para essas áreas nessas inclinações, apresentando taxa de acesso mínima, média e máxima no tempo analisado.

A partir desses resultados apresentados, é importante notar que para a inclinação de $i = 20^\circ$ ocorre a maior variação entre os resultados entre as regiões, bem como maior variação entre máximo e mínimo de taxa de acesso estatística calculada. Isso posto, pode-se alegar que, no caso estudado, as inclinações de maior interesse se dão na faixa de 25° a 30° .

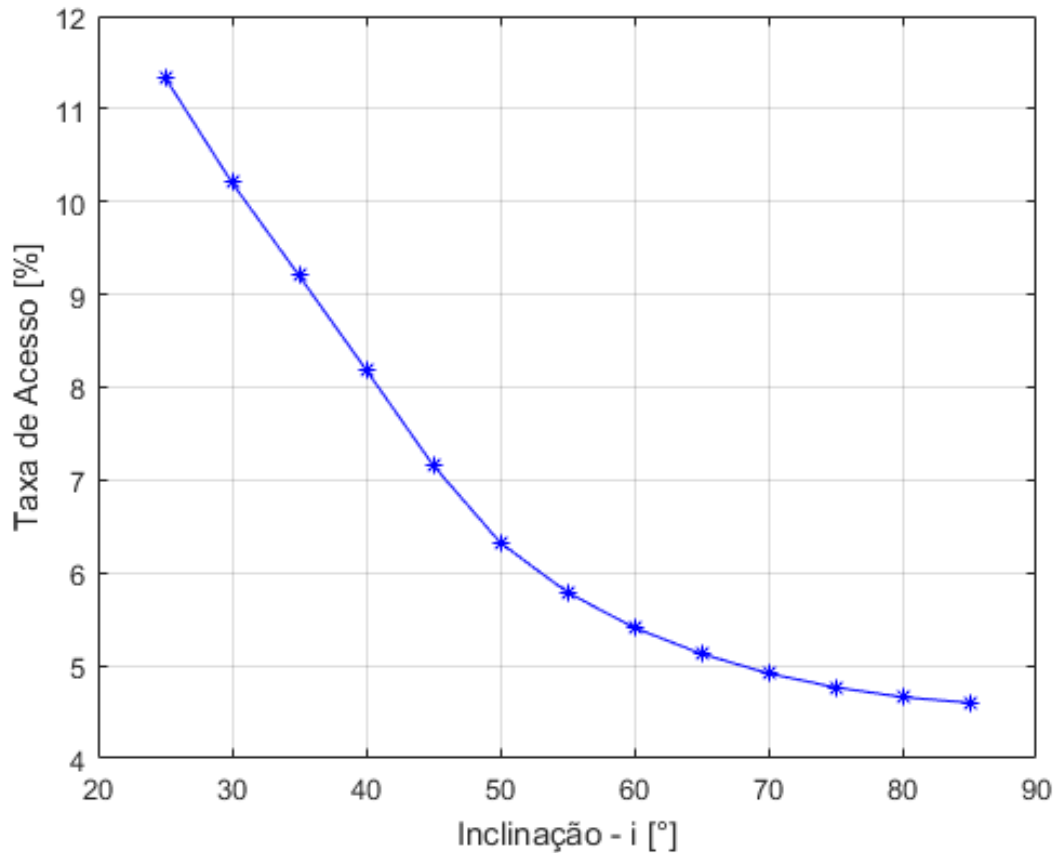


FIGURA 4.13 – Walker Delta: Variações de inclinação (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.

4.2.3 Variação do número total de satélites (T)

Foi realizada também a análise do impacto na taxa de acesso conforme ocorre a variação do número total de satélites, para um determinado número de planos P fixo em 2 e 3. Para tal, manteve-se as demais características da constelação conforme a Tabela 4.3, e, portanto, as Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os resultados obtidos para os casos $P = 2$ e $P = 3$, respectivamente.

No caso de 2 planos, observamos uma tendência de aumento considerável na cobertura a um passo de 4 satélites. Dessa forma, os valores próximos de 2 em 2 (2 e 4, 6 e 8, 10 e 12, 14 e 16), ao serem selecionados um desses pares, apresentam aumento considerável nas taxas de acesso em comparação ao par anterior analisado, mas apresentam valores muito próximos em cada par. Inclusive, alguns desses pares apresentam taxa de acesso um pouco inferior ao se aumentar o número de satélites estudado. Consequentemente, para uma solução com 2 planos, deve-se prevalecer como número total a ser utilizado valores de 4 em 4: valores de 2, 6, 10 e assim por diante.

Já no caso de 3 planos, observa-se uma tendência mais linear, com aumentos graduais

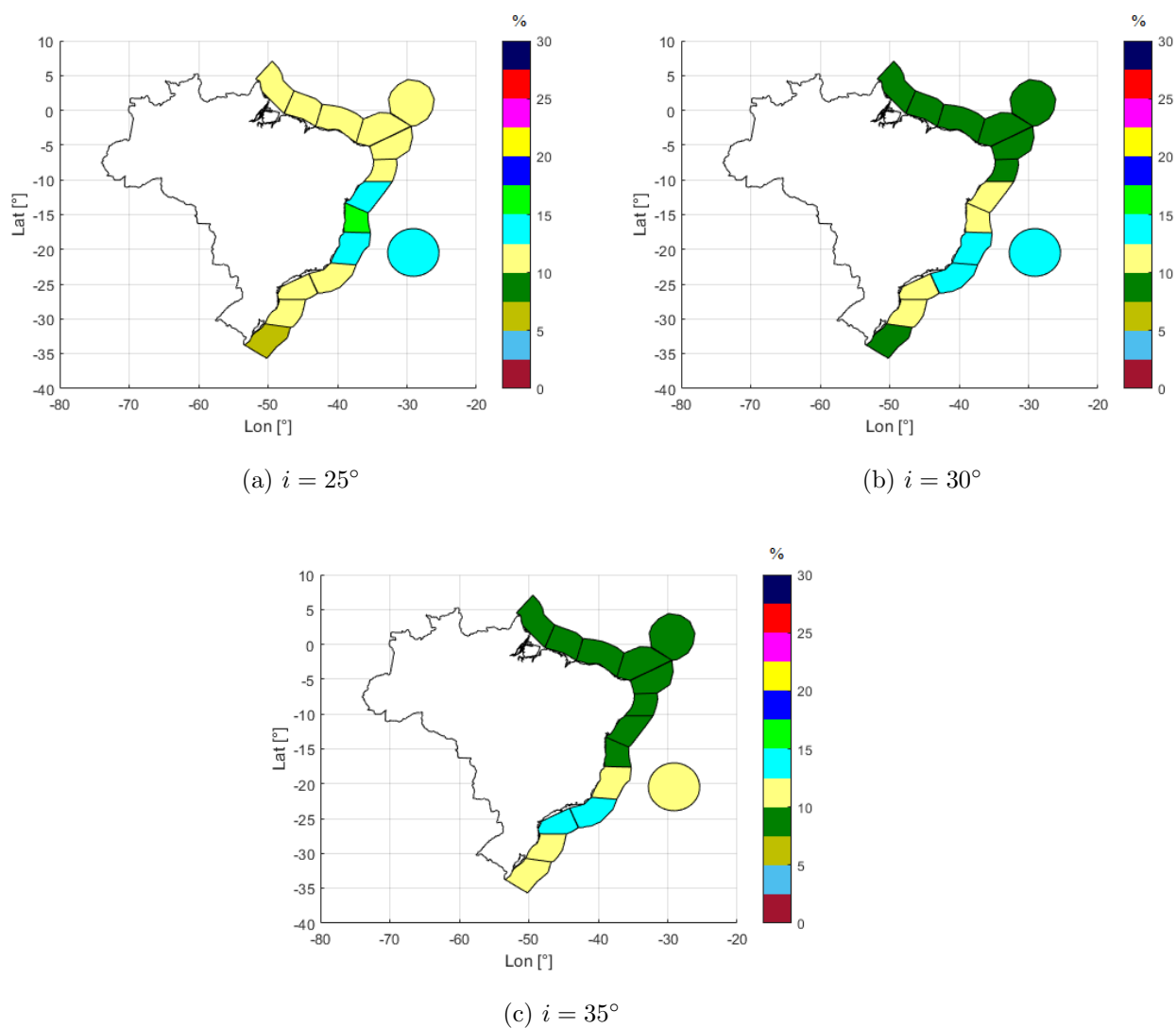


FIGURA 4.14 – Walker Delta: Taxa de acesso (%) por região (divisão conforme Figura 3.3) - Impacto na taxa de acesso.

na taxa de acesso conforme é aumentado o número total de satélites, ainda que de modo não necessariamente linear.

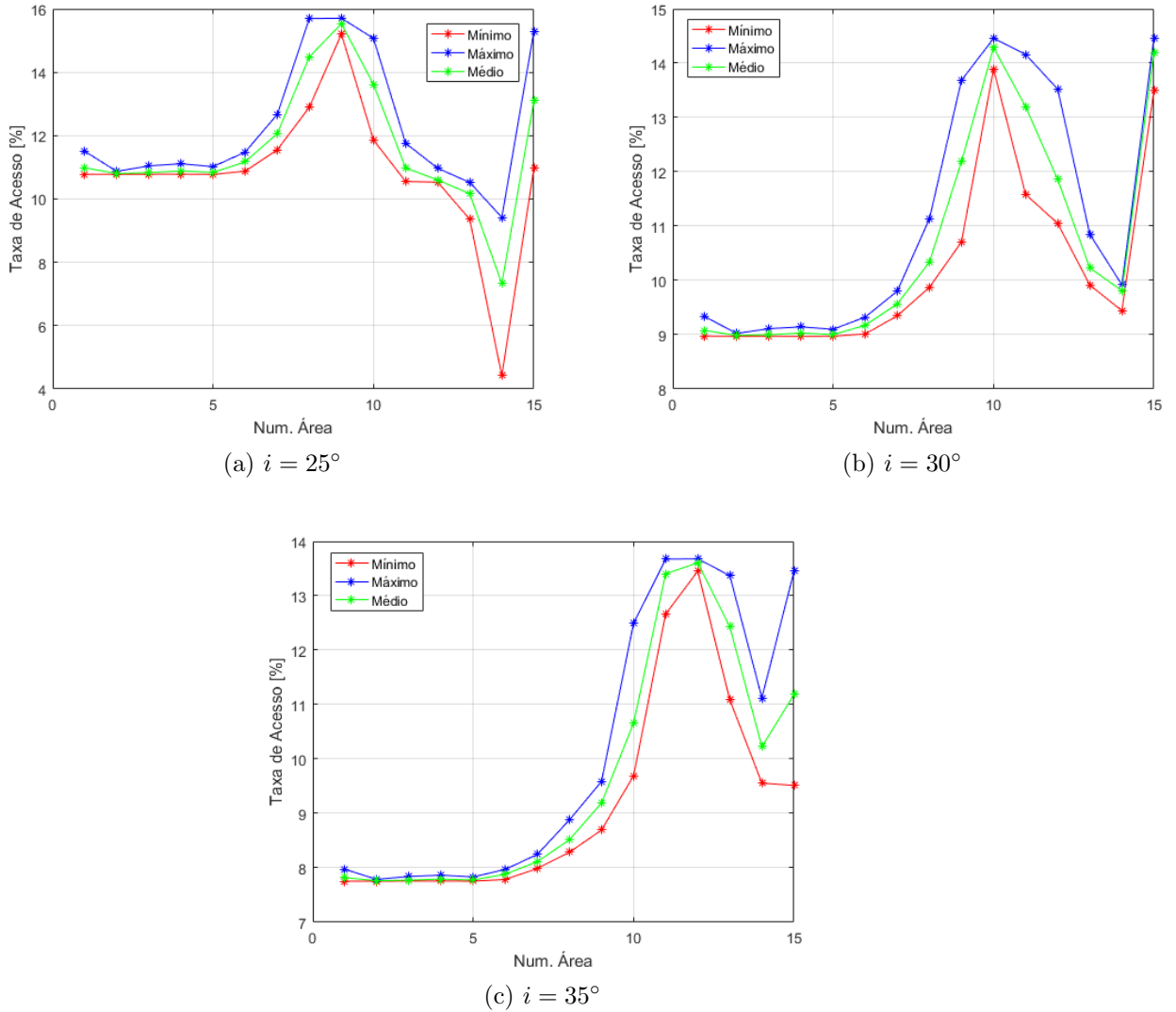


FIGURA 4.15 – Taxa de acesso máximo, mínimo e médio (%) por região (divisão conforme Figura 3.3) - Impacto na taxa de acesso.

4.2.4 Variação do número de planos (P)

Seguindo os elementos propostos na Tabela 4.4 e utilizando um total T de 12 satélites, a Figura 4.18 apresenta a solução da variação dos resultados para os planos P variando entre 2, 3, 4 e 6.

Nesse caso, percebe-se que há impacto significativo na taxa de acesso obtida, a depender do número de planos utilizados. De fato, ainda parece não haver relação que permita uma conclusão sobre o comportamento do número total de planos para um mesmo número de satélites.

Portanto, não se percebe uma relação clara, apesar de apresentada uma tendência, entre qual escolha seria preferível em termos de aumento de taxa de acesso: aumentar a quantidade de satélites total T , mantendo-se a quantidade de planos, ou o número de

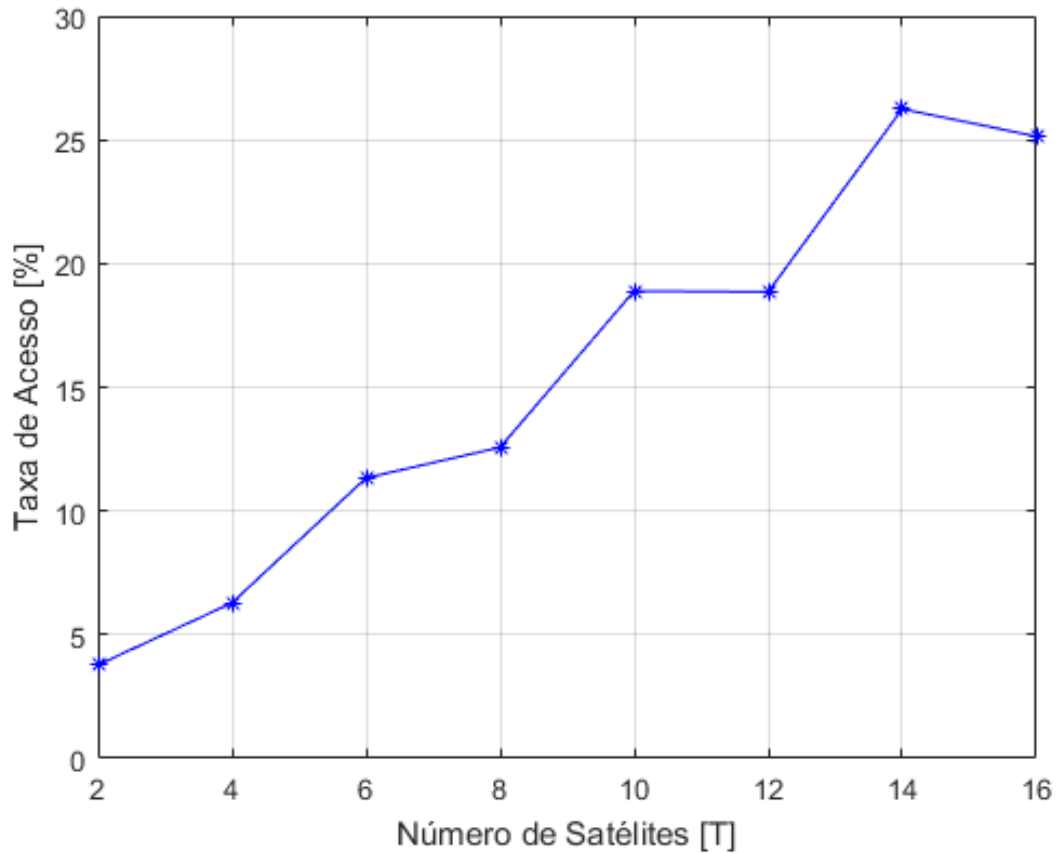


FIGURA 4.16 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.

planos P , mantendo-se a quantidade T .

Esse resultado se apresenta em contraste com aquele visto na mesma análise para tempo de revisita, onde claramente existe uma relação que privilegia a escolha de se aumentar o número de planos em detrimento do número de satélite. Ao contrário, para a taxa de acesso a tendência, apesar de não ser definitiva, tende mais na direção contrária ao do tempo de revisita, respeitando a análise para 2 e 3 planos feitas anteriormente.

Ainda, a Figura 4.19 apresenta a taxa de acesso para diferentes valores de T e para diferentes valores de P , quando se mantém uma altitude de 800 km, $RAAN = 45^\circ$, $i = 25^\circ$ e $F = 0$. Dessa forma, nota-se uma tendência de aumento mais uniforme da taxa de acesso com aumento do número de satélites, com pouca alteração percebida para diferentes planos com mesmo número T .

4.2.5 Variação da RAAN

Para simulação do impacto na variação da RAAN na taxa de acesso na região das 200 milhas náuticas, utilizou-se novamente os dados presentes na Tabela 4.3, com exceção do

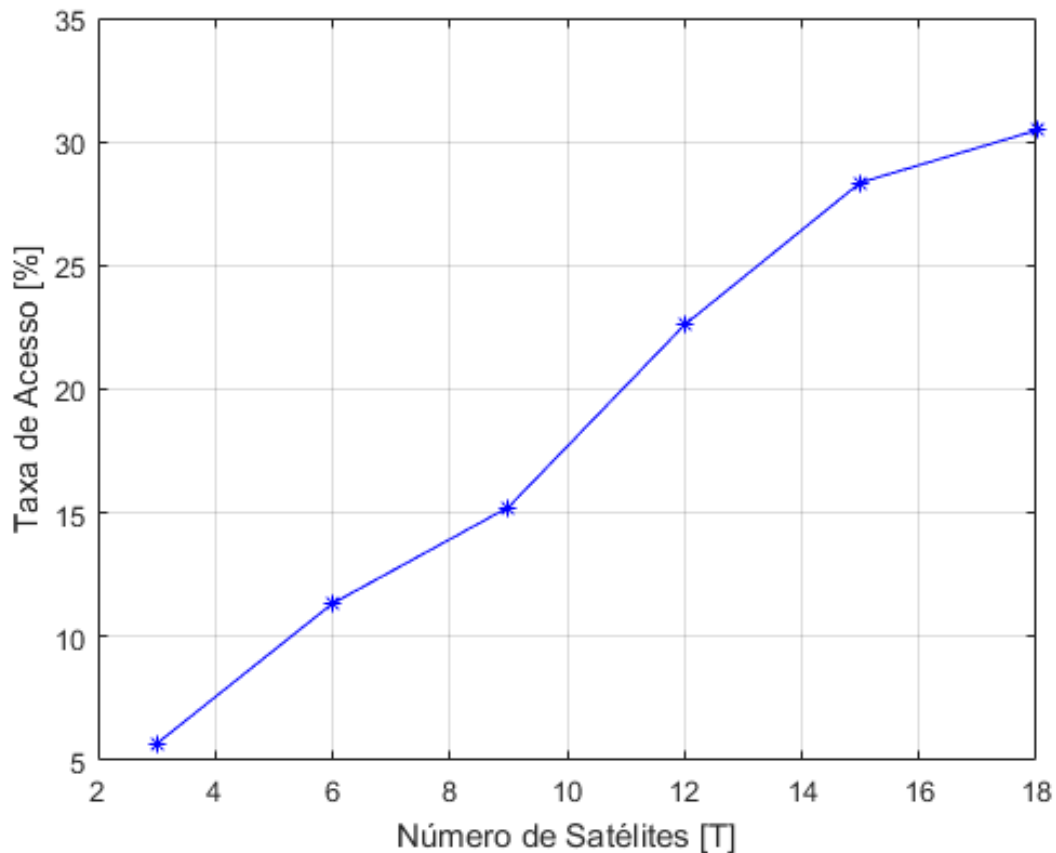


FIGURA 4.17 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.

valor de RAAN que aqui varia caso a caso entre 0 e 180°, com um passo de 45°. Por consequência, a Figura 4.20 apresenta os resultados obtidos e, dessa forma, é possível notar que ocorre uma variação pequena em cada um dos casos. Conforme visto no cálculo da variação da RAAN no tempo de revisita, novamente percebe-se que praticamente não há impacto significativo na ordem de grandeza do resultado obtido.

4.2.6 Variação do Espaço Relativo (F)

Seguindo as mesmas configurações propostas na Tabela 4.5, foi efetuado o estudo da variação do espaço relativo utilizando dois sistemas: o primeiro, apresentado na Figura 4.21a, apresenta os resultados obtidos numa constelação formada por 6 satélites em 3 planos, com F variando portanto entre 0 e 2. A segunda, conforme visualizado na Figura 4.21b, é composto por 12 satélites em 6 planos.

Todavia, as Figuras 4.21a e 4.21b nos mostram que, conforme discutido anteriormente analisada a Figura 4.11, que trata do tempo de revisita dos sistemas, novamente os resultados não apresentam padrão algum. Dessa forma, cada formação de constelação apresenta

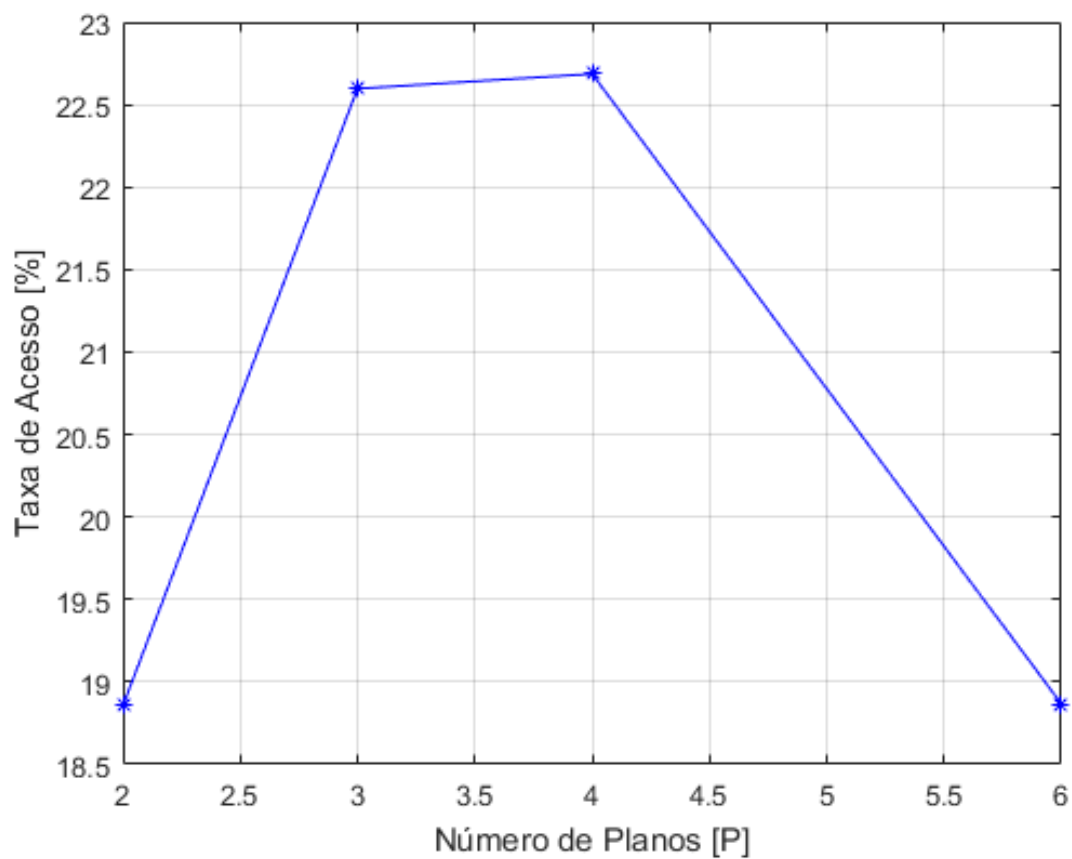


FIGURA 4.18 – Walker Delta: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.

um valor diferente de F que apresenta melhor resultado possível para a taxa de acesso.

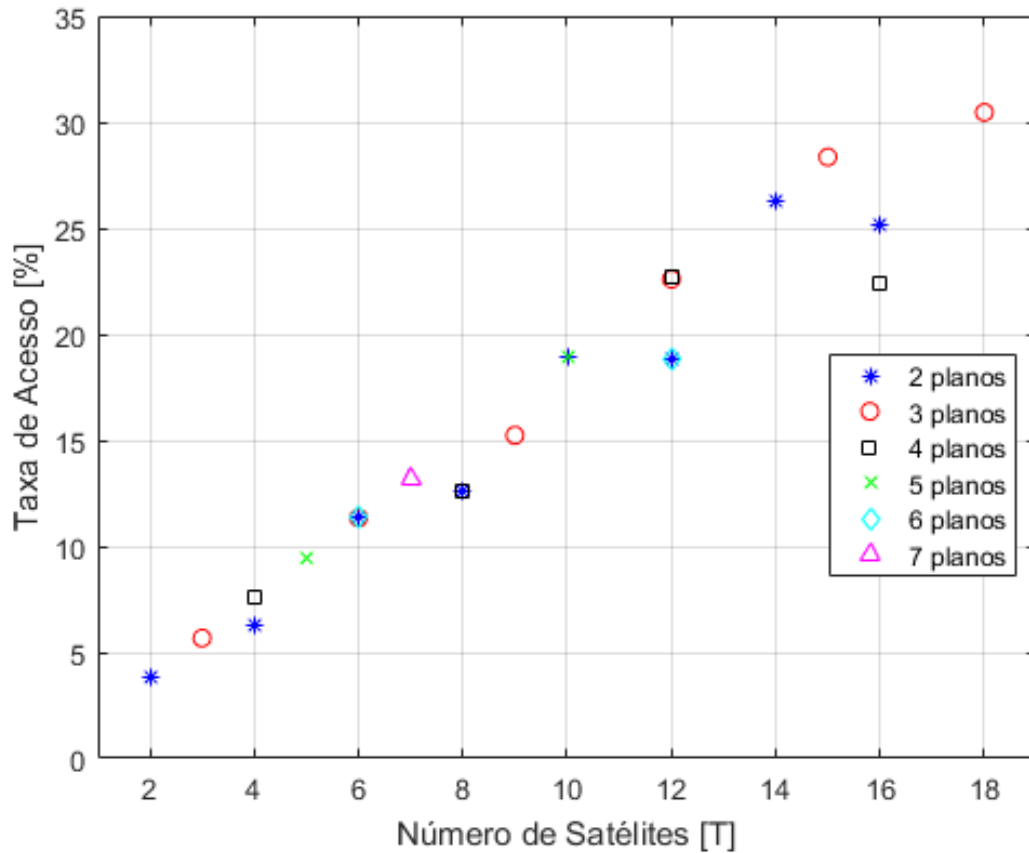


FIGURA 4.19 – Walker Delta: Variações de número total de satélites para vários P (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.

4.3 Soluções propostas

A partir dos estudos realizadas para o tempo de revisita e taxa de acesso para constelações Walker Delta, percebe-se que existem algumas configurações que beneficiam ambas essas grandezas. Não obstante, tendo em foco o objetivo de se trabalhar com soluções viáveis (ou melhores soluções compromisso), o fator quantidade de satélites por muitas vezes se torna um limitante importante devido ao custo de fabricação, lançamento e manutenção de satélites. Assim, devem ser analisadas soluções cuja quantidade de satélites seja viável para operações de monitoramento como a proposta, e foram analisados os valores para a região de 200 milhas náuticas. Assim, poderíamos querer obter uma solução que forneça respostas melhores para determinadas sub-regiões, o que não foi analisado especificamente.

Ainda, as variáveis de altitude, inclinação apresentam impactos imediatos nos resultados e a mudança da RAAN não apresenta impacto algum nas constelações em termos das figuras de mérito analisadas. Além disso, em termos de tempo de revisita, o estudo analisado deixa claro que as melhores soluções são aquelas que nos fornecem maiores

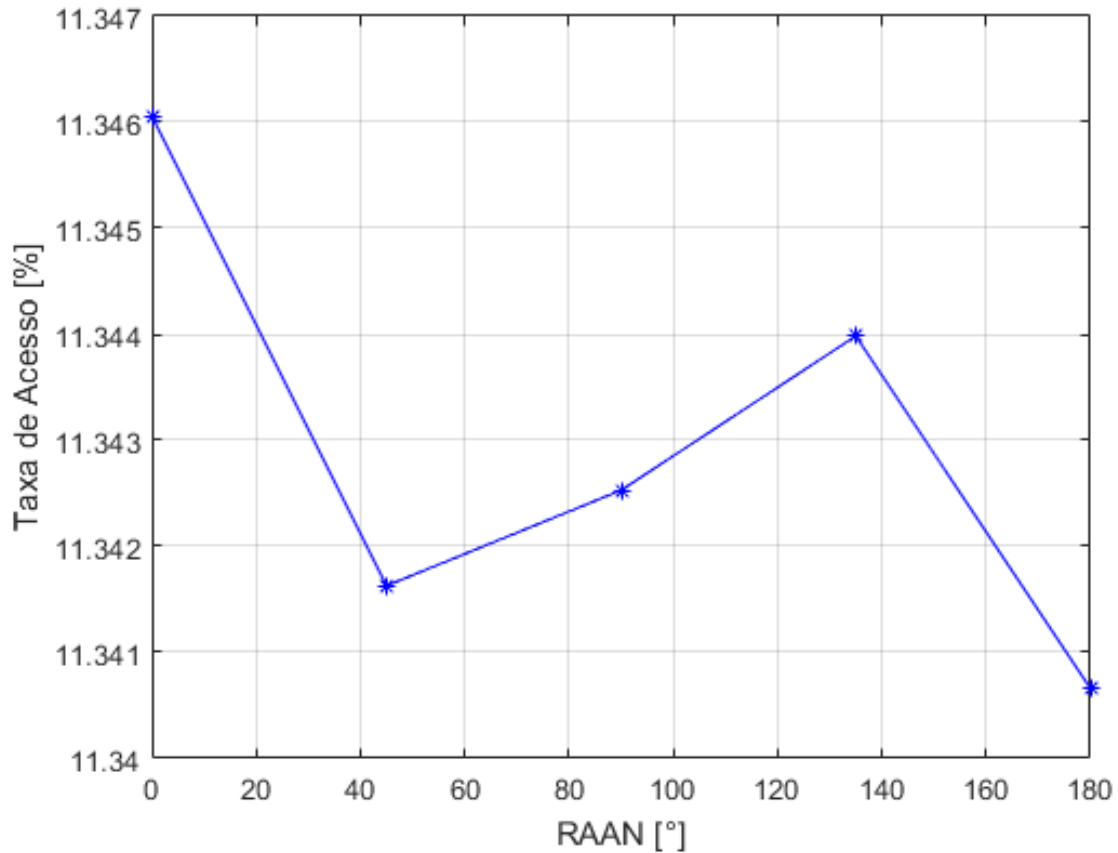
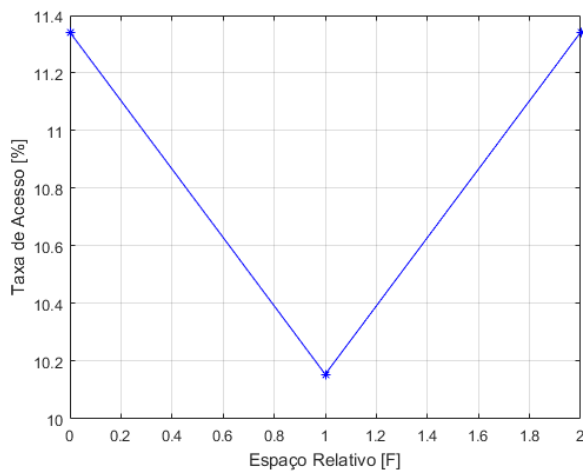
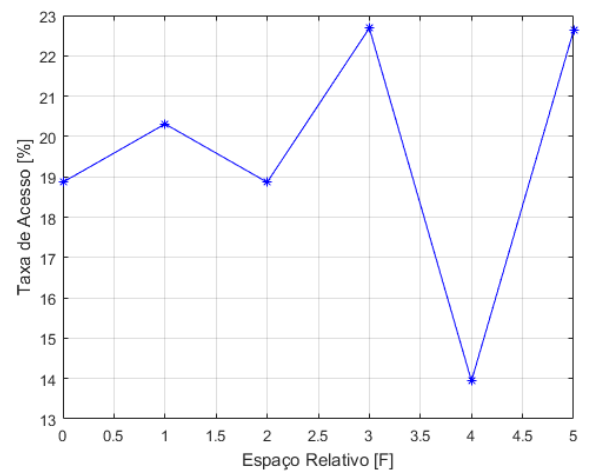


FIGURA 4.20 – Walker Delta: Variações de RAAN (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.



(a) $T = 6$ e $P = 3$



(b) $T = 12$ e $P = 6$

FIGURA 4.21 – Walker Delta: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.

valores de P . Ademais, deve-se buscar diminuir o número de planos da constelação, pois caso seja necessário alguma manobra de reconfiguração, mudar um satélite de plano é

muito custoso energeticamente (WERTZ *et al.*, 2011). Com isso, obtemos 2 conjuntos de soluções discutidos a seguir.

4.3.1 Primeira solução proposta

A primeira solução viável que atende à demanda de modo satisfatório é a composta por $T = 6$ e $P = 3$. Essa constelação atende às demandas, em especial à de revisita, com o menor número total de satélites. As demais características da constelação podem ser obtidas pela análise dos resultados obtidos:

- **Altitude:** em ambos os casos, os resultados melhoram com aumento da altitude. Logo, a escolha se dá para uma altitude de 800 km.

- **RAAN:** para essa constelação, em ambas as figuras de mérito não há mudança significativa. Logo, essa variável não é essencial e pode ser escolhida dentro do intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$.

- F : nessa constelação, os melhores valores são obtidos para qualquer valor de F entre 0 e 2.

- i : os melhores resultados foram aqueles obtidos para inclinações de $[25^\circ, 30^\circ]$.

Essa solução apresenta como melhores resultados de tempo de revisita em torno de 1 hora e 40 minutos e taxa de acesso em torno 11%. Nesse caso, esses melhores valores são obtidos para a inclinação de 25° . Pode-se notar que essa solução não atinge completamente a hipótese inicial desejável de tempo de revisita de menos de 1,5 horas, mas fica muito próxima, podendo ser adotada sem problemas, uma vez que a hipótese mínima é de 3 horas de revisita.

Ainda, as Figuras 4.4a e 4.15a, recapitulados na Figura 4.22, revelam os tempos de revisita e taxa de acesso em cada uma das 15 sub-regiões nas quais são divididas a região de interesse. Nelas, fica claro que os resultados variam a depender da posição de latitude e longitude, com melhores valores sendo encontrados na costa do sudeste e parte do nordeste brasileiro.

4.3.2 Segunda solução proposta

Uma vez que a solução com 12 satélites possui no máximo taxa de acesso em 22,6% e a solução com 9 satélites exibe taxa de acesso no máximo em torno de 15,2%, a segunda solução proposta apresenta $T = 10$ e $P = 5$, pois tem taxa de acesso em torno de 19,0%, mostrando aumento considerável para um sistema com 9 satélites e pouca diferença para um de 12 (com 2 satélites a mais, portanto maior investimento financeiro).

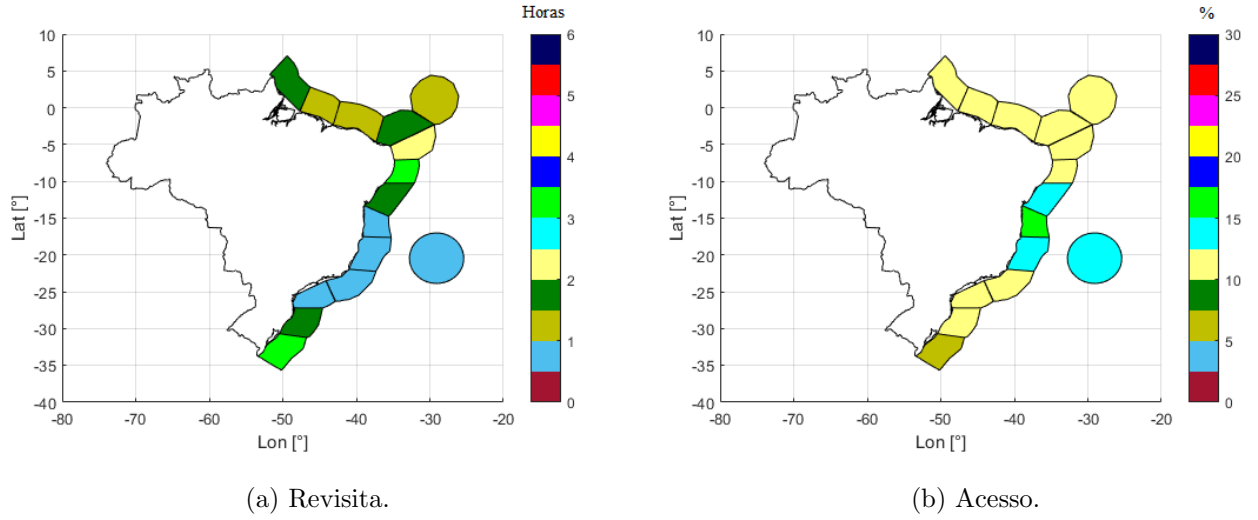


FIGURA 4.22 – Walker Delta: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a primeira solução proposta.

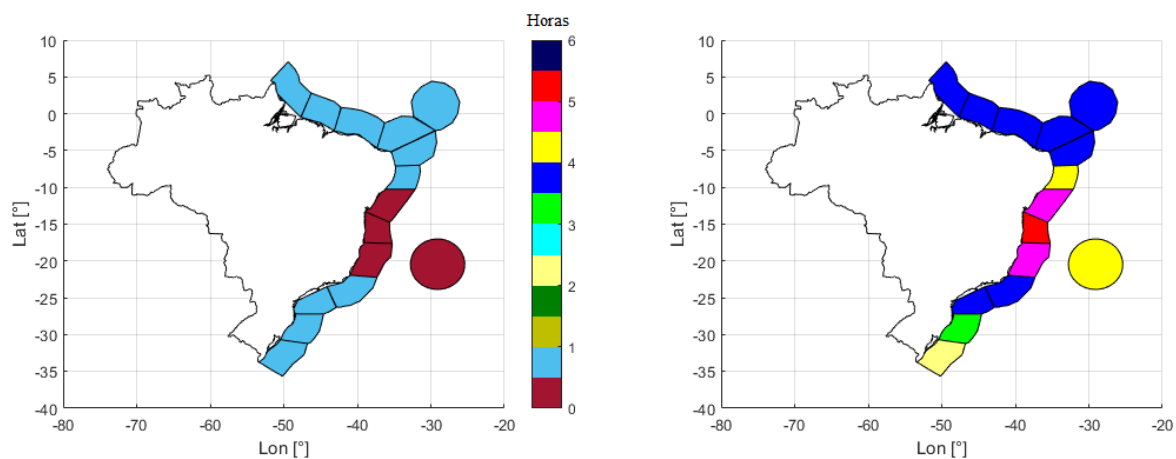
A escolha de $P = 5$ é justificada, no entanto, não pela melhor taxa de acesso obtida, uma vez que com $T = 10$ os valores de taxa de acesso para 2 e 5 planos são quase iguais, mas sim pelo tempo de revisita, que no caso de 2 planos tende a ser muito maior que para 5 planos. O primeiro fica perto das 5 horas e 15 minutos e o segundo perto de 40 minutos.

Portanto, tal solução é mais focada em aumentar a taxa de acesso do sistema sem aumentar consideravelmente a quantidade de satélites. Temos então:

- **Altitude:** Novamente, a escolha se dá para uma altitude de 800 km.
- **RAAN:** da mesma maneira que a anterior, dentro do intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$.
- F : nessa constelação, os melhores valores são obtidos para $F \neq 3$.
- i : os melhores resultados foram aqueles obtidos para inclinações de $[25^\circ, 30^\circ]$.

Essa solução apresenta tempo de revisita de aproximadamente 40 minutos e taxa de acesso em torno de 19,0%, aumentando a taxa de acesso e diminuindo mais do que na metade o tempo de revisita anterior, sem precisar dobrar o número total de satélites. Novamente, os melhores resultados são obtidos para inclinações mais próximas de 25° . Percebemos ainda que essa solução atinge a hipótese desejável de tempo de revisita menor que 1,5 horas.

Ainda, a Figura 4.23 mostra os tempos de revisita e taxa de acesso em cada uma das 15 sub-regiões nas quais são divididas a região de interesse. Novamente, é evidenciado que os resultados mudam conforme posição de latitude e longitude das sub-regiões, com melhores valores novamente sendo encontrados na costa do sudeste e parte do nordeste brasileiro.



(a) Revisita.

(b) Acesso.

FIGURA 4.23 – Walker Delta: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a segunda solução proposta.

5 Resultados - Constelação do tipo Polar

Neste capítulo serão exibidos os resultados de tempo de revisita e taxa de acesso para as constelações do tipo Polar. Para tal, serão mostrados as variações de resultados vistas com a variação de cada parâmetro da constelação, que possui inclinação constante e igual a 90° . Por fim, da mesma forma que no capítulo anterior, são propostas duas soluções para o problema de monitoramento da Amazônia Azul.

5.1 Resultados para Tempo de Revisita

Nesta seção, serão apresentados gráficos dos resultados obtidos e figuras representativas da região analisada de tempo de revisita quando são variados cada um dos elementos da constelação de satélite de padrão Polar.

5.1.1 Variação de altitude

Para a obtenção dos resultados de variação de altitude foi utilizada uma constelação Polar com um total (T) de 6 satélites, distribuídas num total de planos (P) igual a 3, onde se variou as altitudes analisadas entre 400 km e 800 km, com um passo de 100 km, com os demais parâmetros orbitais mostrados na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Elementos fixos para a análise da variação da altitude - Polar.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Espaço Relativo, F	—	0
RAAN	$^\circ$	45
Total de satélites, T	—	6
Número de Planos, P	—	3

A Figura 5.1 mostra como variam os resultados do tempo de revisita médio nos pontos do *grid* na região de 200 milhas náuticas (Figura 3.2) variando-se as altitudes. Diferente

do que ocorre em constelações Walker Delta onde é observado uma diminuição linear nos resultados, para constelações polares o mesmo não é percebido, apesar da tendência de diminuição do tempo de revisita com o aumento da altitude ter se mantido.

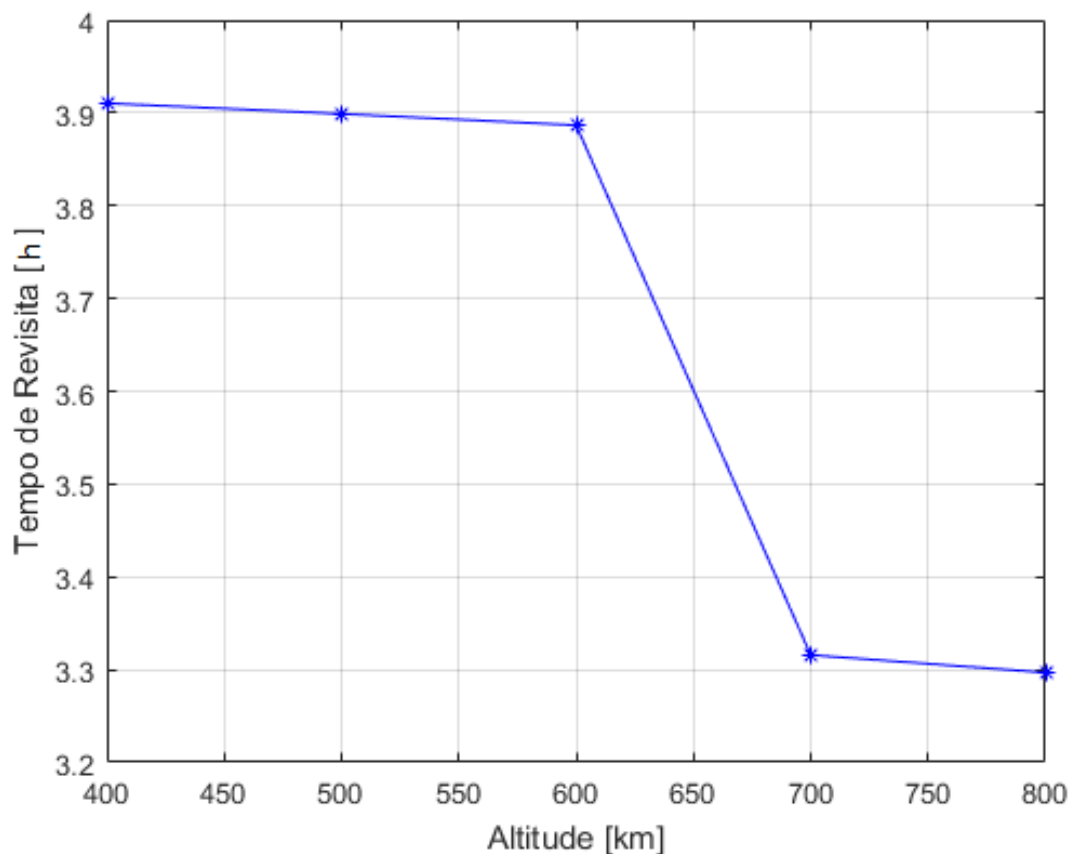


FIGURA 5.1 – Polar: Variações de altitude (região das 200 milhas náuticas).

Ainda, a Figura 5.2 apresenta a distribuição dos tempos de revisita médio em cada uma das 15 sub-regiões apresentadas na Figura 3.3. Da mesma maneira que observado para constelações Walker, os resultados apresentados nos permite concluir que o valor do tempo de revisita cai em cada uma das regiões analisadas com o aumento da altitude.

Dessa forma, observamos uma melhora significativa dos resultados em termos de tempo de revisita para aumento de altitudes apenas para altitudes superiores a 600 km, tanto na região completa das 200 milhas quanto nas divisões da mesma. Tal resultado nos permite adotar como altitude de referência nos resultados a solução de 800 km ao invés de 700 km, apenas por apresentar, nas sub-regiões, um valor de tempo de revisita menor que 3 horas.

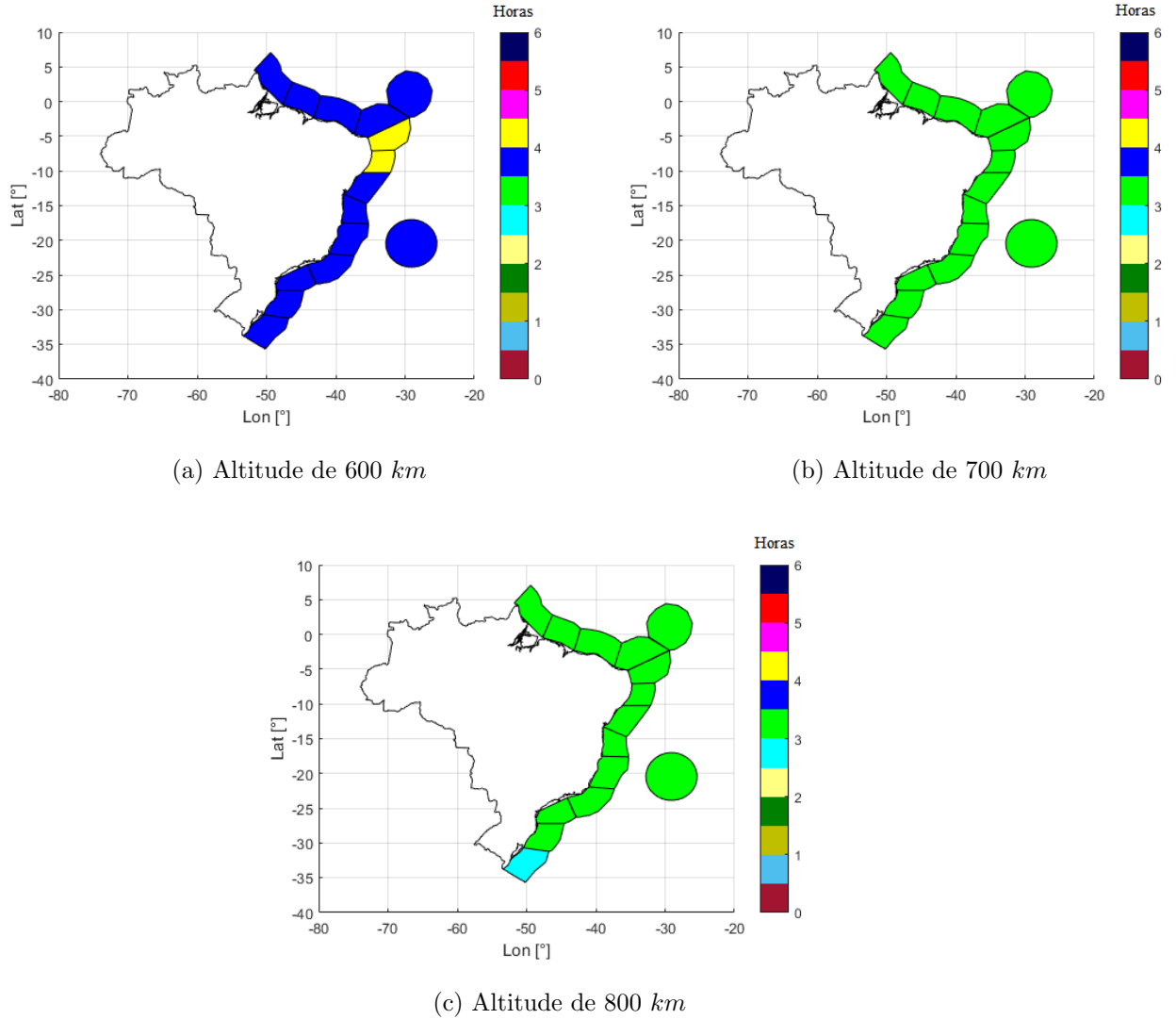


FIGURA 5.2 – Polar: Tempo de revisita em horas por região (divisão conforme Figura 3.3).

5.1.2 Variação do número total de satélites (T)

Agora, busca-se entender o impacto na variação do número total de satélites no tempo de revisita médio das constelações polares, mantendo constante o número total de planos em 2 e 3, como no caso do estudo das constelações Walker Delta, com os demais valores de elementos da constelação os presentes na Tabela 5.2. Deste modo, a Figura 5.3 apresenta o resultado para o sistema em 2 planos, variando o total de satélites entre 2 e 16, com um passo de 2. Ainda, a Figura 5.4 apresenta o resultado em 3 planos, com T entre 3 e 18 satélites, com um passo de 3.

Dessa maneira, percebe-se uma tendência de diminuição não uniforme com o aumento dos satélites com número de planos mantido constante. Logo, a tendência gráfica nesse caso para $P = 2$ deixa, principalmente, de ser exponencial com boa precisão, mas lembra

TABELA 5.2 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Polar.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Altitude, h	km	800
Espaço Relativo, F	—	0
RAAN	°	45

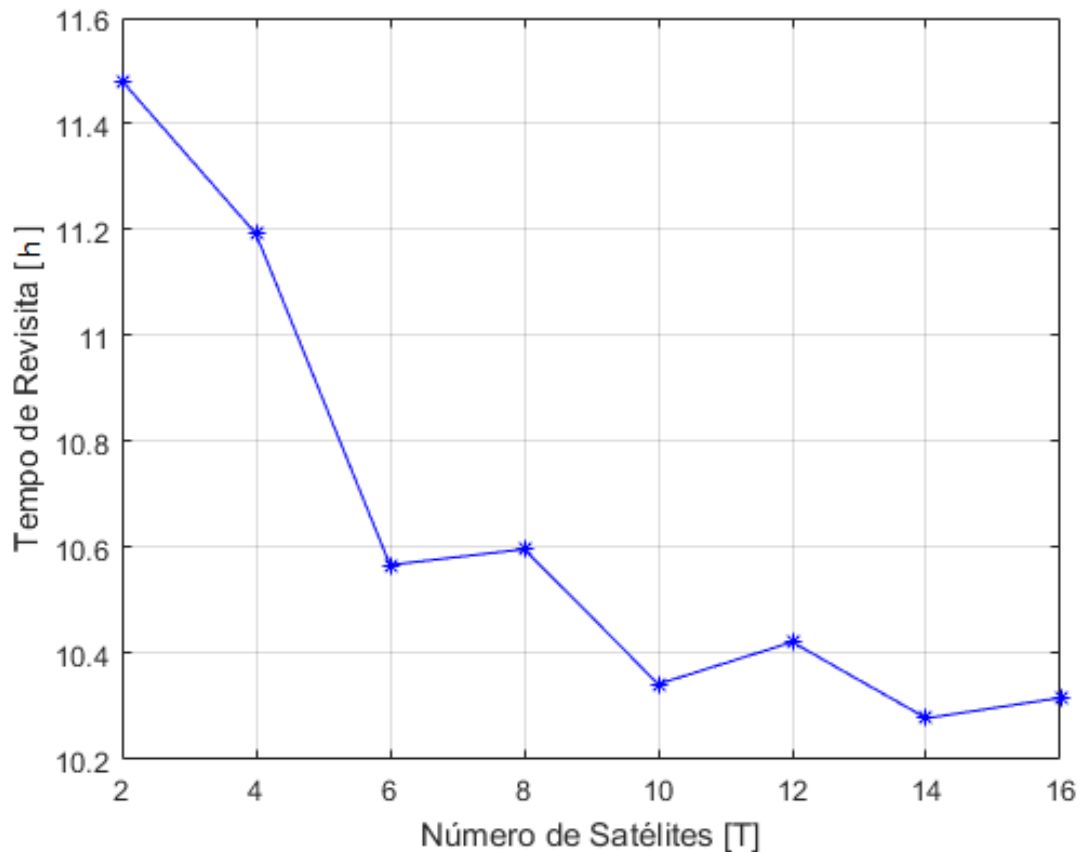


FIGURA 5.3 – Polar: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas).

bastante esse comportamento, o que implica novamente que o aumento do número de satélites no plano tem efeito na diminuição do tempo de revisita até somente certo valor de T .

Por exemplo, para $P = 2$, a Figura 5.3 nos permite constatar que a partir de $T = 6$ as variações de tempo de revisita não caem consideravelmente, ao contrário, tendem a se estagnar em valor muito próximo para o caso $T = 6$.

Agora, no caso $P = 3$ a tendência lembra um comportamento mais próximo do exponencial visto no caso Walker Delta. A partir do valor para $T = 9$, que tem tempo de revisita em torno de 2,5 horas, a comparação com os demais valores de número total

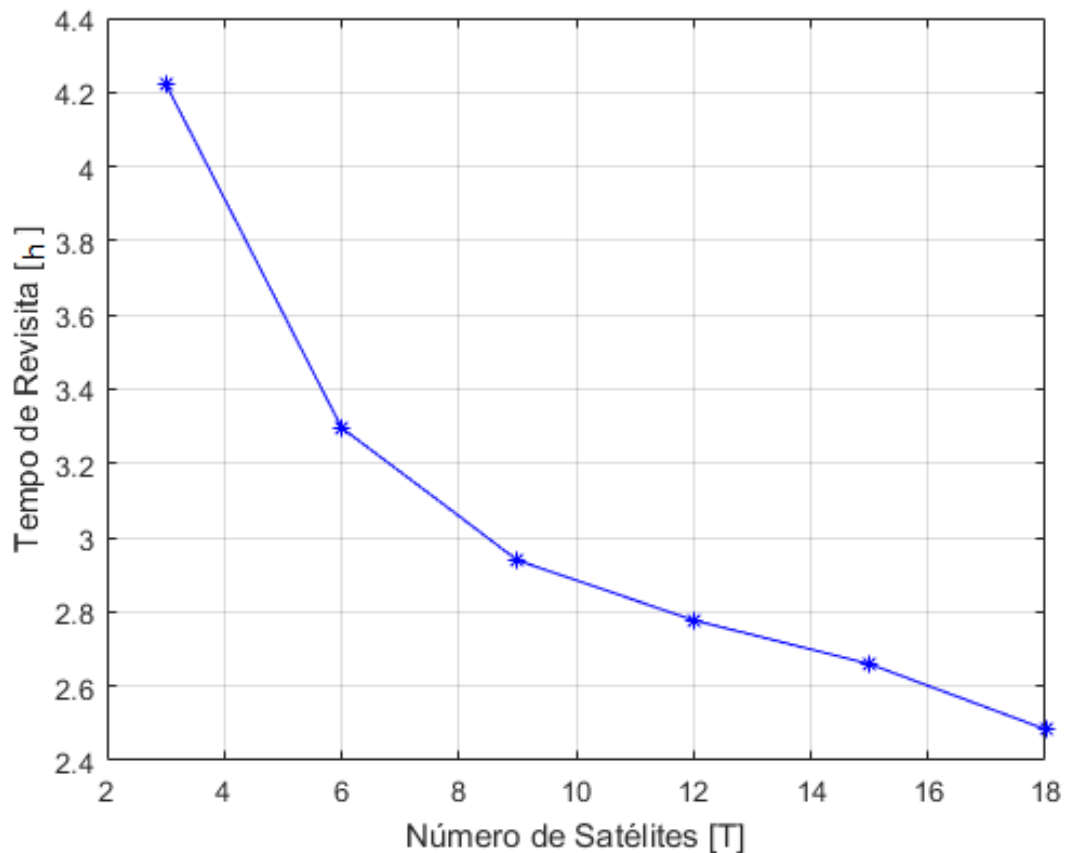


FIGURA 5.4 – Polar: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas).

de satélites utilizado (até $T = 18$) permite constatar que não ocorrem grandes ganhos relativos com aumento do número de satélites superior a este valor de $T = 9$.

Ainda, percebe-se que o aumento do número de planos novamente é mais significativo no tempo de revisita total que o aumento do número de satélites. De fato, em todos os casos com 2 planos, os tempos de revisita foram superiores a 10 horas, enquanto que para 3 planos foram sempre inferiores a 4,3 horas.

Por fim, a Figura 5.5 mostra que a tendência em cada área de diminuição do tempo de revisita com relação aumento do número de satélites ocorre em cada área específica do gráfico construído quando mantemos número $P = 3$ para $T = 6, 9$ e 12 .

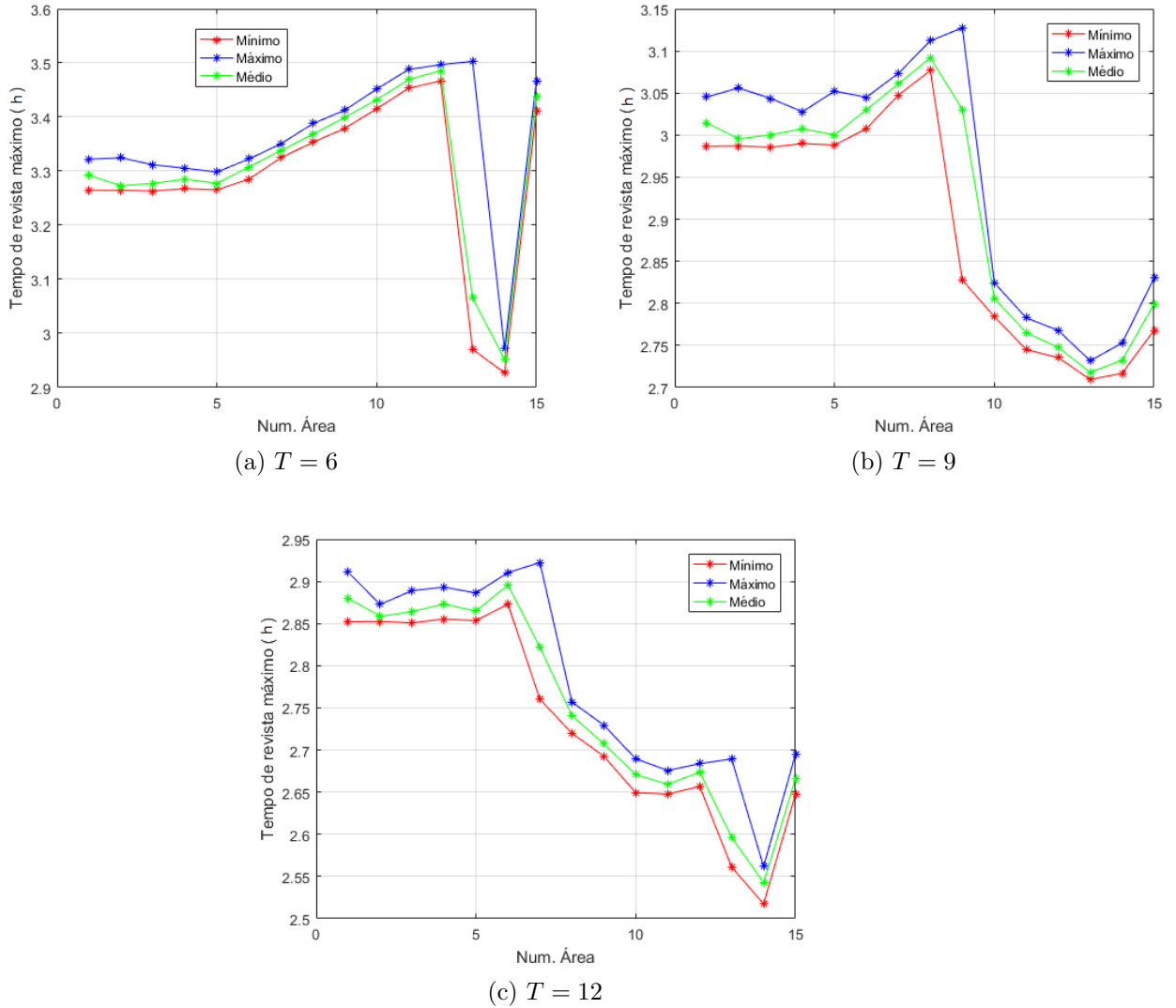


FIGURA 5.5 – Polar: Tempo de revisita (mínima, média e máxima) em horas por região (divisão conforme Figura 3.3) para 3, 6 e 9 satélites em 3 planos.

5.1.3 Variação do número de planos (P)

Além do estudo realizado para variação do número total de satélites, também foi realizado o estudo da variação do número de planos P , com um valor de T constante. Utilizando ainda como demais valores de elementos da constelação os valores definidos na Tabela 5.3 e considerando $T = 12$, a Figura 5.6 apresenta o comportamento do tempo de revisita para número de planos de 2, 3, 4 e 6.

Ao efetuar a análise da figura citada, nota-se que no caso inicial de $P = 2$ os tempos de revisita médio são consideravelmente maiores que nos demais casos. Ainda, para $P = 3$ e $P = 6$ os valores de revisita nesse caso são praticamente iguais, notando-se portanto um impacto relevante no sistema da variação do número de planos para a figura de mérito analisada.

TABELA 5.3 – Elementos fixos para a análise da variação do número total de satélites - Polar.

Elemento	Unidade	Valor utilizado
Altitude, h	km	800
Espaço Relativo, F	—	0
RAAN	°	45

Dessa forma, um estudo mais completo do impacto do número de planos e número de satélites é apresentado na Figura 5.7, que mostra todos os valores de tempo de revisita obtidos para diferentes T e P , com altitude de 800 km, $RAAN = 45^\circ$ e $F = 0$. Esse gráfico nos evidencia o mesmo que ocorreu para a constelação Walker Delta, onde o número de planos igual a 2 implicou no menor tempo de revisita para o sistema e onde os resultados para $P \geq 3$ dependem essencialmente do número total de satélites utilizado, variando caso a caso.

Como já discutido, devido ao custo de mudança de órbita entre planos diferentes, é essencialmente mais vantajoso o menor número de planos para a constelação, e, para a Polar, devemos procurar soluções no intervalo $P \geq 3$ para menores tempos de revisita gerais e também $P \neq 4$, uma vez que para 4 planos os tempos de revisita também são maiores que nos outros analisados.

5.1.4 Variação da RAAN

Fazendo uso de uma constelação com $T = 6$, $P = 3$ e com valores de elementos orbitais conforme mostrados na Tabela 5.3 (com exceção da RAAN), foram variados os valores de RAAN dessa constelação para se estudar o impacto da variação desse valor em uma constelação Polar. Para tal, variou-se seu valor entre 0° e 180° , com passo de 45° , cujo resultado pode ser visto na Figura 5.8. Os valores para angulações de RAAN superiores a 180° apresentam comportamento similar até os 360° .

Com a ajuda da análise dessa figura, constata-se que, como há uma pequena variação nos resultados de tempo de revisita das simulações realizadas, o valor da RAAN não impacta de forma fundamental os resultados, podendo ser usado qualquer um dos valores estudados nas soluções finais a serem propostas.

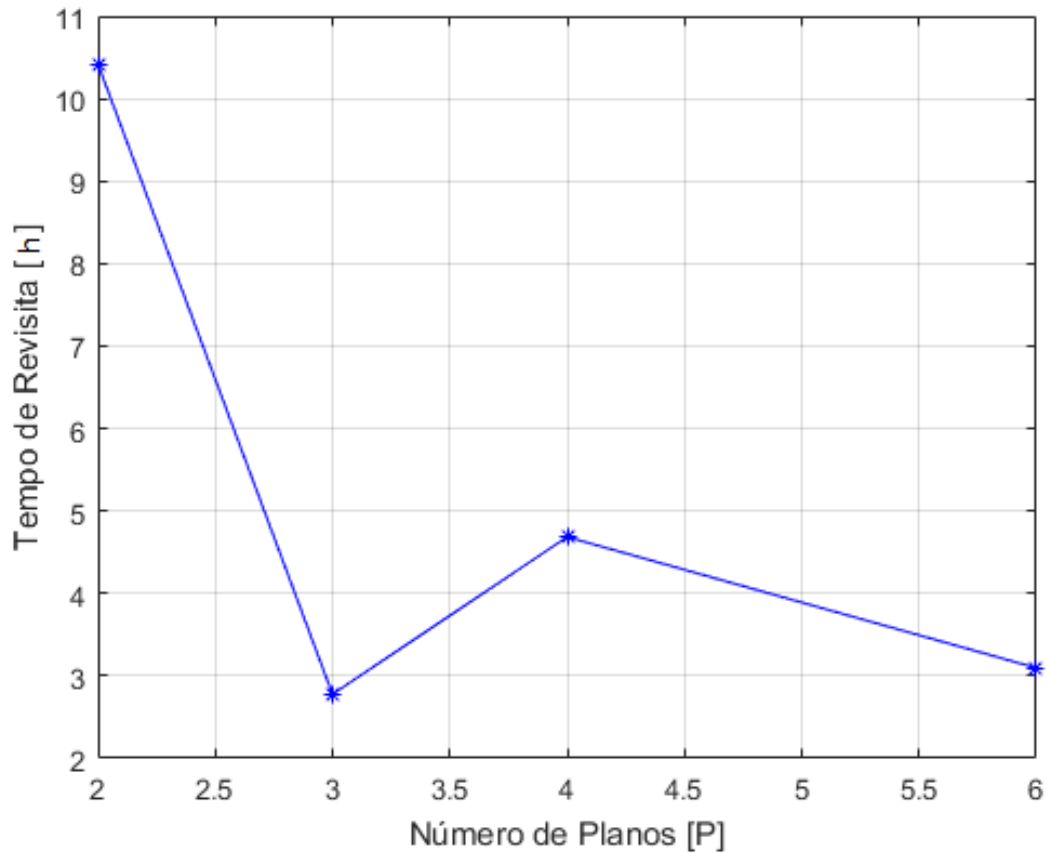


FIGURA 5.6 – Polar: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas).

5.1.5 Variação do Espaço Relativo (F)

Por fim, foi realizado o estudo da variação de F nas constelações Polares. Para tal, foram simulados 3 casos diferentes: o primeiro utilizou $T = 12$ e $P = 6$; o segundo $T = 12$ e $P = 3$; e o terceiro $T = 9$ e $P = 3$. Ademais, em todos os casos foi utilizado uma altitude de 800 km e RAAN de 45° . Dessa maneira, os resultados obtidos estão dispostos na Figura 5.9.

O estudo dos resultados vistos na figura citada nos mostra que, de maneira similar ao que ocorre com a constelação Walker Delta, os valores de F podem ou não fazer com que o tempo de revisita aumente ou diminua consideravelmente, a depender da configuração da constelação desejada, devendo essa variável ser simulada para cada constelação de maneira desassociada.

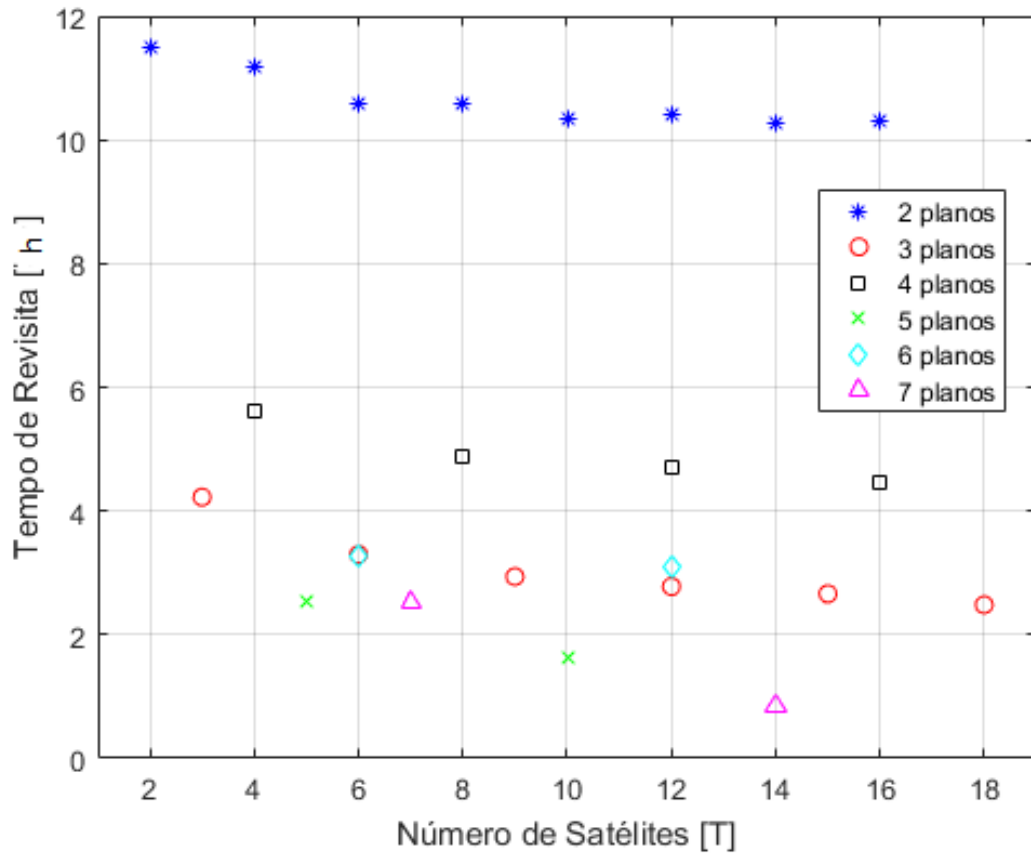


FIGURA 5.7 – Polar: Variações de número total de satélites para diferentes valores de P (região das 200 milhas).

5.2 Resultados para Taxa de Acesso

Nesta seção, serão apresentados gráficos dos resultados obtidos e figuras representativas da região analisada de taxa de acesso quando são variados cada um dos elementos da constelação de satélite de padrão Polar. Nas análises percentuais efetuadas, da mesma maneira da vista na análise da constelação de padrão Walker Delta, o valor de 100% é o tempo referente a 92 dias, tempo total de simulação.

5.2.1 Variação de altitude

Para uma constelação Polar de mesma configuração que a proposta na Tabela 5.1 e com $T = 6$ e $P = 3$, são analisados os valores da taxa de acesso com variações de altitude de 400 km a 800 km, com passo de 100 km, cujo resultado está disposto na Figura 5.10.

Diferentemente portanto do que é visto para a mesma configuração de constelação no caso do tempo de revisita, dessa vez nota-se uma tendência praticamente linear no aumento da taxa de acesso, com valor de $R^2 = 0,998$, com equação da reta definida por

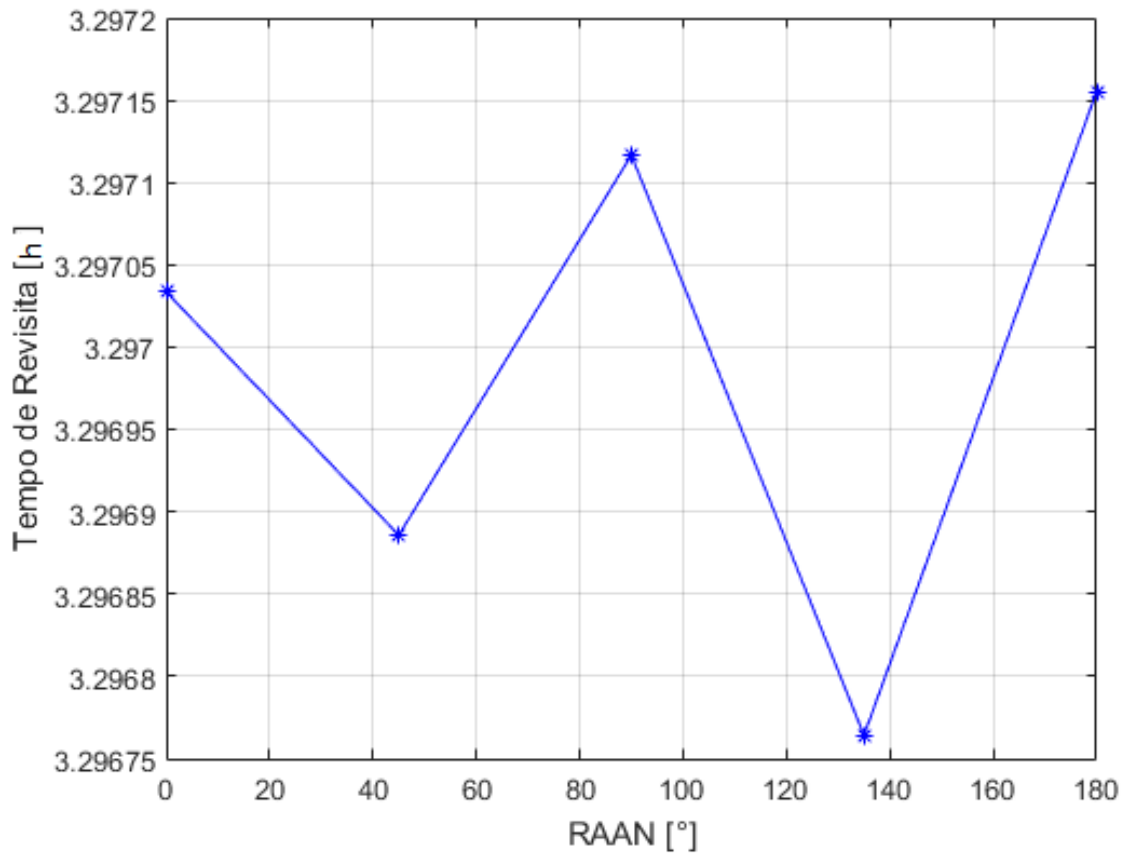


FIGURA 5.8 – Polar: Variações de RAAN (região das 200 milhas).

$y = 0,007793x - 1,714$, o que implica numa melhora na cobertura com o aumento da altitude a ser utilizada.

Apesar do resultado agora apresentar uma linearidade, percebe-se a mesma propensão de melhora de resultado com o aumento da altitude. Dessa maneira, a altitude que melhor atende aos requisitos de revisita e taxa de acesso é a maior opção entre as estudadas, a de 800 km.

5.2.2 Variação do número total de satélites (T)

Para analisar o efeito da variação do número total de satélites (T) quando são mantidos o número de planos (P) constante na cobertura da Amazônia Azul, foi utilizada uma constelação Polar cuja configuração base está representada pela Tabela 5.2. Além disso, foram realizadas simulações para valores de P iguais a 2 e 3, com resultados em termos de taxa de acesso que podem ser vistos nas Figuras 5.11 e 5.12, respectivamente.

A primeira figura que evidencia os resultados para 2 planos mostra uma tendência não-linear nos resultados obtidos. Dessa maneira, em alguns casos, há inclusive diminuição da taxa de acesso com o aumento da quantidade de satélites utilizado, o que pode ser

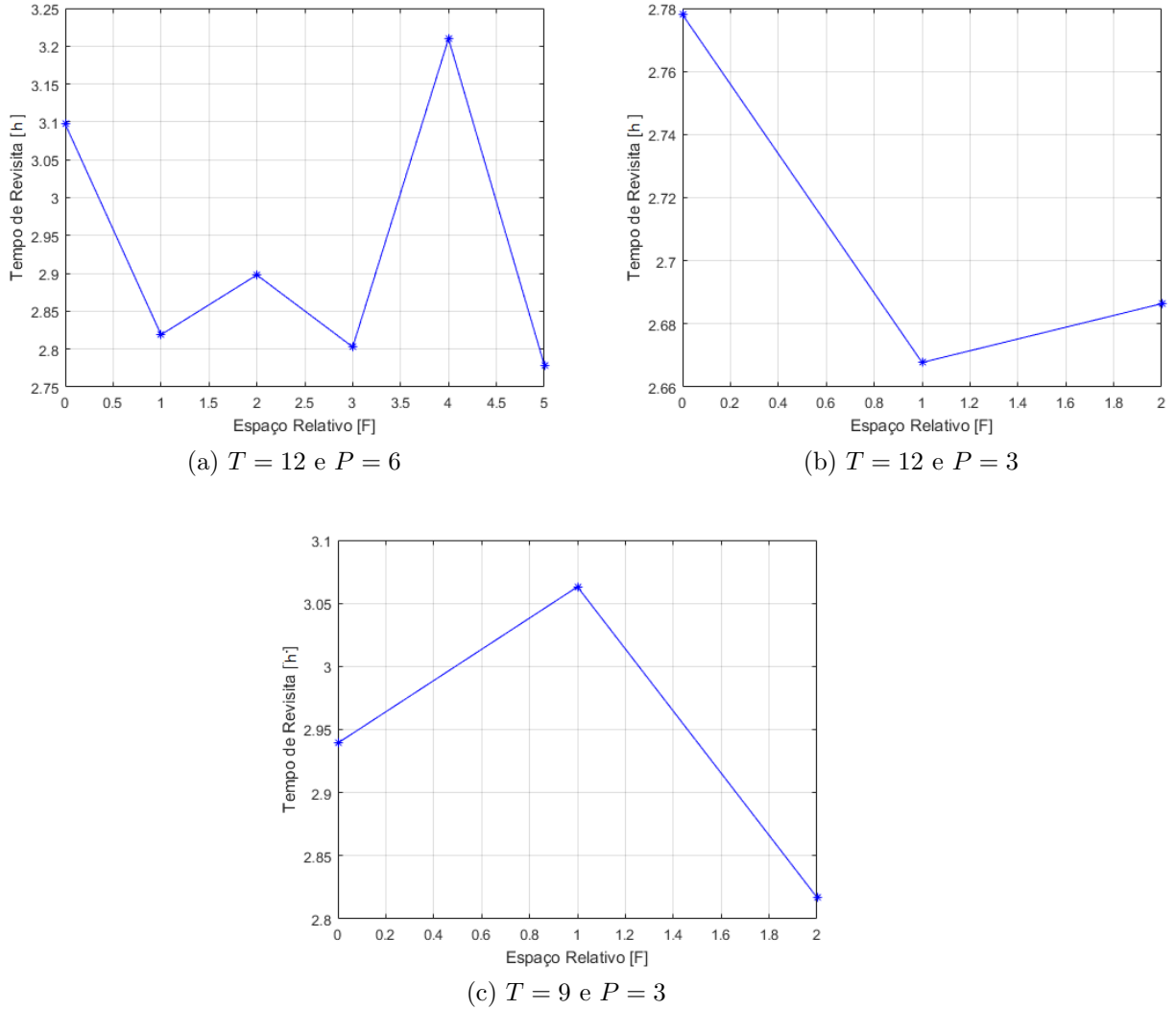


FIGURA 5.9 – Polar: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas).

um indicativo que, para o problema de cobertura, sistemas de constelação com apenas 2 planos não seja suficiente, o que é ainda reforçado pelos baixos valores gerais de taxa de acesso obtidos. A Figura 5.13 mostra ainda que essas variações também ocorrem em cada uma das sub-regiões analisadas separadamente, cujos resultados apresentam, inclusive, padrões de regiões mais cobertas para diferentes valores de T .

Já a Figura 5.12 que retrata a variação quando foram mantidos 3 planos, mostra uma tendência praticamente linear no aumento da taxa de acesso. Dessa forma, quanto maior a quantidade de satélites, maior também será a taxa de acesso da região analisada. A comparação entre os dois planos analisados permite observar que os resultados são geralmente melhores quando temos 3 planos. De fato, em todos os casos no qual T foi igual, o valor de $P = 3$ obteve melhores taxas de acesso.

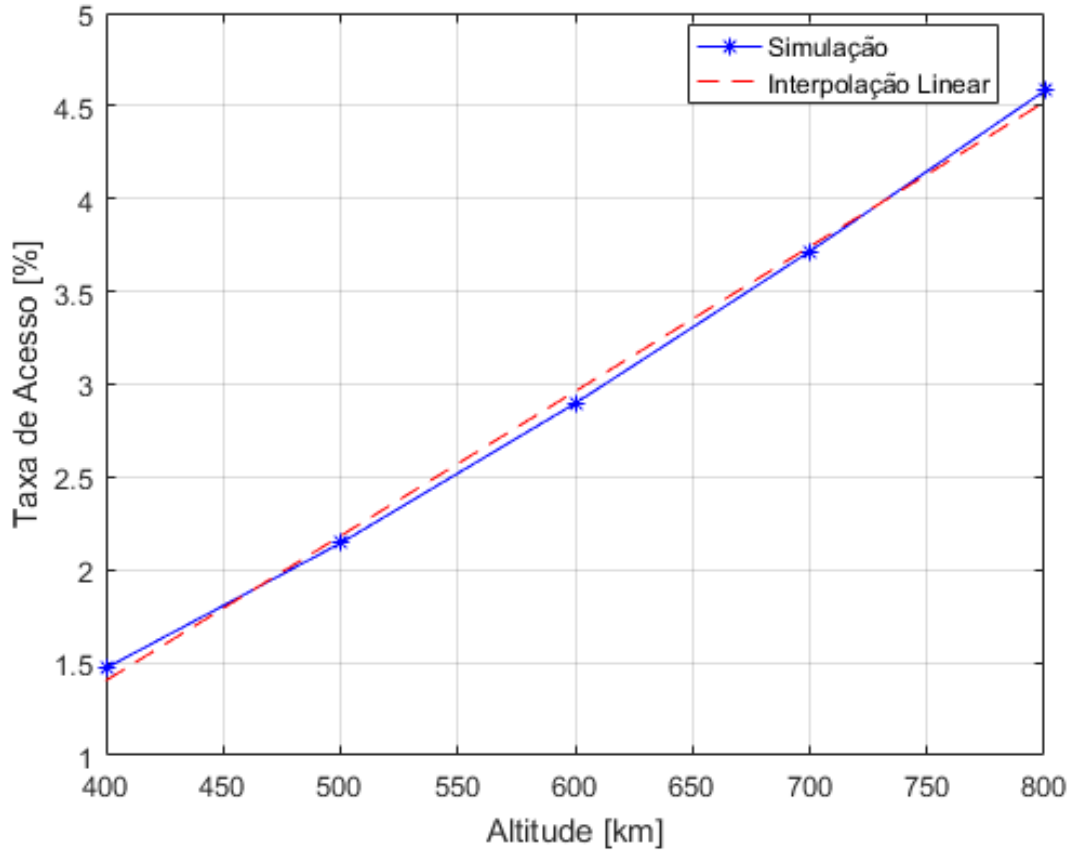


FIGURA 5.10 – Polar: Variações de altitude (região das 200 milhas) e impacto na taxa de acesso da região. Para a interpolação linear: $R^2 = 0,998$.

5.2.3 Variação do número de planos (P)

Ao fazer uso dos elementos da Tabela 5.3 utilizada para retratar as configurações usadas na simulação para obtenção da relação entre tempo de revisita e variação de planos em constelações polares, também podemos usá-la para encontrar a conexão entre o número de planos e a taxa de acesso na região observada para constelações com esse padrão. Para tal, foi utilizado um estudo para $T = 12$, apresentado na Figura 5.14.

Nos casos analisados não pode ser notada nenhuma relação imediata entre o número de planos e a taxa de acesso, a não ser a clara tendência de piores resultados quando temos $P = 2$ nos dois conjuntos de soluções analisados, conclusão corroborada pela Figura 5.15, que mostra como variam nas sub-regiões em estudo a taxa de acesso para diferentes números de planos com $T = 12$. Esse resultado obtido é, portanto, similar àquele visto para tempo de revisita.

Finalmente, a Figura 5.16 apresenta a taxa de acesso para diferentes valores de T e para diferentes valores de P , quando se mantêm altitude de 800 km, $RAAN = 45^\circ$ e $F = 0$. Nesta figura, fica clara a relação de menor cobertura quando temos apenas 2

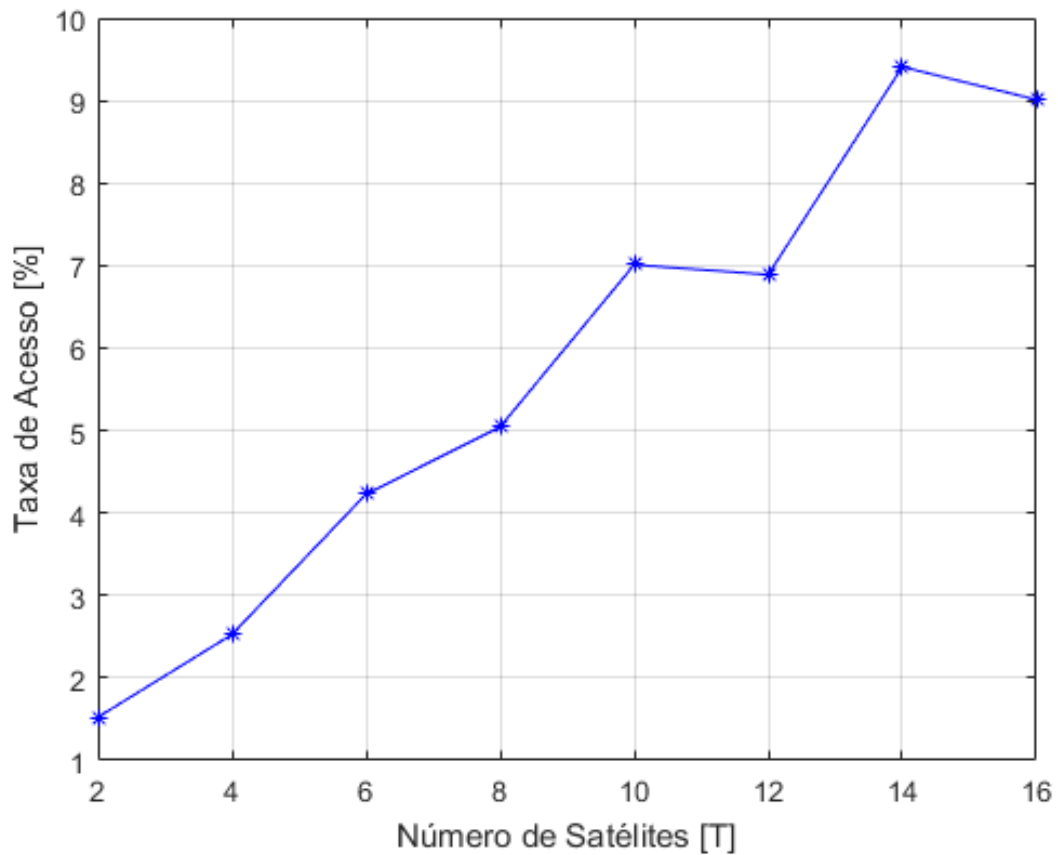


FIGURA 5.11 – Polar: Variações de número total de satélites para 2 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.

planos, com aumento da taxa de acesso para maiores P e mesmos T . Desde que sabemos que a melhor solução compromisso envolve a diminuição do número de planos, verificamos que existem soluções para valores de T não altos com baixos valores de P .

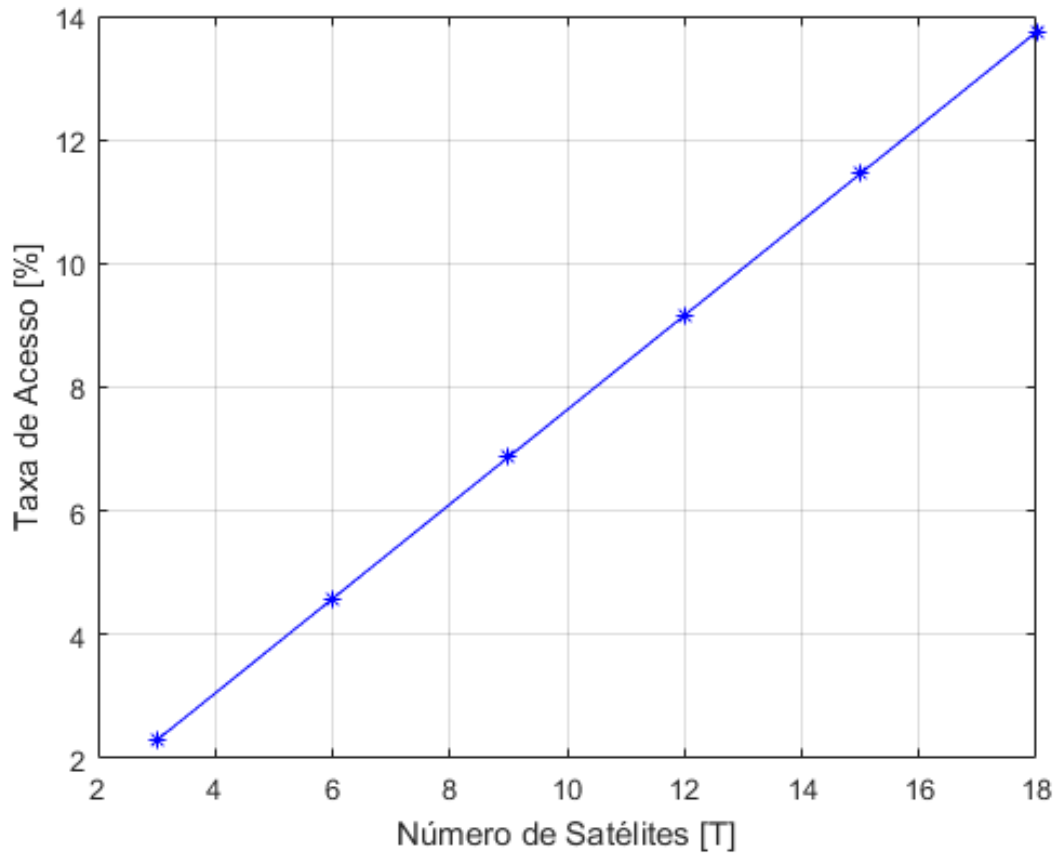


FIGURA 5.12 – Polar: Variações de número total de satélites para 3 planos (região das 200 milhas). Impacto na taxa de acesso.

5.2.4 Variação da RAAN

Utilizando a constelação Polar cuja configuração proposta está apresentada na Tabela 5.3, com $T = 6$ e $P = 3$, foram variados os valores da RAAN da constelação para valores entre 0 e 180° , com um passo de 45° , para se verificar como ocorre a variação dos resultados de taxa de acesso. Dessa maneira, a a Figura 5.17 mostra que os resultados obtidos praticamente não variam conforme se muda o ângulo da RAAN. Esse resultado é o mesmo em todas as análises efetuadas de RAAN, tanto em constelações do tipo Walker Delta quanto Polar, e também em relação a tempo de revisita e taxa de acesso.

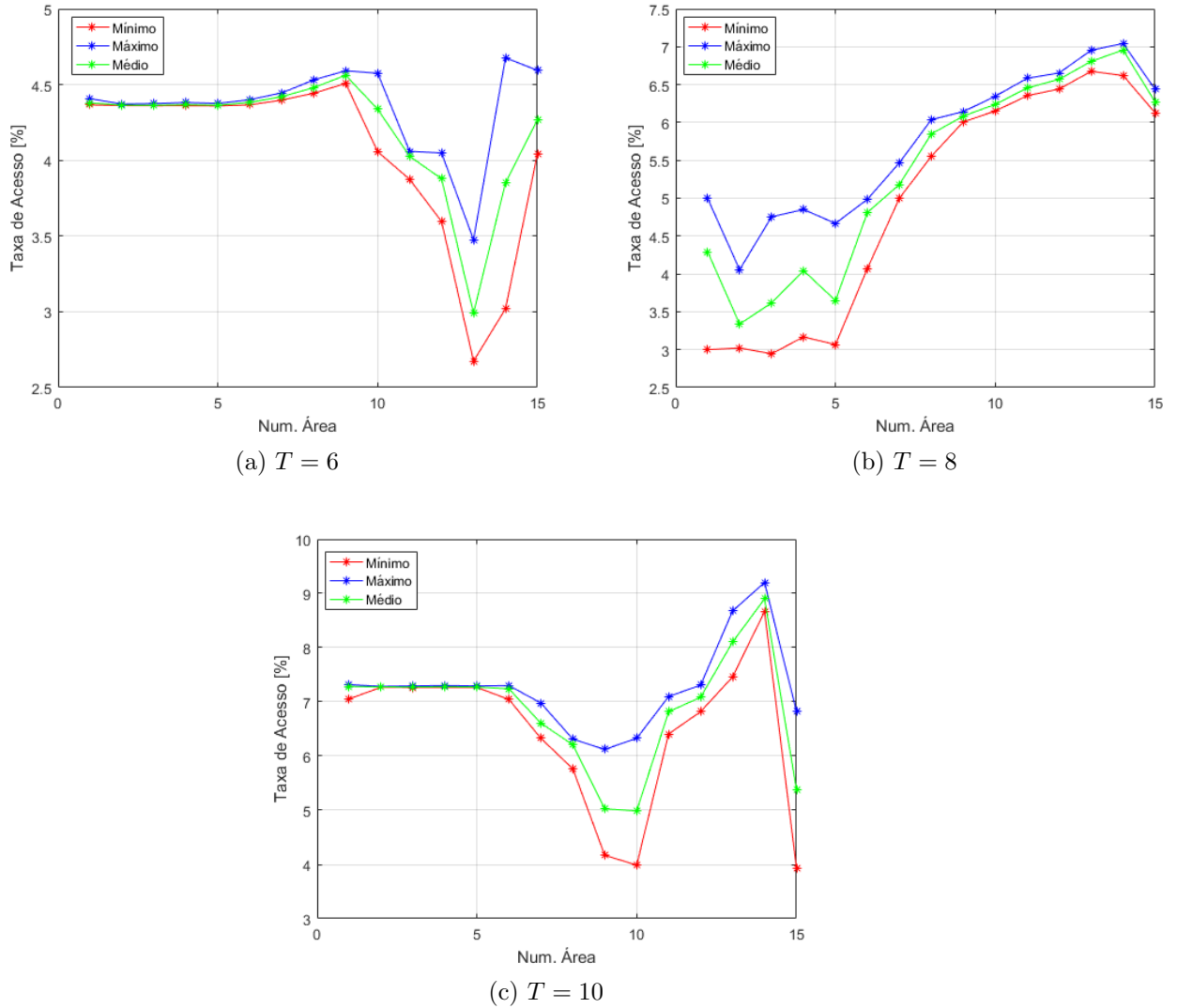


FIGURA 5.13 – Polar: Variações de T , com $P = 2$ para cada sub-região, valores máximo, mínimo e médio - Impacto na taxa de acesso.

5.2.5 Variação do Espaço Relativo (F)

Para o estudo da variação de F no resultado da taxa de acesso em constelações Polares, foram verificados três casos diferentes: o primeiro utiliza $T = 12$ e $P = 6$; o segundo apresenta $T = 12$ e $P = 3$; e o último mostra os resultados para $T = 9$ e $P = 3$. Nessas simulações foram utilizadas altitude de 800 km e RAAN de 45° . Dessa maneira, os resultados obtidos estão dispostos na Figura 5.18.

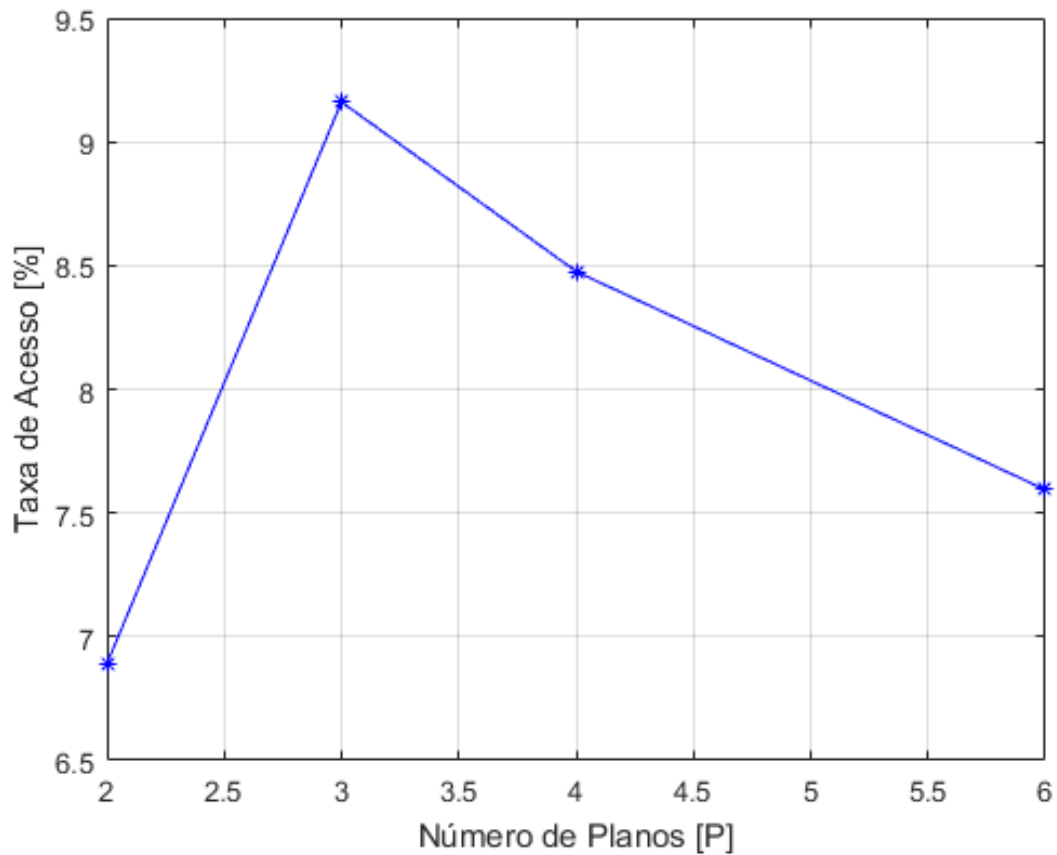
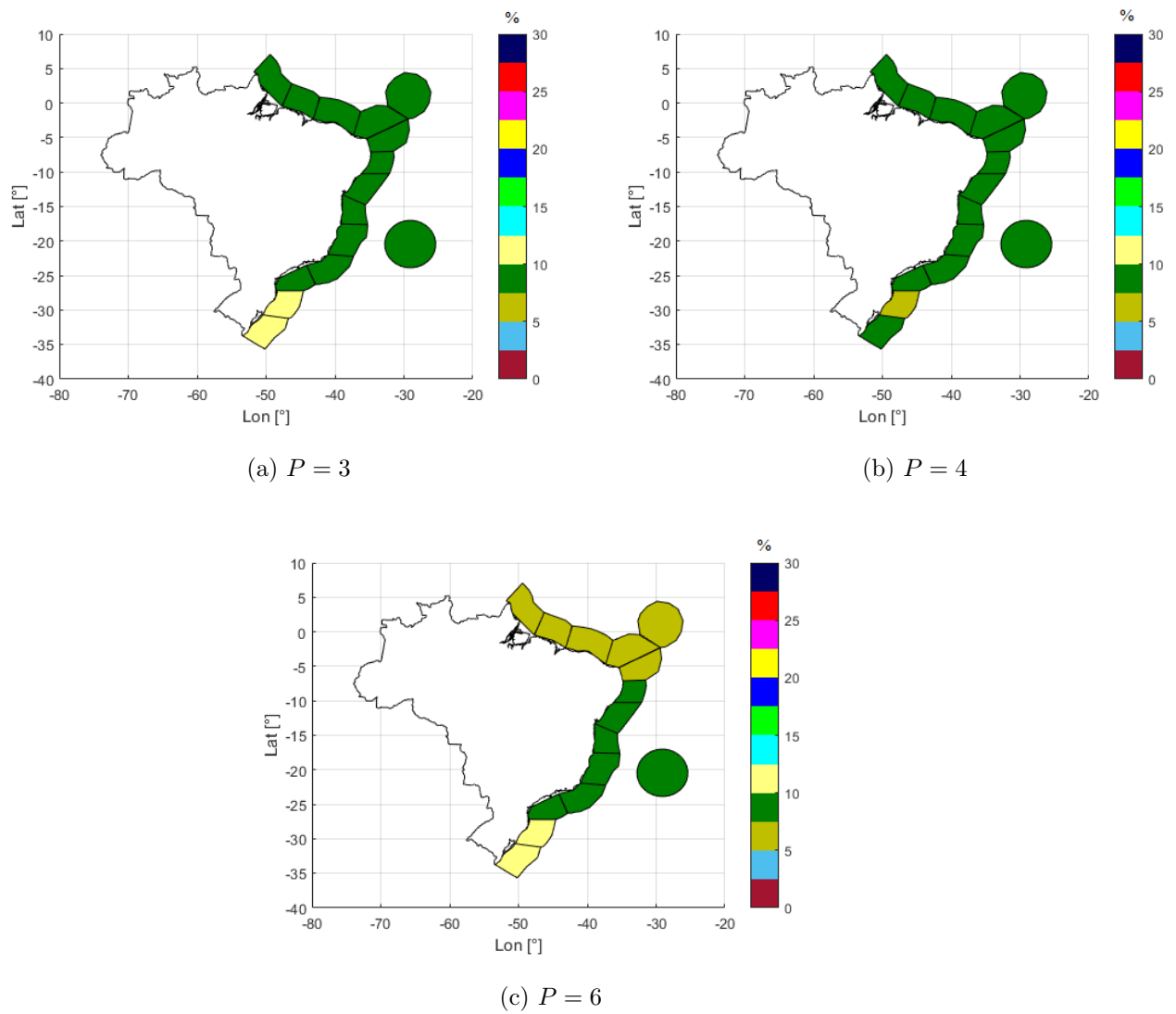


FIGURA 5.14 – Polar: Variações de número total de planos, com $T = 12$ (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.

Novamente, o estudo desses casos não nos aponta nenhuma tendência de padrão para esse tipo de constelação. De fato, cada constelação, tanto em termos do tempo de revisita quanto em termos de taxa de acesso não apresenta relação direta de melhor valor de F , devendo essa variável ser estudada separadamente em cada caso analisado. Destaca-se, no entanto, que para valores de T menores que 12, a diferença relativa entre a maior e a menor taxa de acesso não varia consideravelmente.

FIGURA 5.15 – Polar: Variações de P , com $T = 12$ - Impacto na taxa de acesso.

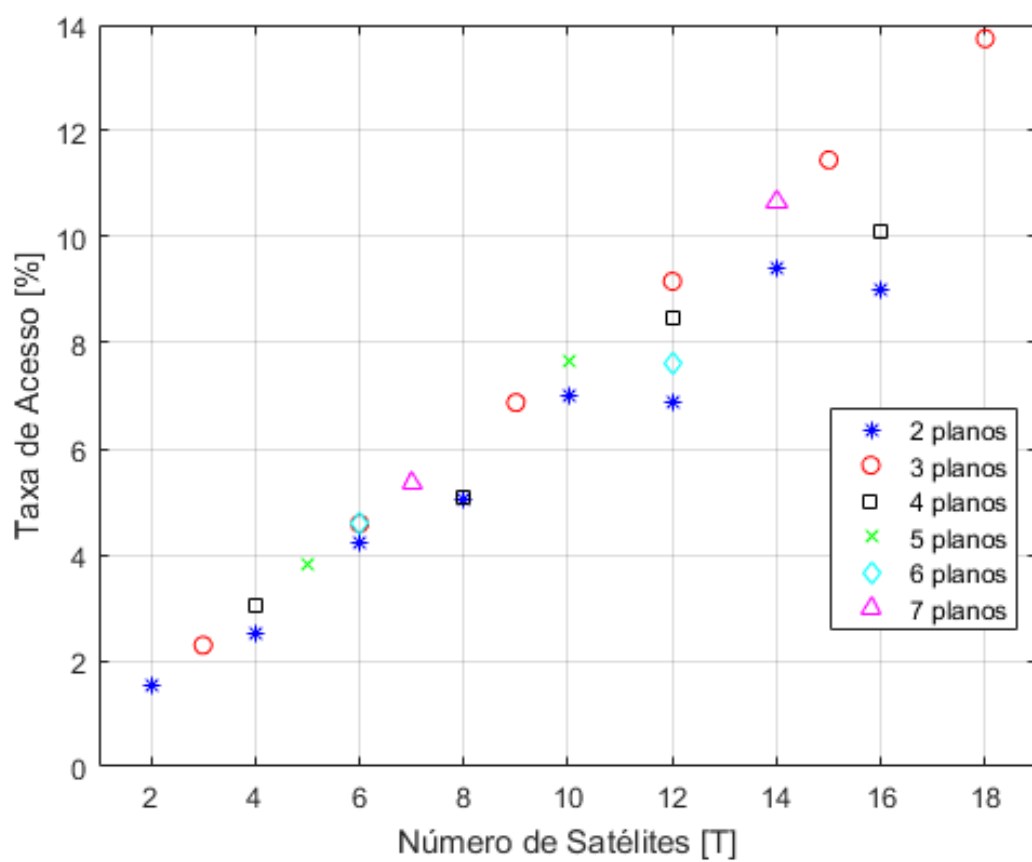


FIGURA 5.16 – Polar: Variações de número total de satélites para vários P (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.

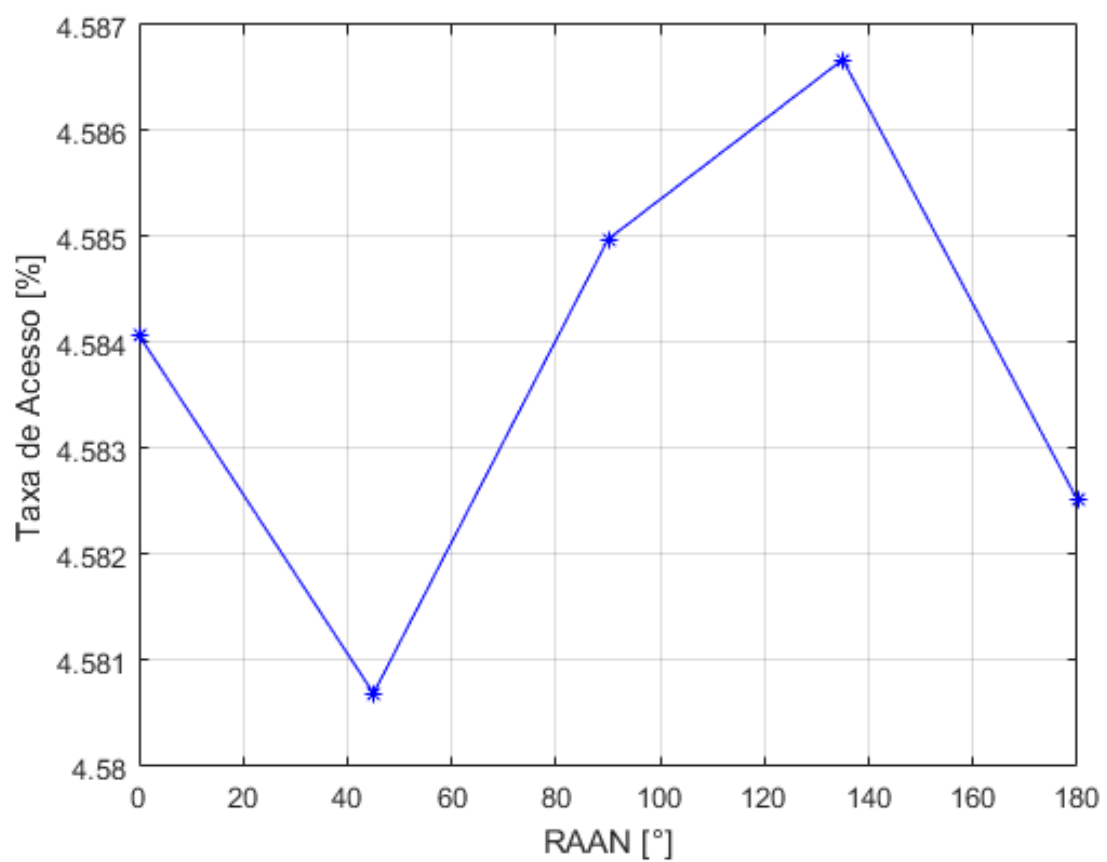
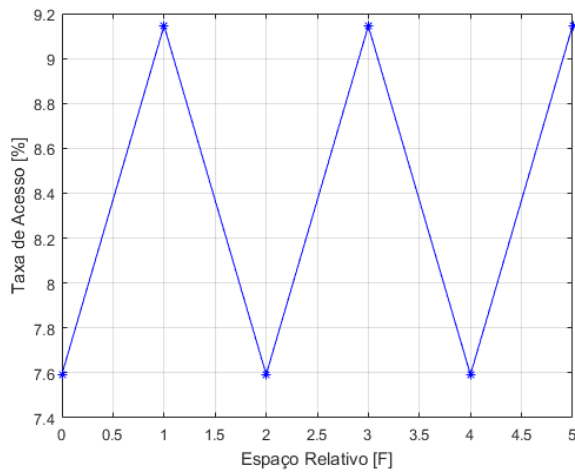
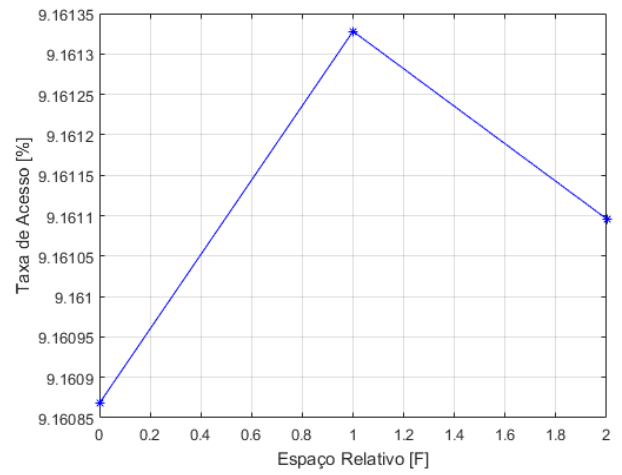
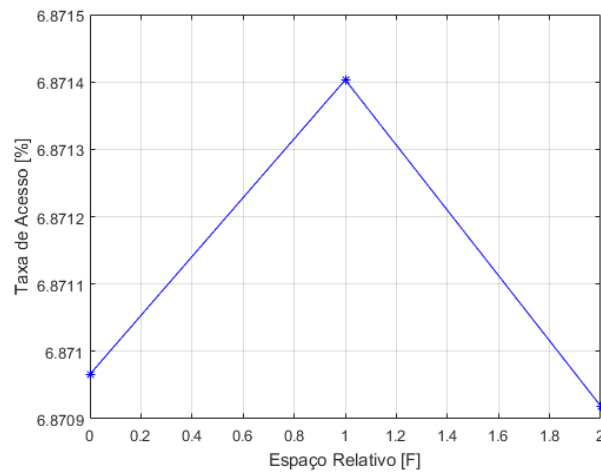


FIGURA 5.17 – Polar: Variações de RAAN (região das 200 milhas) - Impacto na taxa de acesso.

(a) $T = 12$ e $P = 6$ (b) $T = 12$ e $P = 3$ (c) $T = 9$ e $P = 3$ FIGURA 5.18 – Polar: Variações de F , com T satélites em P planos (região das 200 milhas).

5.3 Soluções propostas

Tomando como base os estudos realizados para tempo de revisita e taxa de acesso para diferentes variações de constelações Polares, foram obtidos dois conjuntos possíveis de soluções que constituem soluções compromisso viáveis ao trabalho de monitoramento da região da Amazônia Azul. Vale destacar que buscou-se minimizar sempre as médias dessas constelações sob a região das 200 milhas náuticas como um todo.

Para a obtenção desse conjunto de soluções, levou-se em consideração as mesmas restrições que no caso Walker Delta, onde devíamos ter soluções com menor número de satélites possível, bem como menor número de planos também.

Ademais, em todos os casos estudados, a altitude de melhores resultados foi a de 800 km, com a variável RAAN impactando de forma desprezível nos resultados obtidos, tanto em termos de taxa de acesso quanto em termos de tempo de revisita.

5.3.1 Primeira solução proposta

A primeira solução viável que atende a demanda de modo satisfatório é a composta por $T = 9$ e $P = 3$. Essa constelação atende às expectativas, em especial à de revisita, com o menor número total de satélites. As demais características da constelação podem ser obtidas pela análise dos resultados obtidos:

- **Altitude:** será a de 800 km.
- **RAAN:** como essa variável não é essencial, pode ser escolhida dentro do intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$.
- **F :** nessa constelação, os valores obtidos são próximos para qualquer $0 \leq F \leq 2$.

Essa solução apresenta tempo de revisita de 2 horas e 48 minutos, com taxa de acesso de 7,0%. A escolha por essa configuração de 9 satélites se dá essencialmente pelo baixo número de planos necessários para essa constelação, além de apresentar taxa de acesso ligeiramente superior a outras soluções, como para $T = 8$ e $P = 4$, que apresenta também alto valor de tempo de revisita.

Por fim, a Figura 5.19 mostra os tempos de revisita e taxa de acesso em cada uma das 15 sub-regiões nas quais são divididas a região de interesse. Percebe-se tendência praticamente uniforme no comportamento de revisita e acesso para essa constelação.

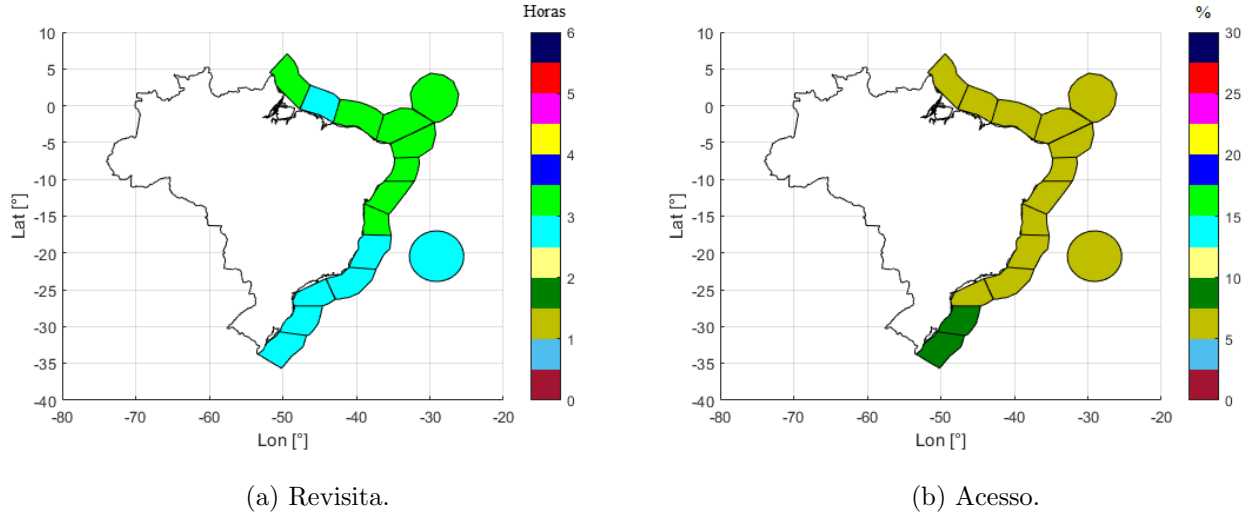


FIGURA 5.19 – Polar: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a primeira solução proposta.

5.3.2 Segunda solução proposta

Agora, focando no aumento da taxa de acesso, a segunda solução proposta apresenta $T = 12$ e $P = 3$, que evidencia ganho de taxa de acesso em relação à primeira de cerca de 5% e também possui baixo número de planos em sua configuração, o que favorece a constelação a ser adotada. Aqui, deve ser destacada a diferença das soluções Walker Delta e Polar, uma vez que a primeira apresenta soluções melhores que a última, mesmo com menor número total de satélites.

Dessa forma, teremos ainda nessa segunda solução Polar proposta:

- **Altitude:** altitude de 800 km.
- **RAAN:** dentro do intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$.
- F : nessa constelação, os melhores valores são obtidos para qualquer F , logo: $0 \leq F \leq 2$.

Essa solução apresenta tempo de revisita em torno de 2 horas e 40 minutos e taxa de acesso de 9,1%, maior que a solução encontrada anteriormente, mas a depender da especificidade da missão, talvez sem grande impacto efetivo na cobertura da região proposta.

Por fim, a Figura 5.20 mostra os tempos de revisita e taxa de acesso em cada uma das 15 sub-regiões nas quais são divididas a região de interesse. Novamente, é vista uma tendência praticamente uniforme no comportamento de revisita e acesso para essa constelação ainda mais acentuado que no caso anterior, com resultados ligeiramente superiores na costa sul brasileira.

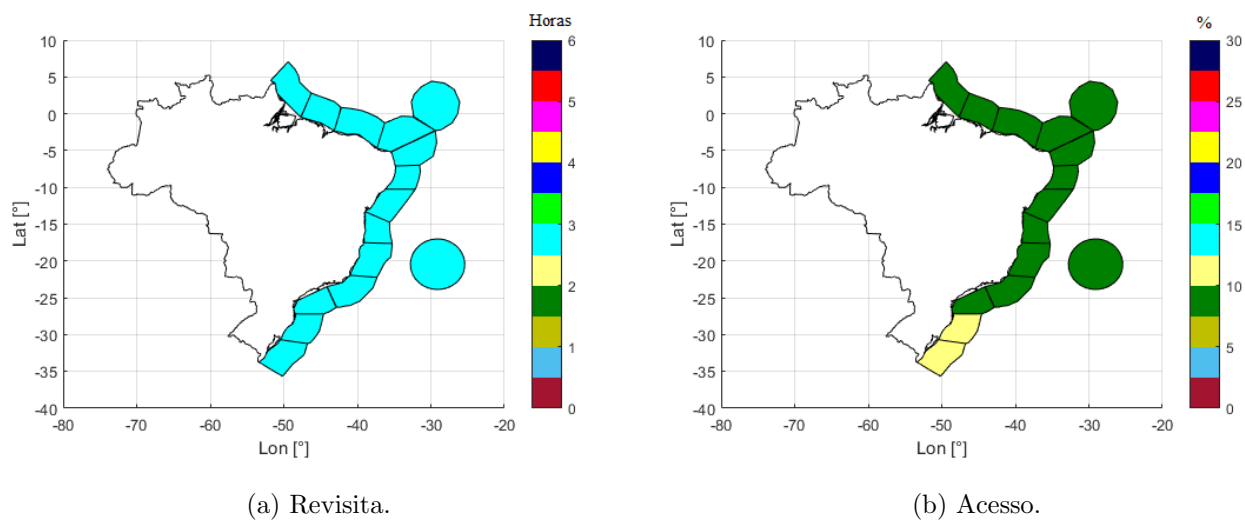


FIGURA 5.20 – Polar: Tempo de revisita (em horas) e Taxa de acesso (em %) por região para a segunda solução proposta.

6 Conclusões

Neste capítulo é feita uma recapitulação geral do problema de monitoramento proposto, mostrando as soluções obtidas para cada um dos padrões de constelação estudado, bem como figuras ilustrativas dessas constelações. Nesse contexto, são realizados comentários gerais sobre tais soluções encontrados, sendo feita uma discussão dos problemas possíveis em termos dos sensores a serem utilizados e de como as constelações propostas podem atuar no monitoramento da Amazônia Azul, cobrindo toda a região de análise. Por fim, discute-se possíveis melhorias para este trabalho, sendo propostos estudos complementares para o futuro, além de se comentar as principais contribuições deste trabalho para o meio de análise de missões espaciais.

6.1 Comentários finais

Neste trabalho realizou-se o estudo de projetos de constelações dos tipos Walker Delta e Polar para o problema de monitoramento da costa litorânea brasileira e suas águas jurisdicionais, conhecida como Amazônia Azul, no âmbito da concepção da missão, sendo portanto um estudo de Pré-Fase A e Fase A de sistemas espaciais. Para obter as melhores soluções compromisso em cada tipo de constelação analisada, foram variados os parâmetros relevantes de cada configuração, a fim de se obter valores de tempo de revisita e taxa de acesso dentro da hipótese inicial suposta.

Dessa forma, o estudo das constelações Walker Delta, cujos satélites estejam portando sensores SAR, nos permitiu obter dois diferentes conjuntos de soluções, ambos a uma altitude de 800 km: uma do tipo $25:6/3/F$ (ou $[25;30]:6/3/F$), com F qualquer e outra com $25:10/5/F$ (ou $[25;30]:10/5/F$), com $F \neq 3$.

Ainda, quando realizamos o estudo de constelações polares, obtemos também dois diferentes conjuntos de sistemas como melhores soluções compromisso: uma com $T = 9$ e $P = 3$ e a segunda com $T = 12$ e $P = 3$, com ambas as soluções estando a uma altitude de 800 km. Tanto no caso Walker quanto no Polar, o valor da ascensão reta do nodo ascendente da órbita não impacta nos resultados de maneira relevante em termos das figuras de mérito analisadas. O aspecto em 3D dessas soluções estão apresentados nas

Figuras 6.1 e 6.2, para a constelação Walker Delta e Polar, respectivamente.

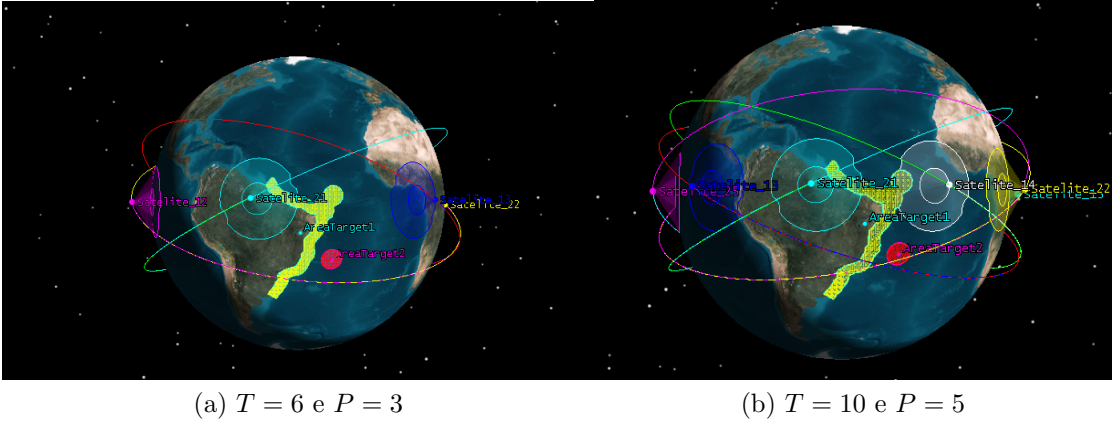


FIGURA 6.1 – Imagens 3D das soluções de padrão Walker Delta propostas.

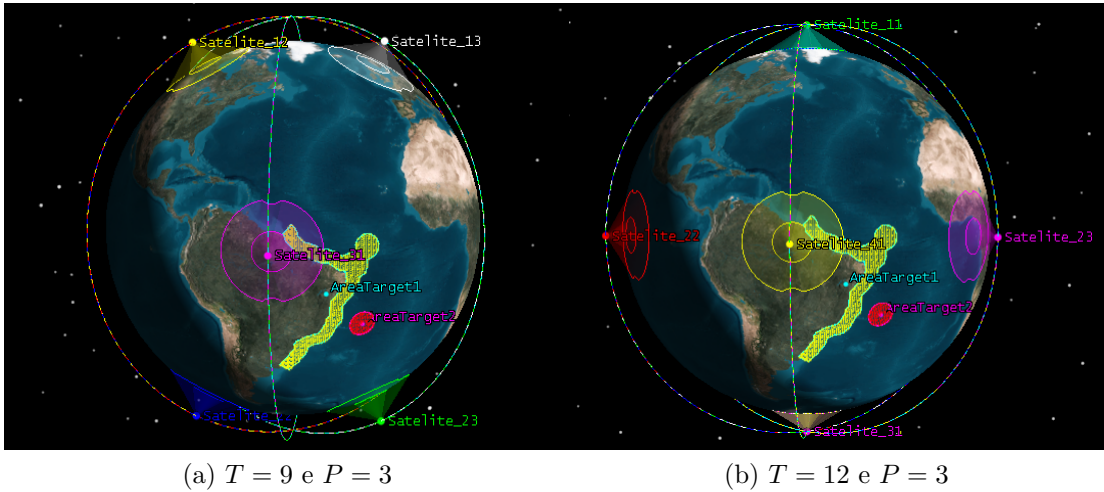


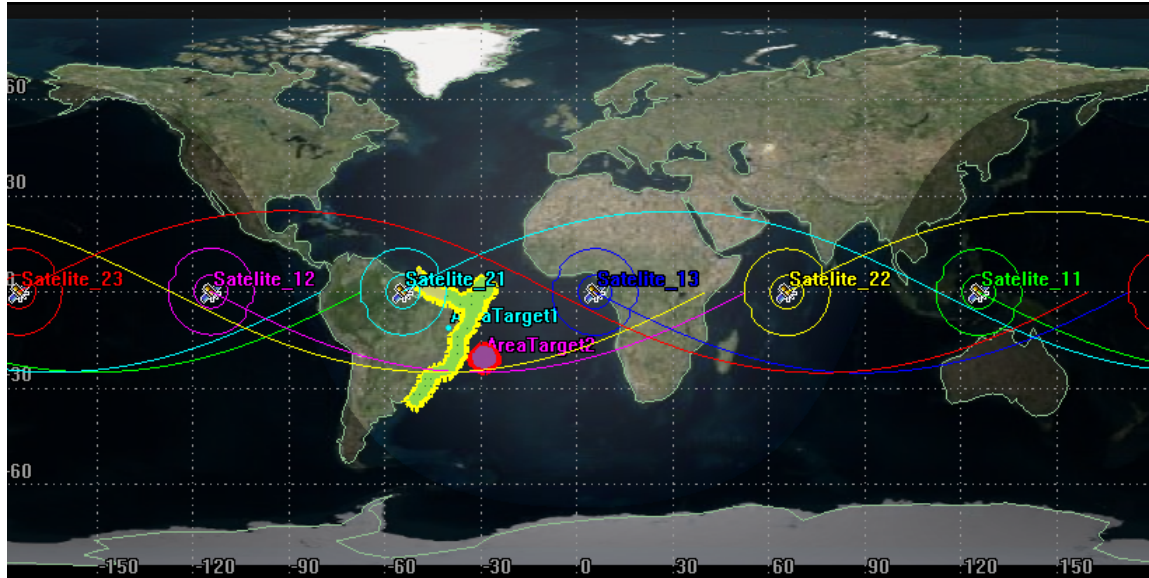
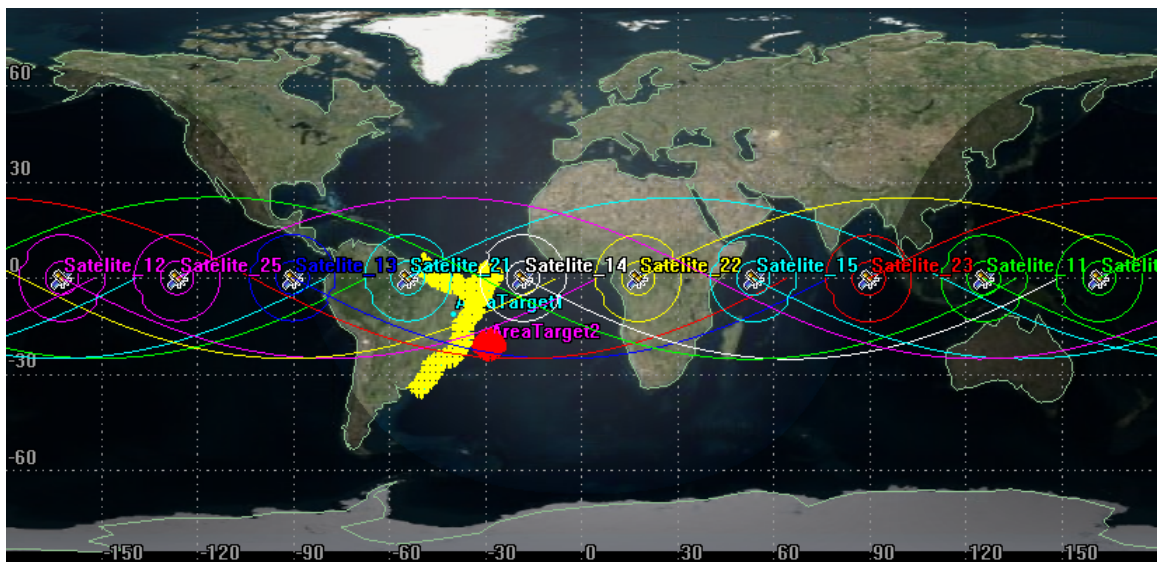
FIGURA 6.2 – Imagens 3D das soluções de padrão Polar propostas.

Ainda, as Figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 mostram a distribuição bidimensional no plano da terra, ou seja, o *ground track* dos satélites no momento inicial de simulação (1 de julho de 2021) das soluções propostas das constelações Walker Delta e Polar. Já a Tabela 6.1 exibe um resumo das soluções propostas para as constelações analisadas.

TABELA 6.1 – Resumo das soluções propostas para cada padrão de constelação.

Padrão	T	P	F	Tempo de revisita	Taxa de acesso
Walker Delta	6	3	$0 \leq F \leq 2$	1 hr 40 min	11,0%
Walker Delta	10	5	$F \neq 3$	40 min	19,0%
Polar	9	3	$0 \leq F \leq 2$	2 hr 48 min	7,0%
Polar	12	3	$0 \leq F \leq 2$	2 hr 40 min	9,1%

O estudo sobre sub-regiões dentre a região analisada foi feito a fim de mostrar a variação dos resultados a depender do posicionamento geográfico na esfera terrestre, conforme

FIGURA 6.3 – Walker Delta: *Ground track* da constelação. Solução proposta: 25:6/3/0.FIGURA 6.4 – Walker Delta: *Ground track* da constelação. Solução proposta: 25:10/5/0.

pode ser visto pelos resultados obtidos para a revisita e a taxa de acesso para as soluções de constelações propostas. Ainda, as constelações Polares apresentam valores em cada sub-região muito menos variações que no caso Walker Delta. Conclui-se por fim que, a depender da sub-região que desperta maior preocupação para o foco de monitoramento, pode ser necessário uma mudança no conjunto de soluções obtidos para um que melhor atenda à região de interesse.

Os melhores resultados são obtidos quando utilizamos constelações Walker para realizar a cobertura da região de interesse. Isso ocorre porque quando realizamos simulações mantendo uma inclinação fixa de 90° , perdemos um grau de liberdade na simulação da constelação. Dessa maneira, essa perda de um grau de liberdade impacta negativamente

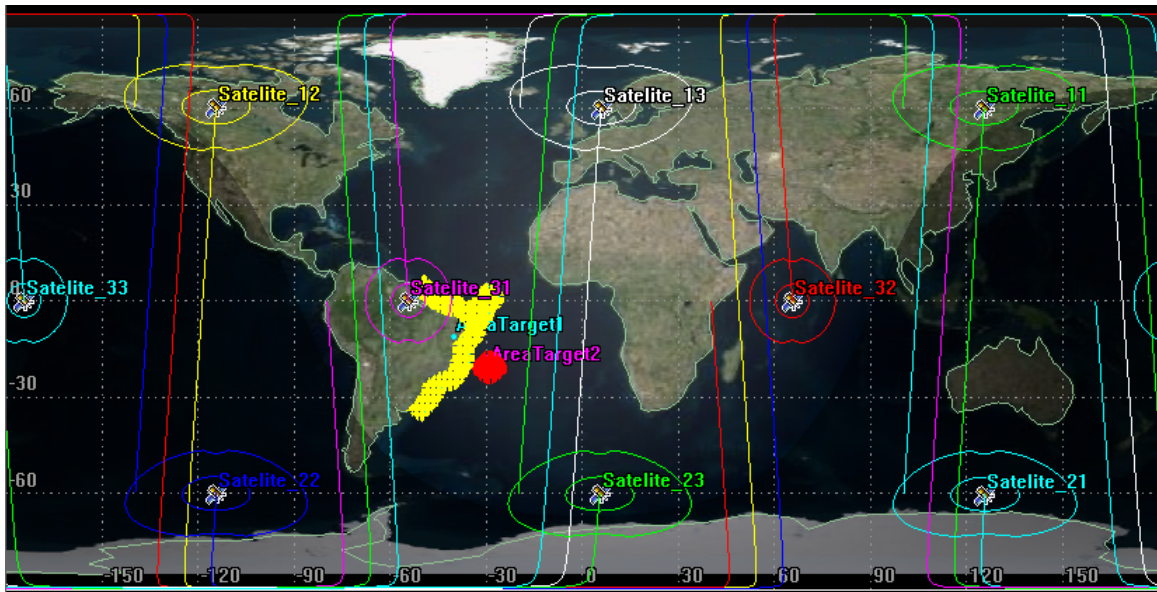


FIGURA 6.5 – Polar: *Ground track* da constelação. Solução proposta: $T = 9$ e $P = 3$.

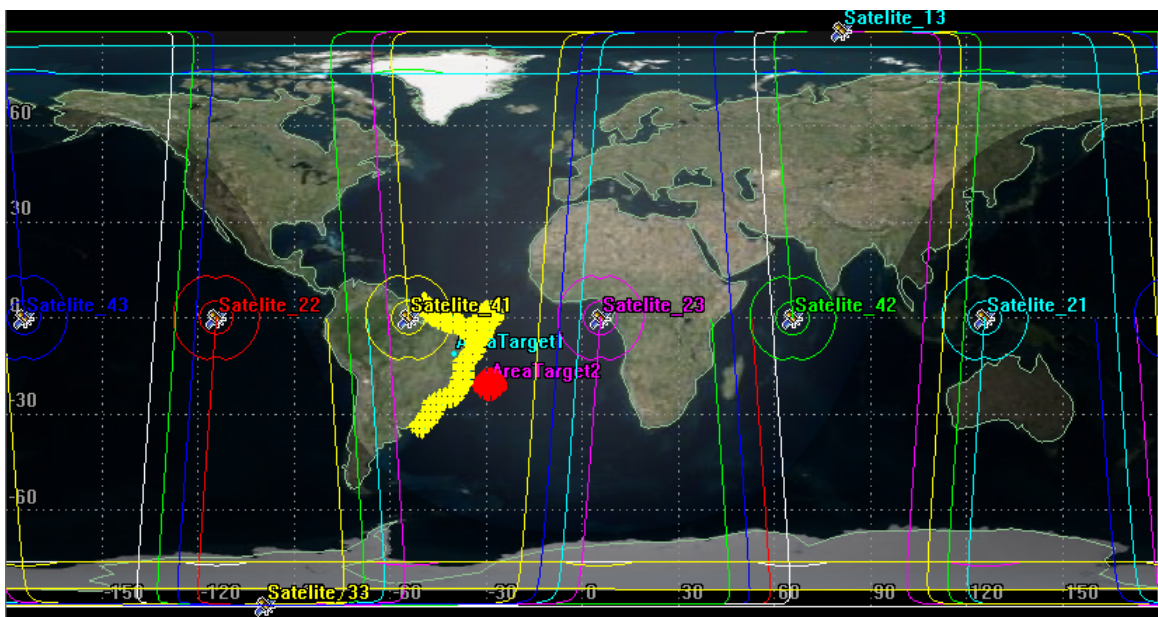


FIGURA 6.6 – Polar: *Ground track* da constelação. Solução proposta: $T = 12$ e $P = 3$.

em taxa de acesso e tempo de revisita.

No entanto, vale destacar a relevância de constelações Polares quando comparadas em termos de custos de lançamento a constelações cuja inclinação está perto do equador, caso no qual obtivemos a solução Walker. De fato, o custo de lançamento de satélites próximos ao equador costuma ser mais elevado do que para se colocar em órbita o mesmo em trajetórias polares (WERTZ *et al.*, 2011), e, dessa maneira, deve-se considerar o fator custo no projeto final para adotar as soluções aqui empregadas, uma vez que o uso de CubeSats diminuiria consideravelmente o custo de produção de cada satélite.

Ademais, nota-se uma divergência entre os resultados obtidos, uma vez que o tempo de

revisita se dá em média em 1,5 horas, mas a taxa de revisita não atinge valores superiores a 25%, a depender da solução. Isso provavelmente ocorre devido ao baixo tempo de acesso em cada passagem do satélite, significando que, provavelmente, os satélites passam pouco período sob a região de interesse desde o tempo que a veem até pararem de vê-la, quando passam pela área analisada.

Agora, quando se trata da qualidade de resolução das imagens obtidas pelos sensores utilizados, sabe-se que, devido às limitações que envolvem o tamanho possível da antena do radar que podem ser transportados em satélites e tomando uma frequência específica (portanto com comprimento de onda definido, já que se trata de uma onda eletromagnética), a altitude possível de operação dificilmente consegue ultrapassar algumas centenas de quilômetros (PAUL, 2020).

Assim, uma vez que o uso da altitude de 800 km favorece o tempo de revisita e taxa de acesso do sistema, existem preocupações referentes ao nível de resolução que pode ser obtido a essa altitude.

Todavia, como exemplo, o satélite canadense RADARSAT-1 que foi utilizado essencialmente para monitoramento de recursos naturais e do clima global, foi lançado em 1995, e já descontinuado e operava na faixa de frequência de 5,3 GHz, com altitude de 793 km de perigeu e 821 km de apogeu, conseguindo obter imagens com resolução de até 8 metros (AGENCY, 2020). O seu sucessor, o RADARSAT-2, possui órbita parecida e resolução de até 3 metros, com uma tecnologia mais desenvolvida que a de seu antecessor (EMBRAPA, 2020a).

Por fim, pode-se dizer que a análise proposta de monitoramento da costa litorânea brasileira, mais comumente conhecida como Amazônia Azul, pode ser desempenhada por uma constelação de satélites de padrões Walker Delta e Polar, sendo respondidos os questionamentos inicialmente levantados na definição do problema: quais são as constelações que são as melhores soluções compromisso e quais os tempos de revisita e taxa de acesso dessas soluções.

Ainda, as soluções propostas são satisfatórias para o objetivo proposto, uma vez que elas atendem às hipóteses iniciais levantadas em termos de número total de satélites previsto (inferior a 15) e tempo de revisita inferior a 3 horas e, em alguns casos, inferior até mesmo a 1,5 horas (desejável). Foi atingido ainda o objetivo do trabalho, que consistia em encontrar as melhores soluções compromisso para o monitoramento da região da Amazônia Azul, além de terem serem atendidos os objetivos específicos.

6.2 Contribuições e melhorias propostas

O estudo de diferentes tipos de constelações para atender às demandas das Forças Armadas em áreas de interesse é de vital importância estratégica no contexto brasileiro. Dessa forma, uma vez que pouco conteúdo está disponível hoje sobre essa região analisada e em vista da necessidade existente de monitoramento da Amazônia Azul (conforme previsto pelo SisGAAZ), este trabalho apresenta um amplo estudo de possibilidades de constelações, cujos métodos de *design* se encontram bem definidos na literatura.

Assim, uma vez que neste trabalho foram desenvolvidos *scripts* que associam dois dos principais *softwares* utilizados nos estudos de missões espaciais, o que facilita sobremaneira a implementação de ferramentas para as fases iniciais de missões espaciais, podendo, portanto, ter impacto direto no meio espacial. Além disso, os resultados aqui levantados apresentam um estudo detalhado de constelações pouco encontrado na literatura especializada sobre o tema, contribuindo na discussão desse assunto no âmbito científico.

Por fim, diversos estudos adicionais poderiam complementar o estudo aqui realizado, como por exemplo, avaliar mais figuras de mérito. Neste contexto, avaliar o *Age of data*, *Response Time* e mesmo *Acess duration* (tempo de duração médio de cada acesso da constelação na região de interesse) poderiam enriquecer a análise efetuada. Ademais, especialmente em relação aos sensores e problema de monitoramento, existem situações não exploradas nesse trabalho que podem ser levadas em consideração em fases mais adiantadas que a Pré-Fase A e Fase A de um projeto espacial.

Por exemplo, poderiam ser analisadas variações de sensores, com diferentes ângulos de elevação entre os hoje existentes para verificar qual produz melhor resultado. Mais ainda, poderia-se, portanto, elaborar um *footprint* do sensor mais parecido com o que existe comercialmente, que provavelmente terá diferenças com o modelo de *field of regard* proposto pelo software STK[®], acoplando ainda nesses sensores sistemas de controle que busquem sempre olhar no limite de visibilidade a fim de passar mais tempo olhando para a região de interesse. Além disso, um estudo futuro pode considerar o *duty cycle* dos sensores, que é o período no qual ele alterna funcionamento e não-funcionamento, para outra análise mais precisa dos resultados a serem obtidos.

Finalmente, uma outra extensão possível seria realizar uma análise semelhante a realizada nesse trabalho, mas utilizando de maneira direta a variável custo, que poderia englobar custos de produção, custos de materiais, tempo de confecção, lançamento e manutenção, e, com essa nova variável, definir uma missão que busque minimizar essa variável.

Referências

ADAMS, W. S.; RIDER, L. Circular polar constellations providing continuous single or multiple coverage above a specified latitude. **Journal of the Astronautical Sciences**, p. 155–192, Maio 1987.

AGENCY, C. S. **What is RADARSAT-1**. 2020. Disponível em: <<https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/what-is-radarsat1.asp>>. Acesso em: 6 set. 2020.

AGI. **Measuring Age of Data**. 2020. Disponível em: <<https://help.agi.com/stk/11.0.1/Content/stk/sn-01.htm>>. Acesso em: 19 out. 2020.

AGI. **Sensor Definition - STK**. 2020. Disponível em: <<https://help.agi.com/stk/11.0.1/Content/stk/sn-01.htm>>. Acesso em: 29 maio 2020.

AGI. **STK Coverage**. 2020. Disponível em: <https://lsas-tec.co.jp/wp-content/themes/lsas-tec/pdf/7_CoverageProductSpecsheet.pdf>. Acesso em: 29 maio 2020.

BALLARD, A. H. Rosette constellations of earth satellites. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, IEE Conference Publication 160, n. 5, p. 656–673, Setembro 1980.

BESTE, D. C. Design of satellite constellations for optimal continuous coverage. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, n. 3, p. 466–473, Maio 1978.

BRACHER, A.; SINNHUBER, B. **An Introduction to Remote Sensing - Chapter 5**. 2009. Disponível em: <http://www.iup.uni-bremen.de/~bms/remote_sensing/remote_sensing_chap5.pdf>. Acesso em: 29 maio 2020.

CHOBOTOV, V. A. **Orbital Mechanics**. 2^o.ed. Washington, DC : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.

CLEBSCH, A. B. **A Física nas embarcações**. 2004. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20021/Angelisa/>>. Acesso em: 19 out. 2020.

CONFAP. **Elevação do nível dos mares aumenta casos de desastres naturais na costa brasileira**. 2017. Disponível em: <<http://confap.org.br/news/elevacao-do-nivel-dos-mares-aumenta-casos-de-desastres-naturais-na-costa-brasileira/>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

CROSSLEY, W. A.; WILLIAMS, E. A. Simulated annealing and genetic algorithm approaches for discontinuous coverage. **Engineering Optimization** **A35**, n. 3, p. 353–371, 2000.

CURTIS, H. D. **Orbital Mechanics for Engineering Students**. 1^o.ed. Daytona Beach, Florida : *Elsevier Aerospace Engineering Series*, 2005.

DAI, G.; CHEN, X.; WANG, M.; FERNÁNDEZ, E.; NGUYEN, T. N.; REINELT, G. Analysis of satellite constellations for the continuous coverage of ground regions. **JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS**, Agosto 2017.

DEFESANET. **NPaOc Amazonas - Incorporação do Navio-Patrolha Oceânico AMAZONAS à Marinha do Brasil**. 2012. Disponível em: <<https://www.defesamet.com.br/naval/noticia/6559/NPaOc-Amazonas—Incorporacao-do-Navio-Patrolha-Oceanico-AMAZONAS-a-Marinha-do-Brasil>>. Acesso em: 19 out. 2020.

DEPUTADOS, C. dos. **Deputados apoiam comissão mista para acompanhar ações na Amazônia Azul**. 2017. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/513085-deputados-apoiam-comissao-mista-para-acompanhar-acoes-na-amazonia-azul/>>. Acesso em: 1 abr. 2020.

ELY, T. A.; CROSSLEY, W. A.; WILLIAMS, E. A. Satellite constellation design for zonal coverage using genetic algorithms. **Journal of the Astronautical Sciences**, n. 3-4, p. 207–228, 1999.

EMBRAPA. **RADARSAT**. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/radarsat>>. Acesso em: 19 out. 2020.

EMBRAPA. **Satélites de Monitoramento**. 2020. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/>>. Acesso em: 4 mai. 2020.

ESA. **Types of Orbits**. Março 2019. Disponível em: <https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits>. Acesso em: 6 jun. 2020.

ESTADÃO. **Entenda o vazamento de petróleo em praias do Nordeste**. 2019. Disponível em: <<https://sustentabilidade.estadao.com.br/noticias/geral,entenda-o-vazamento-de-petroleo-em-praias-do-nordeste,70003026922>>. Acesso em: 5 fev. 2020.

GEORGE, E. R. Optimization of satellite constellations for discontinuous global coverage via genetic algorithms. **Astrodynamics** **1997**, 1997.

GOBETZ, F. W. Satellite networks for global coverage. **Advances in astronautical sciences**, p. 134–156, 1963.

HANSON, J. M.; EVANS, M. J.; TURNER, R. E. Designing good partial coverage satellite constellations. **Journal of the Astronautical Sciences**, n. 2, p. 215–239, 1992.

IPEA. **Estudo do Ipea destaca a relevância do programa de defesa da Amazônia Azul**. 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_contentview=articleid=34638>. Acesso em: 4 fev. 2020.

LEE, H. W.; SHIMIZU, S.; YOSHIKAWA, S.; HO, K. Satellite constellation pattern optimization for complex regional coverage. **JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS**, Fevereiro 2020.

LOPES, G. O.; LIMA, C. A. Características e aplicações das imagens sar na identificação de alvos na região amazônica. **Anais XIV - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 7323–7330, Abril 2009.

MATOSSIAN, M. G. Improved candidate generation and coverage analysis methods for design optimization of symmetric multi-satellite constellations. **Acta Astronautica**, Elsevier Science Ltd, n. 2-8, p. 561–571, 1997.

MMA, M. do M. A. **Zona costeira e marinha**. 2019. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-aquatica/zona-costeira-e-marinha.html>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

MORTARI, D.; SANCTIS, M. D.; LUCENTE, M. Design of flower constellations for telecommunication services. **Proceedings of the IEEE**, Novembro 2011.

MORTARI, D.; WILKINS, M.; BRUCOOLERI, C. The flower constellations. **Journal of Astronautical Sciences**, n. 1, p. 107–127, 2004.

NETO, T. V.; BRANDÃO, A. M.; COSTA, C. A. **CubeSats- Resumo Executivo CGEE**. Brasília, 2018. 50 p.

OSUL, J. **Marinha vai combater tráfico de drogas e armas pelo mar**. 2018. Disponível em: <<https://www.osul.com.br/marinha-vai-combater-traffic-de-drogas-e-armas-pelo-mar/>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G. Radares imageadores (sar) orbitais: tendências em sistemas e aplicações. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, p. 2506–2513, Abril 2015.

PAUL, F. **Theory of Synthetic Aperture Radar**: University of zurich - department of geography. 2020. Disponível em: <https://www.geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html>. Acesso em: 6 set. 2020.

PONTANI, M.; TEOFILATTO, P. Satellite constellations for continuous and early warning observation: A correlation-based approach. **Journal of guidance, control, and dynamics**, n. 4, p. 910–921, 2007.

SANTOS, W.; LOURES, L. E. V.; GONÇALVES, L. D.; CASALE, D. E.; SILVA, F. de C.; SILVA, M. de C.; CABRAL, P. L. P. A study about the possible constellations of cubesats for brasilian needs. **IV IAA Latin American CubeSat Workshop**, Agosto 2020.

SCHETTER, T.; CAMPBELL, M.; SURKA, D. Multiple agent-based autonomy for satellite constellations. **Artificial Intelligence** **145**, Elsevier Science B.V., p. 147–180, 2003.

SENGUPTA, P. **Satellite Relative Motion Propagation and Control in the Presence of J2 Perturbations**. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Texas AM University, Texas, USA, 2003.

SILVA, F. de C.; SANTOS, W.; GONÇALVES, L. D. Estudo da variação do total de satélites em constelações walker delta para monitoramento da costa litorânea brasileira. **XXII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, p. 111–115, Setembro 2020.

WALKER, J. G. **Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage**. [S.l.], 1970.

WALKER, J. G. Some circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage. **J. British Interplanetary Society**, v. 24, n. 4, p. 369–384, 1971.

WALKER, J. G. **Continuous whole Earth coverage by circular orbit satellite patterns**. [S.l.], Abril 1973.

WALKER, J. G. **Continuous whole Earth coverage by circular orbit satellite patterns**. [S.l.], Março 1977.

WALKER, J. G. Satellite patterns for continuous multiple whole earth coverage. **Maritime and Aeronautical Satellite Communication and Navigation**, IEE Conference Publication 160, p. 119–122, Março 1978.

WALKER, J. G. **Coverage predictions and selection criteria for satellite constellations**. [S.l.], Dezembro 1982.

WERTZ, J. R.; EVERETT, D. F.; PURSCHELL, J. J. **Space Mission Engineering: The New SMAD**. 2^o.ed. Hawthorne, California : *SpaceTechnologyLibrary*, 2011.

WERTZ, J. R.; MEISSINGER, H. F.; NEWMAN, L. K.; SMIT, G. N. **Orbit Constellation - Design Management**. 2^o.ed. Hawthorne, California : *SpaceTechnologyLibrary*, 2009.

WOELLERT, K.; EHRENFREUND, P.; RICCO, A. J.; HERTZFELD, H. Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 4, p. 663–684, Novembro 2011.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 25 de novembro de 2020	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/TC-066/2020	4. Nº DE PÁGINAS 101
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA COSTA LITORÂNEA BRASILEIRA			
6. AUTOR(ES): Felipe de Castro Silva			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Amazônia Azul; Monitoramento; Constelações de satélites; Walker Delta; Polar (<i>Street of coverage</i>)			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Microssatélites; Monitoramento; Constelações; Satélites; Engenharia aeroespacial			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial. Orientador: Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos; coorientadora: Profa. Dra. Liana Dias Gonçalves. Publicado em 2020.			
11. RESUMO: <p>Este trabalho apresenta uma metodologia de estudo de possíveis constelações de pequenos satélites para monitoramento da costa marítima brasileira. Para tal, são estudados dois diferentes <i>designs</i> de constelação, a Walker Delta e a Polar (ou <i>Street of coverage</i>), sendo analisadas as figuras de mérito referentes ao tempo de revisita da constelação na área de interesse e à taxa de acesso, que é referente ao tempo percentual no qual a área avaliada é coberta em relação ao tempo total de simulação. Assim, verifica-se que a constelação Walker Delta se adequa melhor à solução do problema de monitoramento, sendo verificado que os melhores resultados são obtidos para constelações Walker Delta de configurações 25:6/3/<i>F</i> (com <i>F</i> qualquer entre 0 e 2) ou 25:10/5/<i>F</i> (para <i>F</i> ≠ 3). As soluções encontradas utilizam o <i>software</i> STK® como base para simulação da missão espacial, trabalhando de maneira conjunta com o MATLAB® para automatização do método de simulação das constelações de satélites, permitindo obter um grande conjunto de resultados de modo muito mais rápido e eficiente.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			