

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

PAULO CESAR GAZZOLA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO
POR ENXAME DE PARTÍCULAS PARA ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA
EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE MULTIFEIXES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

PAULO CESAR GAZZOLA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO
POR ENXAME DE PARTÍCULAS PARA ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA
EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE MULTIFEIXES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Industrial Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Cesar Gazzola Pereira

Desenvolvimento de algoritmo baseado em otimização por enxame de partículas para alocação de potência em sistemas de comunicação via satélite multifeixes

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00hs do dia 03/06/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Membro)

Este trabalho é dedicado a minha avó Isaura (em memória), aos meus pais, por todo amor, carinho e educação a mim repassados. A minha namorada e meus amigos, por toda paciência e compreensão nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Emilio Cesar Pereira e Dinea Gazzola Pereira, e minha avó Isolina Ananias Pereira, pelos esforços que me fizeram chegar até neste momento.

Agradeço a minha namorada, Karoline Novaes pelo companheirismo e compreensão ao longo deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Renan Durand, por toda sua dedicação e valorosa orientação, por todos os ensinamentos repassados a mim e pela confiança depositada na realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, pelo apoio e ajuda constante, sem o qual não poderia ter atingido o sucesso que obtive no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio e a todos seus funcionários pela disponibilidade e amizade.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará a seu tamanho original. “

Oliver Wendell Holmes

RESUMO

PEREIRA, Paulo Cesar Gazzola. **Desenvolvimento de algoritmo baseado em otimização por enxame de partículas para alocação de potência em sistemas de comunicação via satélite multifeixes.** 2015. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Neste trabalho é descrita a alocação de potência em sistemas de comunicação multifeixes via satélite, baseado na inteligência do enxame de partículas. O algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) é proposto, a fim de resolver o problema de alocação de potência nos múltiplos feixes, para fornecer a melhor razão entre a interferência sinal-ruído (SNIR) exigida pelos usuários das estações terrestres. No modelo desenvolvido é considerada a interferência entre os múltiplos feixes e diferentes condições de canal para cada feixe, através da atenuação por chuva. Os principais resultados numéricos, considerando diferentes situações climáticas (céu claro e chuva), mostram a viabilidade e a precisão da implantação do algoritmo PSO para resolver um problema de alocação de potência. Além disso, com o método proposto é observada a diminuição da potência transmitida para os feixes em situação de clima bom, mantendo o SNIR mínimo para os receptores na Terra e aumentando a disponibilidade de potência para os feixes em situação chuvosa. A convergência do algoritmo proposto é observada com baixa complexidade computacional, quando comparado com outros esquemas de alocação de potência.

Palavras-chave: Satélite. Alocação. Potência. PSO. Atenuação.

ABSTRACT

PEREIRA, Paulo Cesar Gazzola. **Development of particle swarm optimization-based algorithm for power allocation in communication systems multibeam satellite.** 2015. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

In this paper, a power allocation in multibeam satellite communication based on particle swarm intelligence is described. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is evocated in order to solve the problem of power allocation in the multiple narrow spotbeams to provide the signal-to-noise plus interference ratio (SNIR) required by Earth station users. In the developed model is considered the multibeam interference and the different channel conditions of each beam by rain attenuation. The main numerical results, considering different sky situation (clear and rainy), have revealed the viability and precision of the PSO algorithm deployment to solve a power allocation problem. In addition, with the proposed scheme is observed the decreasing of transmitted power for non-rainy beams with guarantee of the minimum SNIR of the Earth receivers and increase the power availability to the rainy beams. The convergence of the proposed algorithm is observed with low computational complexity when compared with others power allocation schemes.

Keywords: Satellite. Allocation. Power. PSO. Attenuation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mecanismo de propagação em Espaço Livre	17
Figura 2 - Atenuação em função da chuva.....	21
Figura 3 - Fator de atenuação em função da frequência.....	24
Figura 4 - Esquemática do enlace entre a estação terrena e a estação orbital.....	25
Figura 5 - Temperatura de ruído da antena em função do grau de elevação	28
Figura 6 – Sistema de Cobertura de um satélite multifeixe	30
Figura 7- Esquemático do Sistema de Satélite Multifeixes.....	31
Figura 8 - Cluster de Feixes Diretivos	32
Figura 9 – Fluxograma de Execução do AG.....	37
Figura 10 - Movimento das partículas no PSO.....	40
Figura 11 - Fluxograma do algoritmo proposto.....	42
Figura 12 - Mapa da posição dos usuários, do satélite e dos feixes	44
Figura 13 - Evolução da soma das potências transmitidas pelos feixes em relação ao número de iterações.....	46
Figura 14 - Comparação entre alocação estática e dinâmica de potência	48
Figura 15 - Taxa de evolução da convergência em função da iteração	49
Figura 16 – Comparação da complexidade computacional algorítmica	50
Figura 17 - Complexidade computacional de acordo o número de feixes	51
Figura 18 - Complexidade em relação ao número de feixes	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequências utilizadas nas comunicações via Satélite.....	16
Tabela 2 - Coeficientes de K para Polarização Horizontal	22
Tabela 3 - Coeficientes de K para Polarização Vertical	23
Tabela 4 - Coeficientes de α para Polarização Horizontal	23
Tabela 5 - Coeficientes de α para Polarização Vertical.....	23
Tabela 6 - Parâmetros do sistema via satélite multifeixes.....	45
Tabela 7 - Parâmetros do PSO	45

LISTA DE SIGLAS

AWGN	Ruído Branco Gaussiano Aditivo, do inglês <i>Additive White Gaussian Noise</i> .
BER	Taxa de erro de bit, do inglês <i>Bit Error Rate</i> .
EIRP	Potência efetivamente irradiada pelo satélite, do inglês <i>Effective Isotropic Radiated Power</i> .
ES	Busca exaustiva, do inglês <i>Exhaustive Search</i> .
GEO	Sigla utilizada para representar satélites em órbita geoestacionária, do inglês <i>Geosincrony Earth Orbit</i> .
LEO	Sigla empregada para representar satélites em órbita baixa, do inglês <i>Low Earth Orbit</i> .
LNA	Amplificador de Baixo Ruído, do inglês <i>Low Noise Amplifier</i> .
MEO	Sigla empregada para representar satélites em órbita mediana, do inglês <i>Medium Earth Orbit</i> .
MI	Inversão de Matriz, do inglês <i>Matrix Inversion</i> .
NSGA-II	Sigla utilizada para referir-se ao Algoritmo genético multiobjetivo, do inglês <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> .
PSO	Otimização por Enxame de Partículas, do inglês <i>Particle Swarm Optimization</i> .
QoS	Qualidade do Sinal, do inglês <i>Quality of Service</i> .
SNIR	Relação Sinal Ruído Interferência, do inglês <i>Signal-to-Interference plus Noise Ratio</i> .
TWTA	Tubos Amplificadores de Onda, do inglês <i>Traveling Wave Tube Amplifiers</i> .

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMA	13
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	Objetivo Geral	14
1.4.2	Objetivos Específicos	15
2	ASPECTOS TEÓRICOS	16
2.1	MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO	17
2.2	ATENUAÇÕES NOS ENLACES VIA SATÉLITE	19
2.2.1	Atenuação por Espaço Livre	19
2.2.2	Perdas por Propagação	20
2.2.2.1	Atenuação Devido a Gases Atmosféricos	20
2.2.2.2	Atenuação por Precipitação e Nuvens	20
2.2.3	Cálculo do Fator de Atenuação	21
2.2.4	Atenuação por Chuva a partir da Taxa de Precipitação	24
2.3	EFEITOS DO RUÍDO NA RECEPÇÃO DE SINAIS	27
2.4	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE MULTIFEIXES	29
2.4.1	Modelo do Sistema Multifeixes	30
2.4.2	Interferência entre os Feixes	31
3	ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS	34
3.1	RELAÇÃO SINAL-INTERFERÊNCIA MAIS RUÍDO	34
3.2	ALGORITMOS PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS	34
3.2.1	Busca Exaustiva	35
3.2.2	Inversão de Matriz	35
3.2.3	Algoritmos Genéticos	36
4	OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA POR ENXAME DE PARTÍCULAS	38
4.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	38
4.2	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	39
4.2.1	Alocação de Potência por PSO	41
5	RESULTADOS	44
6	CONCLUSÃO	54

REFERÊNCIAS.....	55
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O início da comunicação via satélite ocorreu com o lançamento do Sputnik 1, o primeiro satélite artificial soviético em 1957 (EVANS, 1995). Seu lançamento foi motivado pelo desenrolar da Guerra Fria entre americanos e soviéticos. Deste então, a comunicação via satélite experimentou um enorme avanço tecnológico e, atualmente, consiste de uma das tecnologias que fornecem suporte para os sistemas de comunicação amplamente utilizados em escala mundial.

Um satélite de comunicações é representado de forma simplificada como um rádio receptor e transmissor se deslocando pelo espaço. Desta forma, o funcionamento do satélite consiste em receber informações provenientes da Terra, que é denominado de transmissão de *uplink*, realizar o tratamento destas informações com o intuito de melhorar a qualidade do sinal, e retransmitir para outras regiões da Terra. Este processo de retransmissão é denominado *downlink* e a área da Terra que pode captar o sinal transmitido é denominada área de cobertura. Em função destas características, os sistemas de comunicação via satélite foram inicialmente utilizados para interligar regiões muito distantes, porém atualmente os satélites de comunicação compõem a maioria dos sistemas de comunicação e algumas aplicações que se pode citar são a interligação de sistemas de transmissão entre continentes, distribuição de TV por assinatura e TV aberta, sistemas de rastreamento e localização global, telefonia celular via satélite e redes de dados, como a Internet (INTELSAT, 2014).

A cobertura do planeta Terra é composta por satélites em diferentes altitudes e localizações no espaço. As informações sobre a altitude e localização do satélite no espaço são denominadas de órbita. Portanto, os satélites de comunicação podem ser classificados como satélites de baixa órbita (LEO), média órbita (MEO) e órbita geossíncrona (GEO).

A arquitetura dos sistemas de comunicação via satélite foi desenvolvida para suportar tráfego contínuo de poucas estações terrenas transmitindo em *uplink* e realizando transmissão no formato de distribuição (*broadcasting*) em *downlink*. O projeto da cobertura dos sistemas de comunicação via satélite caracterizava-se por ser estático, ou seja, a potência transmitida era dimensionada para superar as atenuações envolvidas e as antenas apontavam em direção fixa. Com relação à potência transmitida, verifica-se que esta é superestimada para superar principalmente os efeitos atmosféricos, como chuva. Por outro lado, a cobertura fixa

providas pelas antenas limitam o desempenho do sistema em função da interferência (Wang, 2014). A evolução dos sistemas de comunicação via satélite consiste na alocação dinâmica de recursos e a utilização de antenas com múltiplos feixes de área de cobertura.

1.1 PROBLEMA

Neste estudo serão abordados os sistemas de comunicação dinâmicos dos satélites geoestacionários, ou seja, sistemas de comunicação com capacidade de controle de alocação de recursos e a utilização de antenas com múltiplos feixes.

Os satélites geoestacionários apresentam a maior órbita (~36000 km) entre os satélites utilizados em sistemas de comunicação, desta forma a potência transmitida deve ser elevada para superar as perdas por propagação em espaço livre e perdas em função dos efeitos atmosféricos (HONG, 2008). Desta forma, os mecanismos que possam diminuir a potência transmitida e aumentar a eficiência dos sistemas de comunicação devem ser investigados. O avanço destas investigações são fundamentais para aumentar a eficiência energética dos satélites, visto que o aumento desta eficiência implica no aumento da vida útil dos satélites em órbita. Por outro lado, o aumento da eficiência energética implica na diminuição das dimensões, peso e custo de novos satélites.

Os sistemas de comunicação via satélite atuais atuavam inicialmente na banda C (4 a 8 GHz), porém os novos sistemas passaram a atuar na banda Ku (10,9 a 17 GHz) e principalmente na banda Ka (17 a 40 GHz). Apesar das frequências da banda Ku e Ka apresentarem maior eficiência da quantidade de transmissão de informação, conforme a frequência aumenta, maiores são os impactos da atenuação em função dos efeitos atmosféricos, principalmente em função da chuva. Além disso, os fatores que afetam a propagação de ligações de qualquer banda por satélite são: atenuação por chuvas, antena molhada, despolarização devido à chuva, absorção de gases, atenuação por nuvem, atenuação da camada de fusão e cintilação ionosférica (MARINS, 2004). Entretanto, segundo (KOTA, 2002) dentre esses fatores apresentados, a atenuação causada pela chuva é a mais relevante, principalmente em regiões de clima equatorial e tropical.

O problema que será investigado neste trabalho é a alocação dinâmica de recursos, como potência transmitida, e a utilização de antenas com múltiplos feixes de área de cobertura na banda Ka, sob condições climáticas adversas.

1.3 JUSTIFICATIVA

As redes de comunicações em banda larga operando via satélite, em banda Ka ou superior, desempenham um papel significativo para a infraestrutura de telecomunicações em todo o mundo, fornecendo uma rede de acesso (*backhaul*) e serviços de satélite para o usuário direto. Atenuações por chuva nestas frequências é o fator de comprometimento mais dominante que degrada o desempenho do sistema. Deve-se fazer o possível para aumentar seu rendimento, pois recursos a bordo são escassos e caros.

A reconfiguração dinâmica das antenas, com feixes diretivos, foi recentemente proposta como uma técnica para a redução da atenuação. Portanto, o problema de encontrar a melhor alocação de potência entre os feixes das antenas do satélite, com intuito de aumentar o número de usuários/estação terrestres atendidas é fundamental para aumentar a eficiência do sistema. A possibilidade de alocar dinamicamente os recursos dos sistemas de comunicação via satélite também possibilitam a adaptação dos recursos em função da variação da demanda.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de algoritmos para alocação de forma dinâmica de recursos, como a potência transmitida entre os feixes das antenas do satélite, de acordo com a variação das condições atmosféricas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Mostrar o modelamento matemático dos elementos envolvidos no sistema de comunicação dos satélites;
- Investigar os principais algoritmos empregados para alocação de potência transmitida;
- Investigar as principais figuras de mérito para analisar o desempenho dos sistemas de comunicação via satélite com alocação dinâmica de recursos;
- Propor algoritmos de controle e alocação de recursos, como a potência transmitida entre os feixes das antenas do satélite, de acordo com a variação das condições atmosféricas.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

Os satélites transmitem informações para a Terra por meio de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são oscilações entre um campo elétrico e magnético perpendiculares. Estas ondas propagam-se com a velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) no vácuo, porém esta velocidade pode ser abrandada pela matéria, tal como o ar ou a água (PROTZEKa, 2001). As ondas eletromagnéticas são empregadas como portadoras de informação nos sistemas de comunicação. Podem-se citar diferentes aplicações de ondas eletromagnéticas com frequências distintas em sistemas de comunicação como radio transmissão, fibras ópticas, comunicação via satélite, entre outros (PROTZEKb, 2001). Sua frequência está relacionada com a sua capacidade de transmitir informação. Este princípio pode ser ilustrado por meio da equação da capacidade de transmissão de Claude Shannon (SHANNON, 1948),

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

onde C é a capacidade do canal (bps), B a largura de banda (Hz) e S/N a relação sinal-ruído.

A largura de banda empregada nos sistemas de comunicação via satélite depende do tipo de serviço oferecido. As principais faixas de frequência utilizadas e sua denominação está ilustrada na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Frequências utilizadas nas comunicações via Satélite

Banda	Faixa de Frequência (GHz)
L	1,0 – 2,0
S	2,0 – 4,0
C	4,0 – 8,0
X	8,0 – 10,9
Ku	10,9 – 17
Ka	17 – 40
Milimétrica	40 – 300

Fonte – Adaptado de MARINS, 2004.

2.1 MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO

As ondas eletromagnéticas utilizadas na transmissão e recepção de sinais em sistemas de comunicação via satélite utilizam o mecanismo de propagação em espaço livre. Essa é a situação básica de propagação, segundo a qual transmissor e receptor estão imersos em um espaço livre de obstruções em qualquer direção e o campo elétrico é calculado em um ponto qualquer de observação. O mecanismo de propagação envolvido é o de propagação em visibilidade. A atenuação de propagação é determinada pela relação entre a potência recebida e a potência transmitida. A Figura 1 ilustra os elementos envolvidos na propagação entre o satélite e a estação terrena nos casos de *uplink* e *downlink*.

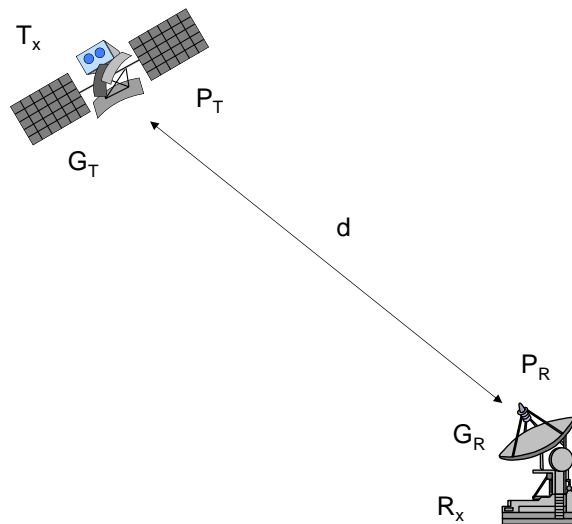


Figura 1 - Mecanismo de propagação em Espaço Livre
Fonte: O autor.

Com G_T sendo o ganho da antena transmissora, G_R o ganho da antena receptora, P_T a potência transmitida e P_R a potência recebida. O ganho das antenas é definido por meio da relação entre a potência máxima irradiada e a potência de uma antena isotrópica (RODRIGUES, 2000).

$$G_M = \frac{\text{densidade de potência na direção de máxima irradiação}}{\text{densidade de potência isotrópica irradiada}} \quad (2)$$

O termo isotrópico é utilizado para definir a irradiação uniforme de energia em todas as direções (RODRIGUES, 2000). Com isso, a relação entre o ganho da antena e sua capacidade de recepção de sinal é dada por meio da área efetiva (A_{ef}) (RODRIGUES, 2000),

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (3)$$

com λ sendo o comprimento de onda, dado por $\lambda = 3 \times 10^8 / f$, com a frequência (f) em Hz.

A relação entre densidade de potência transmitida e o campo elétrico recebido é estabelecida, em campo distante, por (MACHADO, 2011)

$$S = \frac{E^2}{\eta} \quad (4)$$

S é a densidade de potência [W/m^2], E o módulo do campo elétrico [V/m] e η a impedância intrínseca do meio [Ω], que no espaço livre é dada por $\eta = \eta_0 = 120\pi \cong 377\Omega$. Por outro lado, a densidade de potência a uma distância d , para uma antena isotrópica é dada por (EISENCRAFT, 2004):

$$S = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (5)$$

O campo elétrico na antena receptora será dado por:

$$E = \frac{\sqrt{30 P_T G_T}}{d} \quad [V/m] \quad (6)$$

Assim, a potência recebida pode ser expressa por (MACHADO, 2011):

$$P_R = S \times A_{ef} = \frac{|E|^2}{120\pi} A_{ef} = \left(\frac{E\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{G_R}{120} \quad [W] \quad (7)$$

A expressão apresentada em (7) pode ser reescrita por meio da fórmula de Friis (MACHADO, 2011):

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R \quad (8)$$

No desenvolvimento de projetos e análise de sistemas de comunicação via satélite, pode-se empregar a potência isotrópica efetivamente irradiada (EIRP) em conjunto com o formalismo anterior. Considera-se que a EIRP é definida como (MACHADO, 2011):

$$EIRP \text{ (dBm)} = P_T \text{ (dBm)} + G_T \text{ (dB)} \quad (9)$$

$$EIRP \text{ (dBW)} = P_T \text{ (dBW)} + G_T \text{ (dB)} \quad (10)$$

Assim, a fórmula de propagação em espaço livre resulta em:

$$P_r(dBm) = EIRP(dBm) + G_R(dB) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (11)$$

Esta fórmula representa a propagação entre dois pontos e considera as condições de espaço livre, porém em sistemas de comunicação via satélite existem outros tipos de perdas, como por absorção atmosférica.

2.2 ATENUAÇÕES NOS ENLACES VIA SATÉLITE

De acordo com Marins (2004), as atenuações presentes nos enlaces via satélite podem ser divididas em dois grupos. Um relacionando com o meio de propagação, levando em conta as condições de radiação, como atenuações por espaço livre, por desalinhamento e por chuva.

Outro grupo, considerando as atenuações causadas por componentes usados nas estações de recepção e transmissão, tais como: cabos, conectores, emendas, guia de ondas, entre outros.

2.2.1 Atenuação por Espaço Livre

Esta atenuação ocorre devido ao sinal sofrer dispersão ao longo do percurso de propagação, pela própria natureza de radiação dos elementos utilizados na transmissão. Esta dispersão será tanto maior quanto maior for a frequência e a distância. Além disso, na recepção, a área efetiva das antenas é finita, captando apenas parte da energia da frente de onda. Sendo assim, o nível de recepção será muito menor que o de transmissão, como mostrado na Equação (12) (MARINS,2004),

$$A_e = 92,44 + 20 * \log(f) + 20 * \log(d) \quad (12)$$

A_e é a atenuação por espaço livre [dB], f é a frequência de operação do enlace [GHz] e d é a distância do enlace [km].

2.2.2 Perdas por Propagação

A atenuação por propagação em um enlace entre terra-espço, é a soma das diferentes contribuições como se segue:

- Atenuação por gases atmosféricos;
- Atenuação por chuva, ou outra precipitação e nuvens;
- Diminuição no ganho da antena devido à incoerência de frente de onda;
- Cintilação e efeitos de múltiplos caminhos;
- Atenuação por areia e tempestades de poeira.

Cada uma dessas contribuições tem suas próprias características, em função da frequência, localização geográfica e ângulo de elevação da antena. Como regra, em ângulos de elevação acima de 10°, apenas atenuação por gases atmosféricos, por chuva, por nuvem e em alguns casos, por cintilação, serão significativas (ITU-R P.618).

2.2.2.1 Atenuação Devido a Gases Atmosféricos

A atenuação pelos gases atmosféricos, que é totalmente causada por absorção, depende principalmente da frequência, ângulo de elevação, altitude acima do nível do mar e da densidade de vapor de água. Em frequências abaixo de 10 GHz, pode normalmente ser desprezada. A sua importância aumenta com frequências acima de 10 GHz, especialmente para baixos ângulos de elevação (MARINS,2004). Tipicamente, a atenuação máxima gasosa ocorre durante a estação das chuvas. Neste trabalho será considerado constante com valor de 0,3 dB (MARINS,2004).

2.2.2.2 Atenuação por Precipitação e Nuvens

Alguns fatores são relativamente constantes, como moléculas de oxigênio e vapor de água, enquanto outros variam de forma muito relevante, dependendo do clima e das condições atmosféricas. Dentre os mecanismos de perdas por efeitos

atmosféricos, verifica-se que o mecanismo que estabelece maiores perdas é a chuva (KOTA, 2002).

A Figura 2 ilustra as perdas por chuva em diferentes ângulos e frequências.

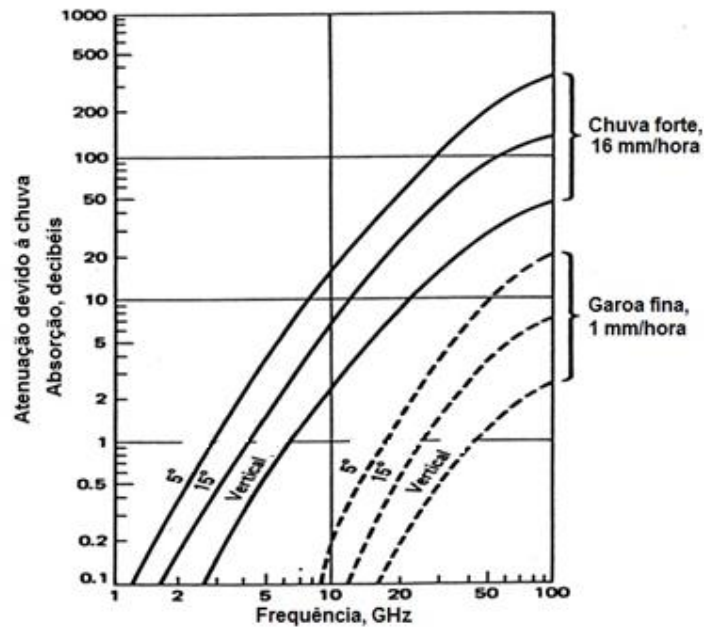


Figura 2 - Atenuação em função da chuva
Fonte: Adaptado de JUNIOR, DURAND (2008)

Considerando estes efeitos, a potência recebida pode ser escrita como:

$$P_r(\text{dBm}) = \text{EIRP}(\text{dBm}) + G_R(\text{dB}) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - \text{Perdas}(\text{dB}) \quad (13)$$

Sendo que *Perdas* representa as perdas em função da chuva. Nesta equação não estão representadas de forma explícita as demais perdas fornecidas por equipamentos e dispositivos, porém estas perdas podem ser somadas ao termo *Perdas*.

2.2.3 Cálculo do Fator de Atenuação

De acordo com ITU P618-11 (2013), a atenuação específica, ou fator de atenuação γ_R pode ser determinado por meio de

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \quad [\text{dB/km}] \quad (14)$$

sendo k e α coeficientes numéricos dados pelas Equações (15) e (16), mostradas a seguir:

$$k = \frac{[K_H + K_V + (K_H - K_V) * \cos^2(\theta) * \cos(2T)]}{2} \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{[K_H * \alpha_H + K_V * \alpha_V]}{2 * K} + \frac{[(K_H * \alpha_V - K_V * \alpha_H) * \cos^2(\theta) * \cos(2T)]}{2 * K} \quad (16)$$

sendo θ é o ângulo de elevação da antena da estação terrena e T é o ângulo de polarização da onda com relação à direção horizontal.

Sabe-se que o ângulo $T = 45^\circ$ (ITU-R P.838-3, 2005) é para polarização circular, enquanto $T = 0^\circ$ é para uma polarização horizontal e $T = 90^\circ$ para polarização vertical. Para encontrar os valores de k e α , através das Equações (15) e (16), devem-se obter, inicialmente, as componentes vertical e horizontal, como proposto nas Equações (17) e (18).

$$\log K = \sum_{j=1}^4 \left(a_j * \exp \left[- \left(\frac{\log(f) - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k * \log(f) + c_k \quad (17)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^5 \left(a_i * \exp \left[- \left(\frac{\log(f) - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \right) + m_\alpha * \log(f) + c_\alpha \quad (18)$$

Os parâmetros a , b , c , m_k , c_k , m_α e c_α são apresentados através da Tabela 2 e Tabela 4, para polarização horizontal, e Tabela 3 e Tabela 5, para polarização vertical, como coeficientes empíricos para obtenção dos valores de k e α nas respectivas polarizações, os quais serão representados, respectivamente, por α_H (ou α_V) e K_H (ou K_V).

Tabela 2 - Coeficientes de K para Polarização Horizontal

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098		
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354	-0,18961	0,71147
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Fonte: ITU-R P.838-3, 2005.

Tabela 3 - Coeficientes de K para Polarização Vertical

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	-0,56934	0,81061		
2	-3,44965	-0,22911	0,51059	-0,16398	0,63297
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	-0,50167	1,07319	0,27195		

Fonte: ITU-R P.838-3, 2005.

Tabela 4 - Coeficientes de α para Polarização Horizontal

i	a_i	b_i	c_i	m_α	c_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187		
2	0,29591	0,77564	0,19822	0,67849	-1,95537
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Fonte: ITU-R P.838-3, 2005.

Tabela 5 - Coeficientes de α para Polarização Vertical

i	a_i	b_i	c_i	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284		
2	0,56727	0,95545	0,54039	-0,053739	0,83433
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Fonte: ITU-R P.838-3, 2005.

Considerando o ângulo de elevação da estação terrena igual a 50° e uma taxa pluviométrica fixa em 100 mm/h, tem-se o comportamento na Figura 3 da variação do fator de atenuação (γ_R) em função da frequência. Pode-se constatar que este valor aumenta, significativamente, a partir dos 10 GHz.

Verifica-se a dificuldade de operação em frequências mais elevadas, como a Ku e principalmente Ka, devido a atenuação ter um acréscimo de forma exponencial conforme o aumento da frequência. E abaixo dos 10 GHz mantém valores não significativos, por esse motivo, países tropicais com altos índices de precipitação, operam satélites preferencialmente em banda C.

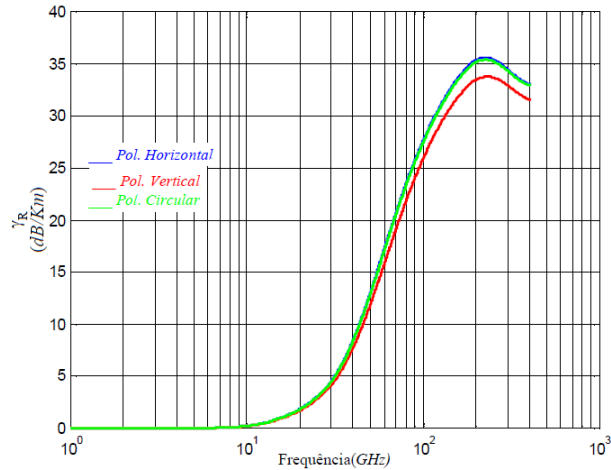


Figura 3 - Fator de atenuação em função da frequência
Fonte: MARINS, 2004

2.2.4 Atenuação por Chuva a partir da Taxa de Precipitação

Os procedimentos a seguir, baseados na Recomendação ITU-R P.618-11, fornecem uma estimativa da estatística de longo prazo da atenuação por chuva de enlaces por satélite de determinado local, para frequências de até 55 GHz. Os seguintes parâmetros são necessários:

$R_{0,01}$: Taxa de precipitação pluviométrica pontual para o local, para 0,01% da média anual (mm/h);

h_s : Altitude da estação terrena acima do nível do mar (km);

θ : Ângulo de elevação da antena (graus);

φ : Latitude da estação terrena (graus);

f : Frequência (GHz).

A análise do percurso da onda dentro da célula de chuva está ilustrada na Figura 4, que apresenta as principais dimensões a serem analisadas no enlace.

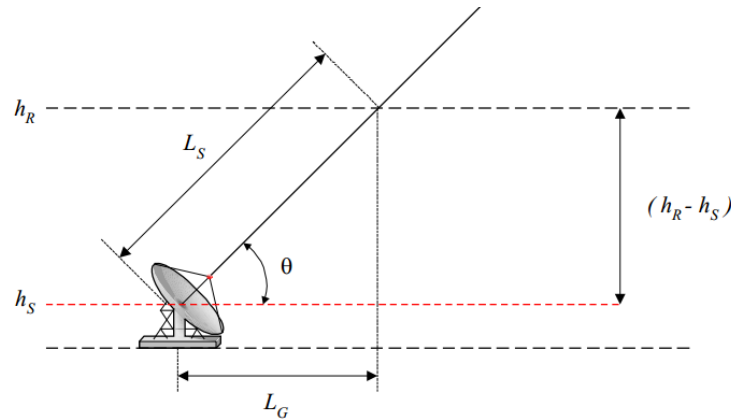


Figura 4 - Esquemática do enlace entre a estação terrestre e a estação orbital
Fonte: MARINS, 2004.

A altura da chuva pode ser calculada através da recomendação ITU-R P.839-4, 2013. Estes dados também podem ser obtidos de forma tabelada pela ITU. Porém, para o Brasil existe um estudo feito pelo Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (CETUC - PUC/RJ), que descreve o cálculo da altura da chuva, através da Equação (19) (MARINS,2004):

$$h_R = 3,8 * [1 + e^{(-0,1 * R_{0,01})}] \quad (19)$$

Através da Recomendação ITU-R P.618-11 pode-se determinar a dimensão L_S , considerando o ângulo de elevação $\theta < 5^\circ$ ou $\theta > 5^\circ$. No entanto, neste trabalho consideraremos somente valores de $\theta > 5^\circ$, pois é a condição típica de operação dos enlaces de transmissões via satélite, levando-se em conta os Geoestacionários. Logo, para este caso, teremos L_S como mostrado na Equação (20),

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen}(\theta)} \quad [\text{km}] \quad (20)$$

onde h_S é a altura da estação terrestre com relação ao nível do mar.

A dimensão da projeção horizontal, L_G , pode ser calculada através da Equação (21).

$$L_G = L_S * \cos(\theta) \quad [\text{km}] \quad (21)$$

Pode-se obter a taxa de precipitação pluviométrica, $R_{0,01}$, excedida por 0,01% da média anual através de uma fonte de dados local. Caso esta estatística de longa duração não puder ser obtida desta forma, uma estimativa pode ser obtida a partir dos mapas de taxa de precipitação pluviométrica apresentados na Recomendação ITU-R P.837-6, 2012.

Usando o fator de atenuação apresentado na Equação (14), pode-se calcular a atenuação causada por um dado *link*, se a distância efetiva percorrida pela onda, sob condições de chuva, for previamente calculada (MARINS,2004). Esta previsão de atenuação é apresentada na Equação (22),

$$A_{0,01} = \gamma_R * L_E \quad [dB/km] \quad (22)$$

onde $A_{0,01}$ é a previsão de atenuação excedida para 0,01% da média anual da taxa pluviométrica e L_E é o comprimento efetivo percorrido pela onda, dentro da condição de chuva.

Para o cálculo do comprimento efetivo percorrido pela onda, L_E , (ITU-R P.618-3, 2013), utiliza-se a Equação (23),

$$L_E = L_R * v_{0,01} \quad [km] \quad (23)$$

onde $v_{0,01}$ é fator de ajuste vertical para 0,01% e pode ser obtido através da Equação (24),

$$v_{0,01} = 1/1 + \sqrt{\text{sen}(\theta)} * \left(31 * \left(1 - e^{-\left(\theta/(1+x)\right)} \right) * \frac{\sqrt{L_R * \gamma_R}}{f^2} - 0,45 \right) \quad (24)$$

o valor de L_R é calculado em função do parâmetro dado na Equação (25):

$$\zeta = \tan^{-1} * \left(\frac{h_R - h_S}{L_G * r_{0,01}} \right) \quad [grau] \quad (25)$$

Para $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G * r_{0,01}}{\cos(\theta)} \quad [km] \quad (26)$$

Para $\zeta < \theta$,

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen}(\theta)} \quad [km] \quad (27)$$

O valor de x deve ser estipulado seguindo o seguinte critério: Se o módulo da latitude da estação terrena, φ , for menor que 36° , tem-se

$$x = 36 - |\varphi| \quad [graus] \quad (28)$$

Por outro lado, se $|\varphi| \geq 36^\circ$, x deve assumir o valor zero.

2.3 EFEITOS DO RUÍDO NA RECEPÇÃO DE SINAIS

O estabelecimento do enlace de comunicação entre um satélite e as estações terrenas é baseado nos seguintes requisitos (BAPTISTA, FILHO, MARINS, 2012):

- A potência recebida deve ser maior que a sensibilidade do receptor;
- A relação sinal/ruído do sinal recebido deve estar de acordo com os requisitos de taxa de erro de bit (BER).

Estes fatores dependem do tipo de sistema de transmissão utilizado (analógico ou digital) e o tipo de modulação empregada. O desempenho do sistema de comunicação dependerá do nível de ruído ao qual o sistema estará exposto. O fator limitante e crítico em um sistema de comunicação via satélite é o estabelecimento do enlace de *downlink* por meio da satisfação dos requisitos de potência recebida e da relação sinal/ruído. Enquanto no *uplink* existe a disponibilidade de aumento tanto do diâmetro da antena transmissora (G_T), como da potência transmitida (P_T), no *downlink* existe a limitação tanto na potência transmitida (P_T) pelo satélite, como no ganho da antena transmissora (G_T) devido à sua limitação de tamanho. A seguir será ilustrado o efeito do ruído, considerando a potência do sinal transmitido e as fontes de ruído no enlace de *downlink*.

A potência de ruído total de um sistema é especificada por meio de sua temperatura de ruído (T_S). As principais fontes que contribuem para o ruído são (NASCIMENTO, 2010):

- Ruído proveniente da antena (T_A);
- Ruído proveniente das conexões entre antena e cabo (T_C);
- Ruído do receptor (T_R).

A temperatura de ruído proveniente da antena, em um sistema, é dado por (PROTZEKa, 2001):

$$T_A = \frac{N_A}{k * B} \quad [\text{K}] \quad (29)$$

N_A é a potência de ruído gerado na antena [W], k a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) e B a largura de banda [Hz].

O ruído da antena é proveniente de seu grau de elevação e de energias de fontes indesejadas que não são a fonte transmissora de sinal, como o sol, ruído galáctico, atmosfera e outras fontes transmissoras. Desta forma, o ruído dependerá das características de cada fonte. A Figura 5 ilustra o comportamento de uma antena operando em banda C, sob diferentes graus de elevação (MARINS, 2004).

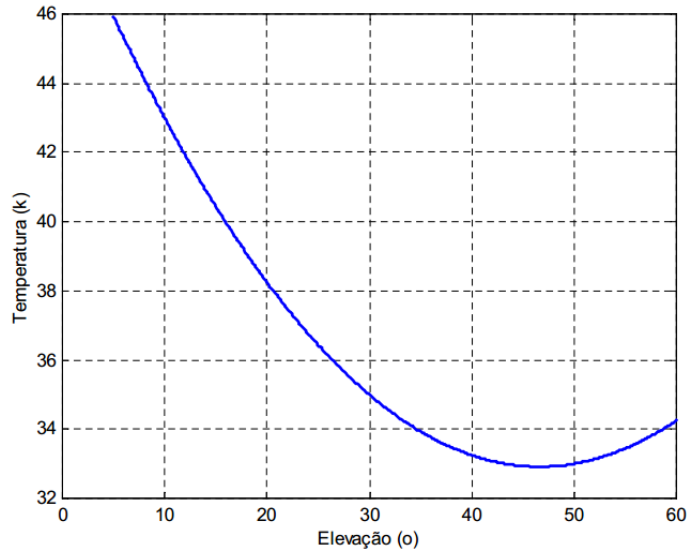


Figura 5 - Temperatura de ruído da antena em função do grau de elevação
Fonte: MARINS, 2004.

O ruído proveniente do cabo que interliga a antena ao receptor (T_C), pode ser considerado como uma fonte de ruído que amplifica o ruído proveniente da antena, assim a temperatura de ruído é dada pela Equação (30) (RIBEIRO, 2008),

$$T_C = 290(L - 1) \text{ [K]} \quad (30)$$

onde L é o valor das perdas do cabo coaxial, em valores adimensionais.

Por outro lado, a temperatura de ruído do receptor é dada por (RIBEIRO, 2008):

$$T_R = T_{rLNA} + \frac{T_m}{G_{rLNA}} + \frac{T_{iLNA}}{G_{rf}G_m} \quad (31)$$

Com T_R sendo a temperatura de ruído do receptor [K], T_{rLNA} a temperatura de ruído do LNA em [K], G_{rLNA} o ganho do LNA, T_m a temperatura de ruído do oscilador local [K], G_m o ganho do oscilador local e T_{iLNA} é a temperatura de ruído do filtro de frequência intermediária [K].

A temperatura de ruído do sistema (T_S) pode ser considerada como a soma da temperatura de ruído da antena, do receptor e acrescentando as perdas do conector entre antena e o receptor,

$$T_S = T_A + T_C + T_R \quad (32)$$

onde T_S é a temperatura de ruído do sistema [K].

A relação sinal-ruído, ou (S/N) de *downlink* é dado por:

$$\frac{S}{N} = P_T G_T \left(\frac{G_R}{T_S} \right) \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \frac{1}{L} \frac{1}{k B} \quad (33)$$

Onde P_T é a potência transmitida, G_T o ganho da antena transmissora, G_R o ganho da antena receptora, T_S a temperatura de ruído do sistema [K], λ o comprimento de onda [m], d a distância entre o satélite e a estação terrena, k a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), B a largura de banda [Hz] e L o valor das perdas em unidades adimensionais. A relação (G_R/T_S) é também conhecida como figura de mérito do receptor.

2.4 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE MULTIFEIXES

Com espectros de frequências abaixo dos 10 GHz congestionados, as bandas Ku e Ka estão sendo exploradas para fornecer opções para novos serviços; em especial esta última, que tem se tornado cada vez mais popular para a comunicação por satélite. A maior largura de banda na Banda Ka permite uma melhor adaptação da crescente demanda por capacidade. Em adição à utilização de mais recursos, uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis será chave para um bom desenvolvimento dos serviços de comunicação via satélite. Novos conceitos de configurações de antenas permitem um esquema de reutilização de frequência e, portanto, um uso maior e eficiente do recurso mais raro em comunicação via satélite, a largura da faixa de frequência.

Até agora, a maioria das transmissões por satélite, como a televisão, usam a banda Ku. Este sistema consiste em um grande feixe que cobre, por exemplo, todo um continente. Porém com um novo sistema de feixes diretivos denominados *Spot Beams* ou Multifeixes, utilizam-se vários feixes individuais, os quais dividem a área de

cobertura como se fossem pequenas células com diâmetro da ordem de 500 km, fazendo um isolamento espacial e geográfico entre as diferentes células (BAPTISTA, MARINS, 2012). Esta tecnologia de feixes diretivos permite reutilizar frequências (compartilhamento de frequência) com outros feixes, e assim, maximizar o uso de banda. Em vez de um grande feixe, há, por exemplo 16 feixes individuais, cada um deles diferente dos outros. Isto permite ampliar em muitas vezes a capacidade de largura de banda em relação aos sistemas em Banda Ku.

2.4.1 Modelo do Sistema Multifeixes

Neste estudo, considera-se um sistema de comunicações por satélite, que emprega uma antena de satélite com U feixes ativos e serve N usuários separados geograficamente, onde $N \gg U$. Na Figura 6 está ilustrada a cobertura do sistema de satélite multifeixes. Assume-se uma rede banda larga de comunicação via satélite que opera em altas frequências (20 GHz e acima), onde os terminais receptores dos usuários são normalmente fixos (CHOI, 2002). O satélite multifeixes é analisado em um estado estável e a taxa de tráfego de entrada, com base nas restrições das condições do canal e qualidade do serviço (QoS) serão ajustados com base no controle de congestionamento para solicitar o número de feixes ativos (KWANGJAE, 2005), (ARAVANIS, 2015). Além disso, as condições do canal são assumidas como sendo quase-estáticas, com atenuação de sinal constante durante o período de interesse, pois o tempo de processamento e transmissão do pacotes de informação são, em geral, muito mais curto do que o tempo de coerência de atenuação do sinal, devido à chuva, que é o da ordem de minutos ou horas (CHOI, 2005), (NEELY, 2003), (KWANGJAE, 2005).

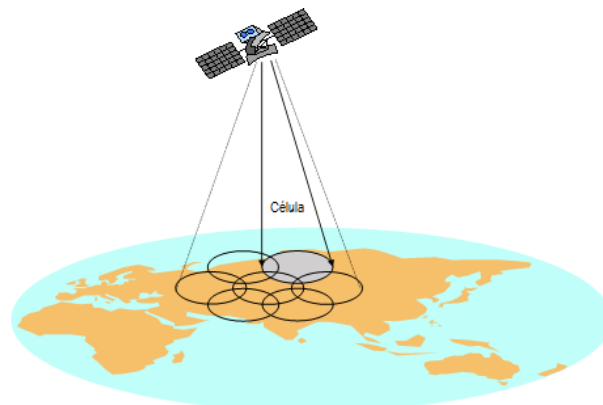


Figura 6 – Sistema de Cobertura de um satélite multifeixe
Fonte: O autor.

Na Figura 7, uma vista esquemática do sistema multifeixe do satélite está ilustrada. Neste esquema, cada alimentação da antena de feixe múltiplo é alimentado pelos seus próprios tubos amplificadores de onda (TWT), o que resulta numa limitação de potência para cada feixe (CHOI, 2005). A comutação do sinal é aplicada na alimentação da antena (a atual técnica de comutação pode ser tão rápida quanto milissegundos), para alimentar dezenas de feixes ativos de uma antena de múltiplos feixes, sobre bandas de microondas.

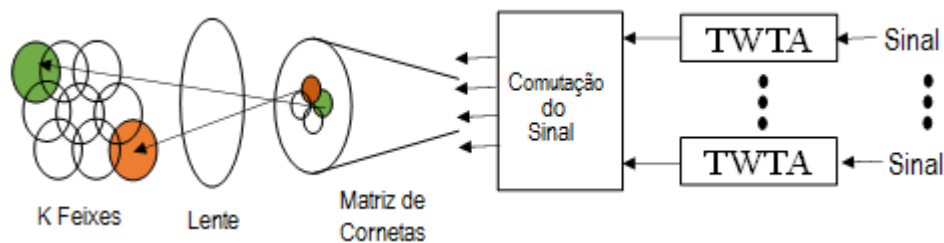


Figura 7- Esquemático do Sistema de Satélite Multifeixes
Fonte: O autor.

Em um sistema de satélite multifeixes, múltiplos sinais são transmitidos simultaneamente pela matriz da antena multifeixe. Cada feixe está equipado com um transmissor e transporta um sinal apenas para esse feixe. O tamanho mínimo de célula é dado pelo limite da área de cobertura, que é definido pelo lóbulo principal da largura de feixe. Assim, para uma antena de transmissão de diâmetro D , comprimento de onda λ , e altitude do satélite L , o tamanho mínimo da célula em função do limite de difração é dado por $\lambda L/D$ (CHOI, 2005).

2.4.2 Interferência entre os Feixes

De acordo com Baptista, Marins (2012), o compartilhamento de frequências faz com que cada célula funcione como uma sub rede, que comunicam com o satélite de forma independente, operando assim de forma mais racional o recurso de espectro disponível. Deste modo, consegue-se uma melhora da capacidade do sistema. Em geral, esta técnica de utilização dos feixes diretivos em Banda Ka pode prover de 30 a 60 vezes a capacidade dos sistemas de primeira geração em Banda Ku ou C.

Entretanto, ocorre sobreposição entre a cobertura dos feixes, para que não haja uma área não coberta entre eles. Estes feixes adjacentes devem ter frequências diferentes. Sendo que cada feixe próximo ao outro deve usar uma sub frequência, ou

seja, divide-se a faixa de frequência total disponível pela quantidade de reuso necessários. A divisão de frequência não necessariamente precisa ser de forma uniforme, por exemplo, se algum feixe cobre uma determinada área com pouco tráfego de dados, como um deserto ou uma floresta, esta pode ficar com uma menor faixa de frequência em relação a outra área mais populosa. Neste sistema, as antenas podem ser customizadas para ignorar certas partes e prover perfeita cobertura para outras.

Um exemplo didático pode ser visto na Figura 8, onde mostra 20 feixes circulares e 4 diferentes sub bandas.

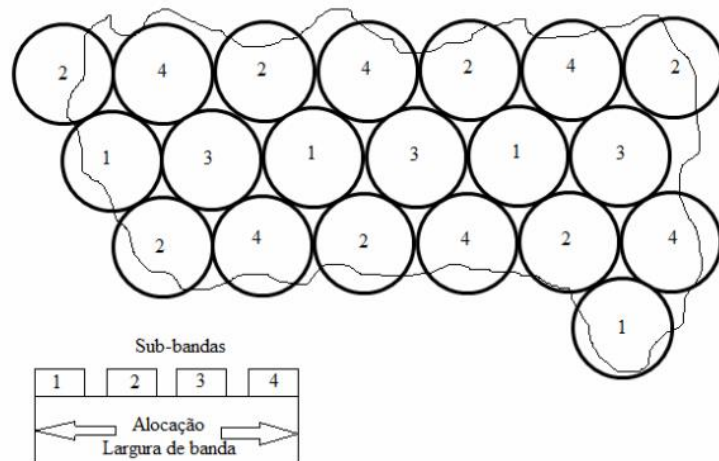


Figura 8 - Cluster de Feixes Diretos
Fonte: BAPTISTA; MARINS (2012).

A interferência de sub bandas é causada pela fuga de potência, a partir de um feixe para outros feixes, que operam na mesma frequência. A interferência de *downlink* é principalmente uma função do número de reutilização e a potência global, devido à força nos lóbulos laterais dos feixes concentrados de interferência das sub bandas, que é recebido num receptor da estação terrena (WANG, 2014), (KILIC, 2010). Neste trabalho, um padrão de feixes simples foi assumido. O padrão de ganho da antena é dado pela equação que mostra a simetria radial posterior (BALANIS, 2005),

$$G_{s,ij}(\theta) = G_s(0^\circ) \left[\frac{2J_1\left(\pi \frac{D_s}{\lambda} \sin\theta\right)}{\pi \frac{D_s}{\lambda} \sin\theta} \right]^2 \quad (34)$$

$$G_{e,ij}(\theta) = G_e(0^\circ) \left[\frac{2J_1\left(\pi \frac{D_e}{\lambda} \sin\theta\right)}{\pi \frac{D_e}{\lambda} \sin\theta} \right]^2 \quad (35)$$

sendo θ o ângulo que se refere a inclinação do satélite, D_s é o diâmetro da antena do transmissor satélite, D_e o diâmetro da antena da estação terrestre do receptor e o símbolo J_1 representa as funções de Bessel da primeira espécie. $G_s(0)$ e $G_e(0)$ que corresponde a um pico de ganho de antena para o satélite e da estação de terreno, respectivamente.

3 ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS

3.1 RELAÇÃO SINAL-INTERFERÊNCIA MAIS RUÍDO

Em um sistema de comunicações por satélite multifeixes, cada feixe i vai transmitir o sinal com a potência transmitida (p_i) na portadora k com o objetivo de superar o mínimo de sinal ruído (SNIR) requeridas pelo usuário na estação terrena. Portanto, o SNIR na área de cobertura do feixe i é dado pela Equação (36) (ARAVANIS, 2015),

$$\delta_i(k) = \frac{p_i(k)}{\sum_{j=1, j \neq i}^U \sum_{k=1}^K c_k h_{ij}^R(k) p_j(k) + \sigma_i^2(k)} \quad (36)$$

sendo h_{ij}^R a atenuação por chuva no canal, σ_i^2 a potência de ruído modelado como ruído branco gaussiano aditivo (AWGN), p_j a soma de todas as potências dos outros feixes, que não o feixe i , e c_k representa a contribuição de cada feixe na mesma frequência para a interferência de sub banda, sendo dado por (BALANIS, 2005),

$$c_k = \begin{cases} 1, & \text{se o canal } k \text{ está em uso na célula } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (37)$$

3.2 ALGORITMOS PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS

Diversas técnicas podem ser utilizadas para a solução do problema de alocação de recursos. A técnica mais simples é denominada Distribuição Uniforme que consiste na divisão igualitária da potência total disponível no satélite entre os feixes (WANG, 2014). A principal limitação desta técnica é o desperdício de potência em regiões com poucos usuários e a ineficácia do combate aos efeitos da chuva (HONG, 2008). Neste contexto, diferentes metodologias vem sendo empregadas na resolução do problema de alocação de recursos.

3.2.1 Busca Exaustiva

Uma possível metodologia para resolução desse problema é a técnica de Busca Exaustiva, que consiste em uma estratégia de força bruta em que todas as possibilidades são avaliadas. Entretanto, a aplicação de tal estratégia é uma solução que necessita de elevado esforço computacional, podendo inviabilizar o seu emprego para o problema estudado neste trabalho (USIDA, 2011). Na alocação de potência baseada em Busca Exaustiva todas as combinações possíveis são testadas até encontrar a solução ótima que satisfaz o número máximo de estações terrenas atendidas e que satisfaça as restrições de potência do satélite. A complexidade computacional será $\mathcal{O}(2^U)$, sendo U é o número total de feixes (LI, SUN, 2006).

3.2.2 Método pela Inversão de Matriz

A inversão da matriz fornece um resultado matematicamente correto, porém com elevado esforço computacional. Dentre alguns dos métodos disponíveis para a inversão de matriz, tem-se o método analítico, o qual será utilizado para comparações de resultados nesse trabalho. O método para inverter uma matriz A é o método analítico o qual usa a matriz adjunta, $Adj(A)$, e o determinante, $\det(A)$. Este cálculo é dado pela Equação (38).

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \times Adj(A) \quad (38)$$

A matriz adjunta é a transposta da matriz de cofatores, em que a matriz de cofatores é formada usando os determinantes da matriz de entrada com os sinais dependendo da posição (ANTON, 2012). De acordo com García (2010), outros métodos que pode-se considerar para inversão de matrizes são os baseados em decomposição, a qual os deixa com uma maior simplicidade tanto analítica quanto computacional. Dentre os métodos de inversão de matriz baseados em decomposição pode-se destacar o LU, Cholesky, QR. E o método de Redução de Gauss-Jordan.

Entretanto, os métodos de inversão de matriz tem um incremento dramático na complexidade, à medida que o tamanho da matriz aumenta. Na inversão de matriz, o número de operações matemáticas são calculadas e o melhor caso para resolver a

alocação de recursos apresenta a complexidade computacional dada por $\mathcal{O}(U^2 \cdot \log U)$ (GOLUB, LOAN, 1996).

3.2.3 Algoritmos Genéticos (NSGA-II)

Os Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos de busca heurística adaptativa, com base nas ideias evolutivas de seleção natural e genética. Como tal, eles representam uma exploração inteligente de uma busca aleatória, usado para resolver problemas de otimização. Embora randomizado, AGs não funcionam de forma aleatória; em vez disso, explora a informação acumulada para focar a busca para uma região de melhor desempenho dentro do espaço de investigação.

As técnicas básicas dos Algoritmos Genéticos são projetadas para simular processos como na natureza, necessários para a evolução, especialmente aqueles que seguem os princípios estabelecidas por Charles Darwin, da "sobrevivência do mais adaptado". Uma vez que na natureza, a concorrência entre os indivíduos por recursos escassos, resulta nos indivíduos mais aptos que dominam sobre os mais fracos.

Cada indivíduo na população representa uma possível solução para um dado problema. O que o AG faz é procurar aquela que seja muito boa, ou a melhor, visando a otimização da função objetivo.

Basicamente, o que um algoritmo genético faz é criar uma população de possíveis respostas para o problema a ser tratado para depois submetê-la ao processo de evolução, constituído pelas seguintes etapas (LUCAS, 2002):

- Avaliação: avalia-se a aptidão das soluções (indivíduos da população), para que se estabeleça quão bom elas respondem ao problema proposto;
- Seleção: indivíduos são selecionados para a reprodução. A probabilidade de uma solução ser selecionada é proporcional à sua aptidão;
- Cruzamento: características das soluções escolhidas são recombinadas, gerando novos indivíduos;
- Mutação: características dos indivíduos resultantes do processo de reprodução são alteradas, acrescentando assim variedade à população;
- Atualização: os indivíduos criados nesta geração são inseridos na população;

- Finalização: verifica se as condições de encerramento da evolução foram atingidas, retornando para a etapa de avaliação em caso negativo e encerrando a execução em caso positivo.

O fluxograma da Figura 9 apresenta o ciclo de execução de um AG.

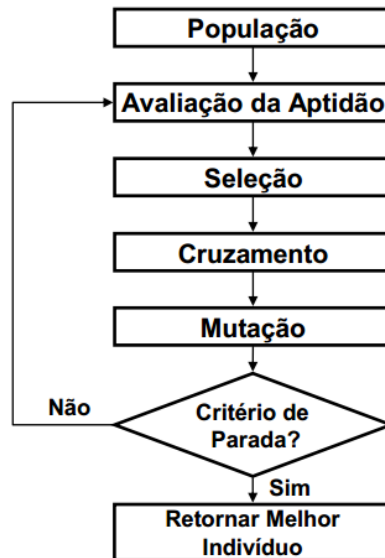


Figura 9 – Fluxograma de Execução do AG
Fonte: USIDA, 2011.

Os AGs têm a capacidade de resolver problemas complexos de uma maneira inteligente. Além disso, eles não são limitados por suposições sobre o espaço de busca, relativas à continuidade, existência de derivadas, etc. Geralmente, buscas em problemas reais são repletas de descontinuidades, ruídos e outros problemas. Métodos que dependam fortemente de restrições de continuidade e existência de derivadas são adequados apenas para problemas de um domínio limitado (USIDA, 2011). Nos procedimentos de otimização para alocação de recursos a complexidade computacional é dada por $\mathcal{O}(S^2 \cdot M)$, em que S é o número de indivíduos da população e M é o número de objetivos (KALYANMOY, et al., 2002).

4 OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA POR ENXAME DE PARTÍCULAS

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A capacidade em termos de taxa de transmissão de cada feixe i dependerá da SNIR do canal, assim, a capacidade do canal de Shannon e considerando a diferença entre o limite teórico, a taxa de transmissão de informação efetiva pode ser definida como (SHANNON, 1948):

$$r_i = \frac{B_i}{m_i} \log(1 + \theta_i \delta_i) \quad (39)$$

sendo $m_i = \log_2 M_i$ a ordem da modulação, θ_i o inverso da diferença entre o teórico e a taxa de informação real e B_i é a largura de banda do sinal. Normalmente, θ_i pode ser aproximada por (SAMPAIO, et al., 2011),

$$\theta_i = - \frac{1.5}{\log(5 \cdot BER_i^{max})} \quad (40)$$

sendo BER_i^{max} a máxima tolerância BER para os usuários da célula coberta pelo feixe i . Por isso, a otimização SNIR baseia-se na definição de limitação de potência mínima (também chamado nível de sensibilidade) assegurando que o sinal transmitido possa ser convenientemente recebido por todos os usuários das estações terrena na célula, enquanto os requisitos de QoS e taxa de transmissão são mantidos. Como consequência, a alocação de potência em sistemas comunicação por satélite multifeixes pode ser visto como um problema de otimização. Assim, denotado δ_i como o SNIR mínimo que é requerido na entrada do decodificador, a fim de obter uma BER_i^{max} e definindo um vetor coluna U-dimensional da potência transmitida $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_k]^T$, o problema da alocação de potência consiste em encontrar um vetor de potência \mathbf{p} que minimiza função custo $J(\mathbf{p})$, que é a soma da potência transmitida por todos os feixes; este problema de otimização pode ser formalmente descrito como,

$$\min J_1(\mathbf{p}) = \min \mathbf{1}^T \mathbf{p} = \min \sum_{i=1}^U \sum_{k=1}^K p_i(k) \quad (41)$$

$$\text{Sujeito a: } \begin{aligned} \delta_i(k) &\geq \delta_i^*(k) \\ \sum_{i=1}^U p_i(k) &\leq P_{avail} \end{aligned}$$

onde $\mathbf{1}^T = [1, \dots, 1]$ é um vetor e $\delta_i^*(k)$ é o mínimo SNIR para atingir um desejado QoS; P_{avail} é o total de potência disponível no satélite. Usando notações matriciais, a Equação (41) pode ser escrita como $[\mathbf{I} - \boldsymbol{\delta}^* \mathbf{H}] \mathbf{p} \geq \mathbf{u}$, onde \mathbf{I} é a matriz identidade, \mathbf{H} é a matriz de interferência normalizada, com os elementos avaliados por $H_{ii} = h_{ii}^R/h_{ij}^R$ para $i \neq j$ e zero para outros casos, assim $u_i = \delta^* \sigma_i^2/\delta_{ii}$, onde há uma versão em escala da potência de ruído. Substituindo a desigualdade pela igualdade, a solução do vetor de otimização da potência pode ser analiticamente obtido através da inversão de matriz $\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \boldsymbol{\delta}^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u}$. No entanto, a inversão da matriz não é procedimento mais indicado devido à sua elevada complexidade computacional (SAMPAIO, et al., 2011). Entretanto, a alocação de potência com base em inversão de matriz pode ser utilizado para verificar a precisão de outros métodos de otimização. Na próxima subseção será apresentada a alocação de potência baseada em PSO, utilizada neste trabalho.

4.2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

No PSO, cada partícula mantém o controle de suas coordenadas no espaço de interesse, que estão associados com a melhor solução que conseguiram alcançar. Outro melhor valor obtido através da versão global do otimizador por enxame de partículas, é o melhor valor global, e sua localização pode ser obtida por qualquer partícula na população. Em cada etapa de iteração, o conceito PSO consiste na mudanças de velocidade de cada partícula na direção local e a posição global. A aceleração é ponderada por um termo aleatório, com números aleatórios distantes sendo gerados para a aceleração na direção local e a locais global. Já b_p e v_p denotam as coordenadas da partícula (posição) e sua correspondente velocidade de vôo (velocidade) em um espaço de busca, respectivamente. Na estratégia do PSO, cada vetor candidato $b_p[t]$, com a dimensão $U \times 1$, é utilizado para o cálculo do vetor velocidade da iteração seguinte (KENNEDY, EBERHART, 1995), (NEDJAH, MOURELLE, 2006):

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_p[t + 1] = & \omega[t] \cdot \mathbf{V}_p[t] + C_1 \mathbf{U}_{p1}[t](\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]) \\ & + C_2 \cdot \mathbf{U}_{p2}[t](\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]) \end{aligned} \quad (42)$$

Onde $\omega[t]$ é o momento de inércia com relação a velocidade anterior; o vetor velocidade tem dimensão K e é dado por $\mathbf{V}_p[t] = [V_{p1}^t, V_{p2}^t, \dots, V_{pK}^t]^T$; U_{p1} e U_{p2} são matrizes diagonais com dimensão K, cujos elementos são variáveis aleatórias com uma distribuição uniforme entre 0 e 1, gerados para a partícula p na iteração $t = 1, 2, \dots, G$; $\mathbf{b}_p^{best}[t]$ é o vetor da melhor posição que a partícula p teve durante a busca (melhor local) e $\mathbf{b}_g^{best}[t]$ é o vetor da melhor posição encontrada na vizinhança da partícula p (melhor global), ambos na iteração t ; C_1 e C_2 são coeficientes de aceleração, sobre as melhores partículas e sobre as melhores posições globais, respectivamente, e influenciam na atualização da velocidade.

Em nosso problema de alocação de potência, a posição da partícula p na iteração t é definida pelo candidato ao vetor potência $\mathbf{b}_p[t] = [b_{p1}^t, b_{p2}^t, \dots, b_{pK}^t]^T$. A posição de cada partícula é atualizada usando o novo vetor velocidade para cada partícula,

$$\mathbf{b}_p[t + 1] = \mathbf{b}_p[t] + \mathbf{V}_p[t + 1], \quad p = 1, \dots, P \quad (43)$$

onde P é o tamanho da população.

Um exemplo didático, de como as partículas se comportam na otimização por PSO, pode ser visto na Figura 10.

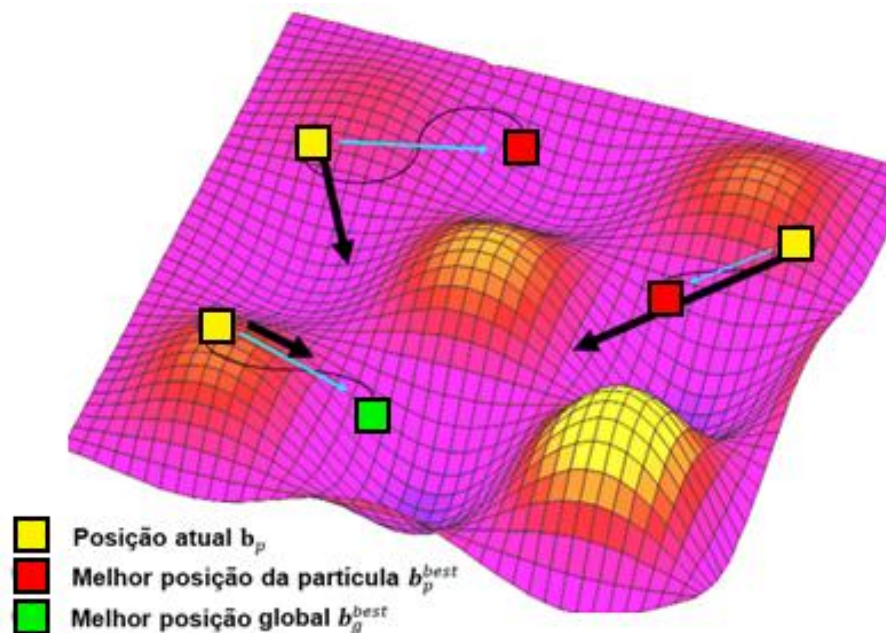


Figura 10 - Movimento das partículas no PSO
Fonte: O autor.

A cor amarela representa a posição atual da partícula, o vermelho representa a melhor posição encontrada individualmente pela partícula, e a cor verde representa a melhor posição global, ou seja a melhor posição encontrada considerando todas as partículas. E é para esta região do melhor global que todas as partículas tendem a ir na próxima geração.

4.2.1 Alocação de Potência por PSO

A seguinte função de maximização de custos pode ser empregada como uma alternativa para otimização de alocação de recursos através de PSO (SAMPAIO, et al., 2011),

$$J_2(\mathbf{p}) = \max_{\mathbf{U}} \frac{1}{U} \sum_{i=1}^K F_i^{th} \left(1 - \frac{p_i}{P_{max}} \right) \quad (44)$$

$$\delta_i \geq \delta_i^*, 0 < p_k^l \leq P_{max}, R^l = R_{min}^l \quad \forall k \in K_l, e \forall l = 1, 2, \dots, L$$

onde L é o número de diferentes grupos de taxas de transmissão permitidas ao sistema, K_l número de usuários no grupo l com taxa de transmissão mínima dada por R_{min}^l . Para os sistemas de taxa única, $F^1 = \dots = F^l = \dots = F^L$. Por fim, a função de limiar da Equação (44) pode ser simplesmente escrita como:

$$F_k^{th} = \begin{cases} 1, & \delta_i \geq \delta^* \\ 0, & \text{outro caso} \end{cases} \quad (45)$$

Onde a SNIR para o usuário i , δ_i é dada pela Equação (36).

O algoritmo do PSO consiste da repetida aplicação da atualização da velocidade e da posição, Equação (42) e (43), respectivamente. O pseudocódigo para o simples objetivo do problema de alocação contínua de potência é apresentado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 - Algoritmo PSO Contínuo para o Problema de Alocação de Potência

Entrada: $\mathcal{P}, \mathcal{G}, \omega, C_1, C_2, V_{max}, R_{min}$; **Saída:** \mathbf{p}^*
início

1. Inicializa a população com $t = 0$
 $\mathbf{B}[0] \sim U[P_{min}; P_{max}]$
 $\mathbf{b}_p^{best}[0] = \mathbf{b}_p[0]$ e $\mathbf{b}_g^{best}[0] = \mathbf{p}_{max}$
 $\mathbf{v}_p[0] = 0$: velocidade inicial nula
2. enquanto $t \leq \mathcal{G}$
 - a. calcula $J(\mathbf{b}_p[t]), \forall \mathbf{b}_p[t] \in \mathbf{B}[t]$, usando a Equação 44;

- b. atualiza a velocidade $\mathbf{v}_p[t]$, $p = 1, \dots, \mathcal{P}$, através da Equação 42;
- c. atualiza as melhores posições;
 para $p = 1, \dots, \mathcal{P}$
 se $J(\mathbf{b}_p[t]) < J(\mathbf{b}_p^{best}[t]) \ \& \ R_p[t] \geq R_{\min}$
 $\mathbf{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$
 senao $\mathbf{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p^{best}[t]$
 fim
 se $\exists \mathbf{b}_p[t] \mid [J(\mathbf{b}_p[t]) < J(\mathbf{b}_g^{best}[t])] \ \& \ R_p[t] \geq R_{\min} \ \& \ [J(\mathbf{b}_p[t]) \leq J(\mathbf{b}_{p'}[t]), \forall p' \neq p]$
 $\mathbf{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$
 senao $\mathbf{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_g^{best}[t]$
- d. Evolui para uma nova população de enxame $\mathbf{B}[t+1]$, usando a Equação 44;
- e. Atribui $t = t + 1$.
- fim
3. $\mathbf{p}^* = \mathbf{b}_g^{best}[\mathcal{G}]$.
- fim

\mathcal{P} : tamanho da população.

$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_p, \dots, \mathbf{b}_{\mathcal{P}}]$ matriz da população de partículas, dimensão $K \times \mathcal{P}$.

\mathcal{G} : número máximo de iterações do enxame.

\mathbf{p}_{\max} : vetor de potência máxima considerando cada classe de usuário.

R_{\min} : taxa de dados mínima, comum a todos os usuários.

A Figura 11 mostra o fluxograma para o algoritmo proposto.

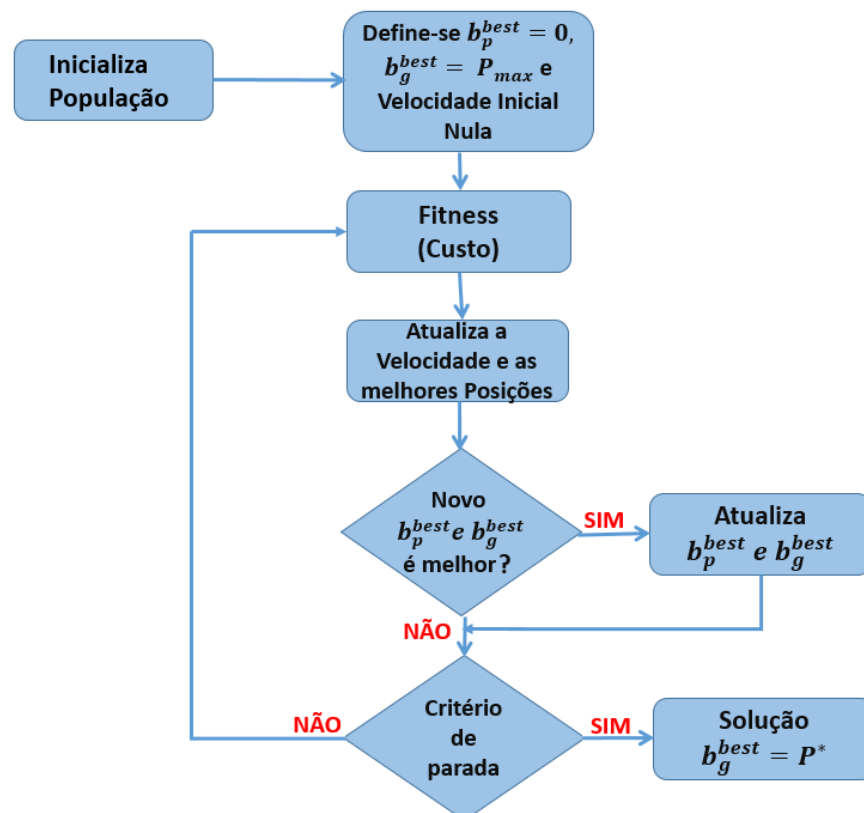


Figura 11 - Fluxograma do algoritmo proposto
 Fonte: O autor.

A qualidade de convergência do algoritmo PSO apresenta variação com as alterações na SNIR (SAMPAIO, et al., 2011). A figura de mérito utilizado como ferramenta para esta análise é a taxa de convergência (RC), que pode ser descrita como a razão entre solução PSO após a iteração t , dividido pela solução após a convergência total, através disso, a solução da otimização é dada pela inversão de matriz. A taxa de convergência (RC) pode ser expressa como:

$$RC[t] = 1 - \left| \frac{J[t] - J[\mathbf{p}^*]}{J[\mathbf{p}^*]} \right| \quad (46)$$

Com $J[t]$ o valor da função custo para iteração t e $J[\mathbf{p}^*]$ o valor da função custo para o valor de potência otimizada.

Finalmente, no algoritmo de alocação de potência PSO, a complexidade computacional baseia-se no número de operações de soma e multiplicação, bem como o número de iterações para obter-se a convergência do algoritmo. Assim, a complexidade computacional do PSO é dada por $\mathcal{O}(U^2)$ (SAMPAIO, 2011).

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação do algoritmo proposto para alocação dinâmica de potência, baseado em PSO. Os algoritmos e todas as simulações foram desenvolvidas no ambiente de programação MATLAB 2015a. Será considerada uma rede hipotética de satélite GEO, o Galaxy 28 (89°W). A antena multifeixe terá 16 feixes, onde 6 dos 16 feixes foram escolhidos para operarem em uma região com condição climática chuvosa e os 10 restantes foram assumidos para uma região com condição de céu claro. A área de cobertura para a rede via satélite, vai de 8,5°S a 34°S em latitude e de 34°W a 59,5°W de longitude. Os usuários das estações terrenas foram assumidos para serem distribuídos uniformemente com separação de 0,25° tanto em latitude quanto em longitude, resultando em 2.601 usuários.

O mapa utilizado para as simulações, em relação à localização dos usuários, as estações terrena, a posição do satélite e o ponto central de cada feixe, pode ser visto na Figura 12.

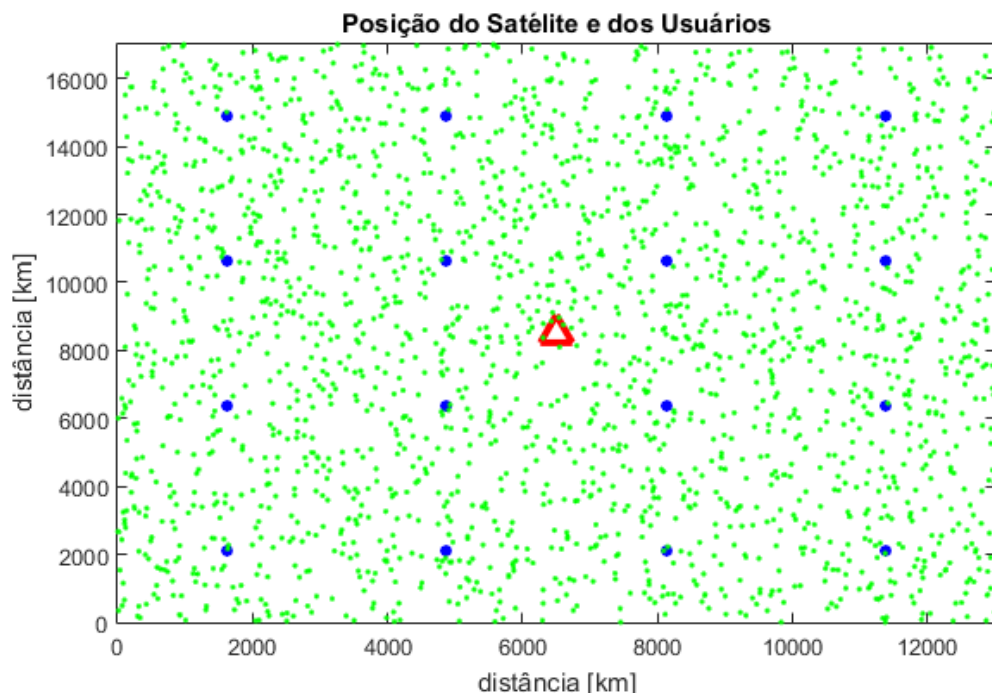


Figura 12 - Mapa da posição dos usuários, do satélite e dos feixes
Fonte: O autor.

Os pontos verdes representam os 2.601 usuários, os 16 pontos azuis referem-se ao centro de foco de cada feixe, e o triângulo vermelho indica a posição do satélite em relação aos usuários.

Para efeitos de simulação utilizou-se os dados da taxa de precipitação do mapa de chuva da ITU-R para o Brasil e os parâmetros k e α , da Equação (14), foram calculados seguindo o formalismo apresentado em DESTOUNIS (2011). O intervalo de tempo entre duas reconfigurações consecutivas da antena multifeixes foi fixado em 30 minutos (CHOI, CHAN, 2002). A rede do satélite foi simulada para a duração entre dois instantes de tempo de reconfiguração, portanto, apenas uma configuração foi implementada.

Um reuso de frequência de fator 4 foi assumido, pois o padrão de reaproveitamento de quatro cores constitui o padrão de reutilização mais simples e prático para uma demonstração didática (EGAMI, 1999). Considerou-se que todos os feixes têm a mesma forma e que se sobrepõem no ponto correspondente a -3 dB da redução de ganho a partir do pico (EGAMI, 1999). As Tabelas 6 e 7 ilustram os valores adotados para o sistema de comunicação por satélite multifeixes e os parâmetros do PSO, respectivamente. Os parâmetros de entrada do PSO são previamente otimizados de acordo com metodologia proposta em (SAMPAIO, et al., 2011)

Tabela 6 - Parâmetros do sistema via satélite multifeixes

Variável	Valor
$G_S(\mathbf{0})$ – Pico de ganho da antena do satélite	47,2 dBi
$G_e(\mathbf{0})$ – Pico de ganho da antena da estação terrena	25 dBi
D_S – Diâmetro da antena transmissora no satélite	1,30 m
D_e – Diâmetro da antena na estação terrena	0,70 m
f - Frequência	20 GHz (Banda Ka)
B_i – Largura de banda da portadora	36 MHz
σ_i^2 – Potência do ruído	-102 dBm
P_{avail} – Potência disponível no satélite	200 W
Modulação	QPSK
BER_i^{max} – Máximo BER tolerado	10^{-6}
δ_i^* - Valor mínimo do SNIR no receptor	12 dB

Fonte: O autor.

Tabela 7 - Parâmetros do PSO

Variável	Valor
P – Número de partículas	$P = U + 2$
C_1 – Aceleração da partícula	1,8
C_2 – Aceleração global	2
p_{max} – Potência máxima	30 W
p_{min} – Potência mínima	$p_{max} \times 10^{-12}$
ω – Peso inercial	$\omega[t] = (\omega_i - \omega_f) \left(\frac{\varphi - t}{\varphi} \right)^m + \omega_f$
m – Índice não linear	[0,6; 1,4]

φ – Número de iterações	1000
ω_i – Peso inicial de inércia	1
ω_f – Peso final de inércia	0,4
V_{max} – Velocidade máxima	$V_{max} = 0,2(p_{max} - p_{min})$
V_{min} – Velocidade mínima	$V_{min} = -V_{max}$

Fonte: O autor.

A Figura 13 mostra a evolução da soma da potência transmitida pelos feixes, para o número de iterações, considerando uma condição climática de céu claro e outra chuvosa, para o algoritmo de alocação de potência PSO. Além disso, as linhas horizontais pontilhadas representam a soma da potência transmitida pelos feixes, obtida através do procedimento de inversão de matriz. Este procedimento foi implantado para validar os resultados numéricos. O objetivo é ilustrar a convergência da soma da potência transmitida pelos feixes, obtida com o algoritmo de alocação de potência PSO com a soma da potência transmitida pelos feixes, obtida através de inversão de matriz, a qual apresenta uma elevada complexidade de desempenho.

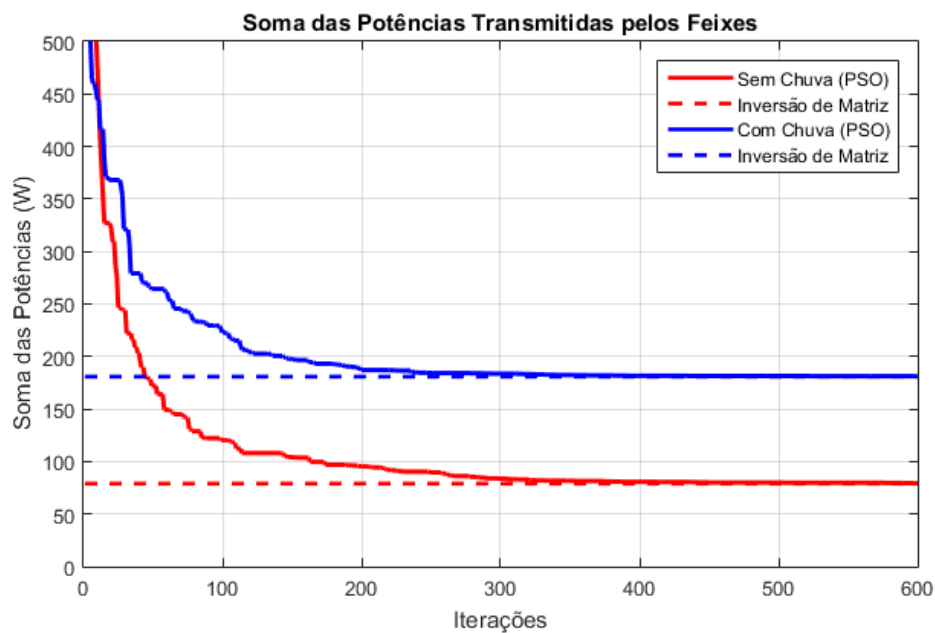


Figura 13 - Evolução da soma das potências transmitidas pelos feixes em relação ao número de iterações

Pode-se observar na Figura 13 que a soma da potência transmitida pelos feixes atinge o valor alvo (linha tracejada horizontal) conforme aumenta o número de iterações do algoritmo para a alocação de potência por PSO, considerando ambas as condições climáticas, sem chuva e com chuva. Os resultados mostraram que a

mudança de céu claro para chuvoso acarreta num intenso aumento da potência transmitida (de 79,01W para 180,90W, respectivamente). Neste caso, a variação da potência transmitida de céu claro para o céu chuvoso é de aproximadamente 56%, que está de acordo com a variação de 52% apresentada em (DESTOUNIS, 2011).

Este efeito está diretamente relacionado com a atenuação devido à chuva, que resulta no aumento da potência transmitida pelos feixes com chuva. O SNIR mínimo estabelecido para todos os usuários das estações terrena é igual. E se um equilíbrio perfeito de potência, com uma condição climática ideal sem chuva for assumida, poderia ser demonstrado que o máximo SNIR é limitado pelos parâmetros da estação terrena (por exemplo, ganho da antena). No entanto, quando a atenuação por chuva é considerada, a potência transmitida é limitada pela potência disponível no satélite.

A principal vantagem da alocação dinâmica de potência é a diminuição da potência transmitida para os feixes operando em regiões sem chuva, com a garantia do SNIR mínimo no receptor de cada usuário das estações terrenas e aumentando a disponibilidade de potência para os feixes com chuva.

A Figura 14 ilustra a alocação da distribuição de potência em cada feixe para o algoritmo de alocação de potência PSO e alocação de potência uniforme, onde a potência transmitida em cada feixe é a potência total dividida pelo número de feixes ($p_i = p_{total}/U$). Nesta simulação assumiu-se os feixes (2, 6, 11, 12, 14, 15) com condição climática chuvosa, e suas respectivas atenuações em dB foram (5,79; 7,95; 7,68; 5,43; 6,60; 4,63). Foi considerada uma taxa pluviométrica variando entre 50mm/h à 100mm/h, conforme mapa de chuvas para o Brasil da Recomendação ITU P.837-6.

Levando-se em consideração estas taxas pluviométricas para o Brasil, foram calculadas as atenuações mostradas logo acima, através de um algoritmo secundário, desenvolvido com base nas Recomendações ITU P.618-1 e Recomendação ITU P.838-3.

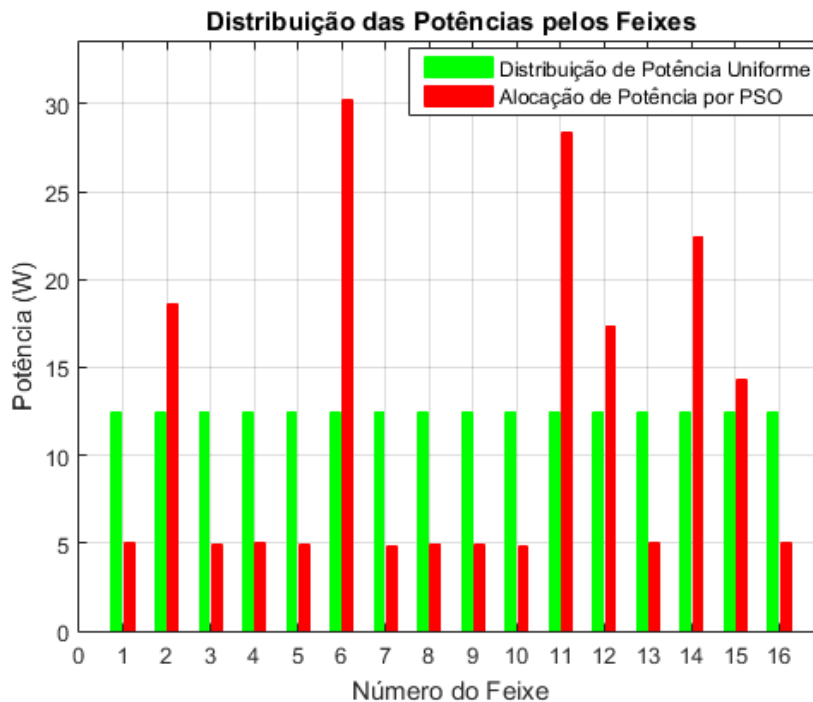


Figura 14 - Comparação entre alocação estática e dinâmica de potência
Fonte: O autor.

Pode-se observar na Figura 14 a potência transmitida pelos feixes, alocada de forma dinâmica através do PSO, e a alocação de potência distribuída de forma uniforme. A intensidade da potência transmitida por cada feixe é ajustada diretamente a partir do TWTA, considerando o valor mínimo do SNIR para o usuário da estação terrestre coberto por este feixe.

Para os feixes em condição climática de tempo bom, a alocação de potência recebida pelo feixe, através da alocação de potência uniforme, é maior do que a potência transmitida pelo feixe com alocação de potência através do PSO; portanto, há desperdício de potência com a alocação uniforme. Por outro lado, para os feixes com chuva, a potência transmitida pelo feixe através da alocação de potência uniforme, é menor do que a potência transmitida pelo feixe com a alocação de potência por PSO; portanto, considerando feixes com chuva e alocação uniforme, não há potência suficiente para alcançar o valor mínimo do SNIR para o usuário da estação terrestre coberto por estes feixes. Em resumo, os resultados numéricos para a alocação de potência por PSO, considerando diferentes situações climáticas (tempo bom e chuva) revelaram a viabilidade da implantação do algoritmo PSO para resolver um problema de alocação de potência. Além disso, a alocação de potência por PSO é mais eficaz para resolver a alocação de potência em cada feixe, quando comparado com a alocação de potência uniforme.

A Figura 15 mostra a taxa de evolução da convergência em função do número de iterações, para o algoritmo de alocação de potência PSO, considerando tempo bom e tempo chuvoso. O teste de convergência é avaliado através do cálculo da porcentagem média de sucesso e foi tomado mais de 50 execuções para alcançar o ótimo global, e considerando um número fixo de iterações G . Um teste de convergência é considerado 100% bem sucedido se a seguinte relação se mantém:

$$|J|G| - J|p^*|| < \epsilon_1 J|p^*| + \epsilon_2 \quad (42)$$

Onde $J|p^*|$ é o valor ótimo global da função objetivo considerada; $J|G|$ é o valor ótimo da função objetivo obtido pelo algoritmo depois de $G = 700$ iterações, e ϵ_1 e ϵ_2 são os coeficientes de precisão dados por $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 10^{-2}$.

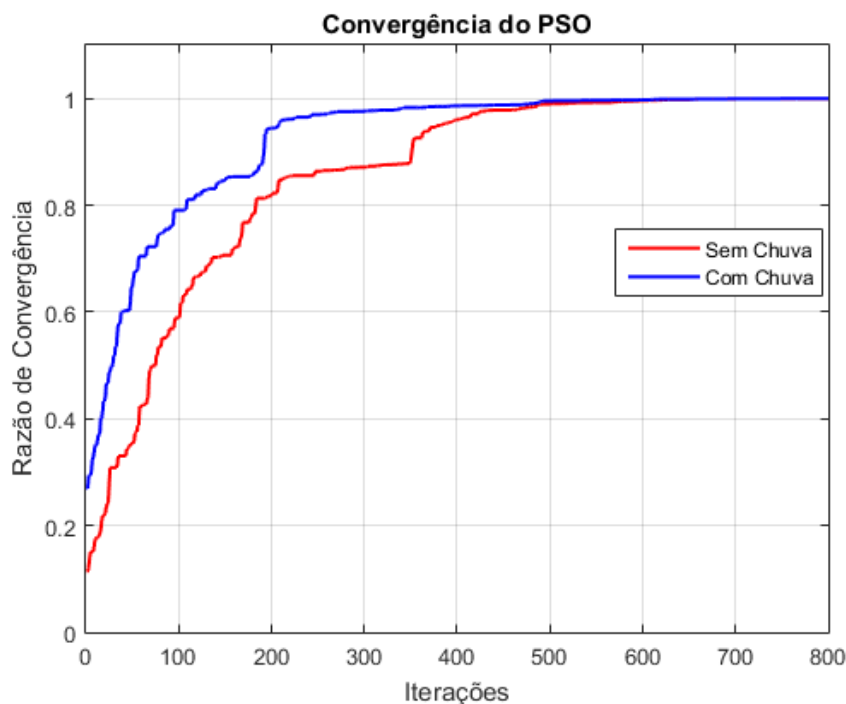


Figura 15 - Taxa de evolução da convergência em função da iteração
Fonte: O autor.

Pode-se observar na Figura 15 o aumento da taxa de convergência, para uma condição de céu limpo e céu chuvoso, conforme aumenta o número de iterações. Para ambas as situações do clima, há a convergência total do algoritmo de alocação de potência PSO. A diferença entre as curvas de convergência, para o problema de alocação de potência por PSO, é influenciada pelo nível de potência alocada, quanto

maior o nível de potência alocada, maior é a velocidade da taxa de convergência (ABRÃO, et al., 2011). Portanto, a relação de convergência para a situação com chuva apresenta maior velocidade de convergência do que a relação de convergência de céu claro, e este fato está diretamente relacionado com o elevado nível de potência atribuída para a situação com chuva.

A Figura 16 mostra a complexidade computacional para regimes de alocação de potência em, busca exaustiva (ES), inversão de matriz (MI), NSGA-II e PSO. Esta análise considera 70 feixes, de acordo com a previsão para o número de feixes utilizados na próxima geração de satélites de elevada capacidade (ARAVANIS, 2015). A complexidade computacional de alocação de potência com base em NSGA-II é independente do número de feixes, além disso, considera-se um tamanho de população de 6000 para 1 objetivo de otimização (potência), e os seguintes parâmetros utilizados em ARAVANIS (2015). Por outro lado, os métodos ES, MI e PSO dependem apenas do número de feixes.

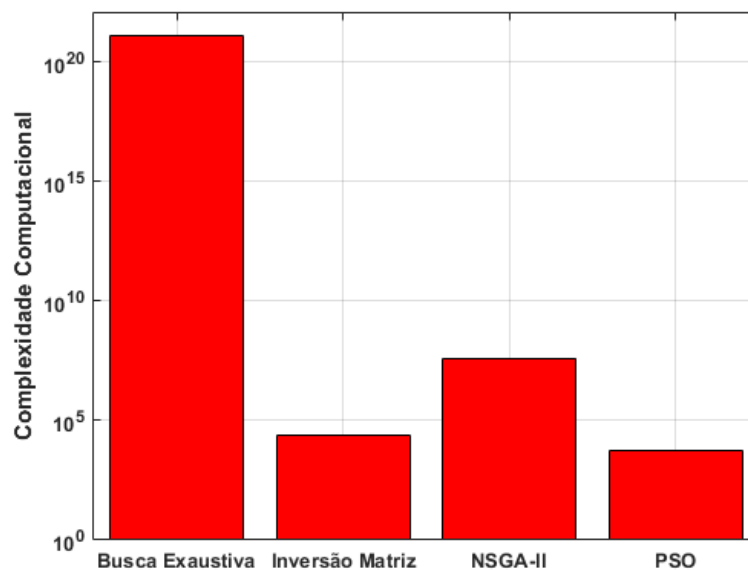


Figura 16 – Comparação da complexidade computacional algorítmica
 Fonte: O autor.

Pode-se observar na Figura 16 que o esquema de alocação de potência com base em busca exaustiva (ES) apresenta a maior complexidade computacional, de modo que os algoritmos de alocação de potência baseados neste tipo de otimização não são muito atraentes. O esquema de alocação de potência com base em NSGA-II apresenta a segunda maior complexidade computacional. No entanto, vale a pena

notar que NSGA-II é um procedimento de otimização multi objetivo, mais sofisticado que ES, MI, e PSO, assim ele poderia ser muito apropriado para resolver situações em que são necessários outros requisitos de QoS, por exemplo, quando níveis distintos de BER são estabelecidos para cada feixe. A próxima maior complexidade computacional é apresentada pelo método de alocação de potência com base na inversão de matriz, que é da ordem de aproximadamente 10^4 e 3 ordens de grandeza mais baixa do que a complexidade computacional apresentada por NSGA-II (10^7). Portanto, a inversão de matriz é um método matemático importante para verificar a precisão e a confiança dos outros métodos baseados em meta-heurísticas, devido a sua precisão e esforço computacional. Finalmente, o regime de alocação de potência com base em PSO apresenta a menor complexidade computacional, da ordem de aproximadamente 10^3 , o que é uma economia significativa de recursos computacionais.

A Figura 17 mostra o aumento da complexidade computacional de acordo com a quantidade de feixes, para a busca exaustiva (ES), inversão de matriz (MI), NSGA-II e método de alocação de potência por PSO. Esta análise baseia-se nos mesmos parâmetros utilizados para obter a Figura 16, para o método de alocação de potência NSGA-II.

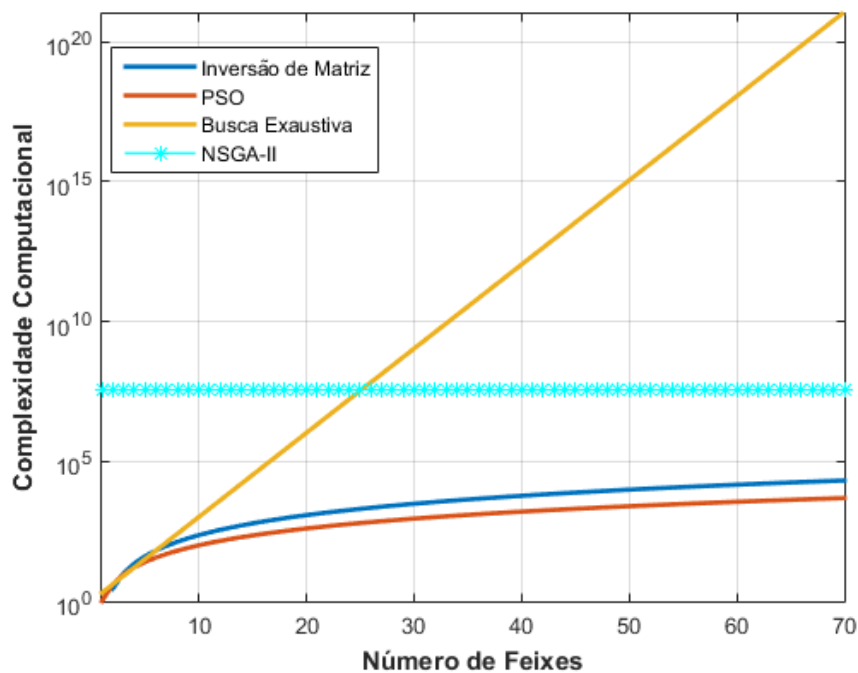


Figura 17 - Complexidade computacional de acordo o número de feixes
 Fonte: O autor.

Pode-se observar na Figura 17 o aumento da complexidade computacional para busca exaustiva (ES), inversão de matriz (MI) e o método de alocação de potência por PSO, conforme aumenta o número dos feixes. Por outro lado, o método de alocação de potência NSGA-II apresenta uma complexidade computacional constante, pois sua complexidade é independente do número de feixes. A complexidade computacional do ES, MI e o método de alocação de potência por PSO é aproximadamente o mesmo até 5 feixes, porém após este ponto cada método de alocação de potência irá apresentar uma tendência ao aumento da complexidade computacional. A busca exaustiva apresenta complexidade computacional inaceitável após 25 feixes, mesmo quando este é comparado com a alocação de potência NSGA-II. Por outro lado, a alocação de potência PSO apresenta uma complexidade computacional menor em comparação com a busca exaustiva e inversão de matriz.

Para uma melhor visualização e comparação de resultados, pode-se ver na Figura 18, uma visão aproximada dos 16 feixes, da complexidade computacional entre a Inversão de Matriz e o PSO.

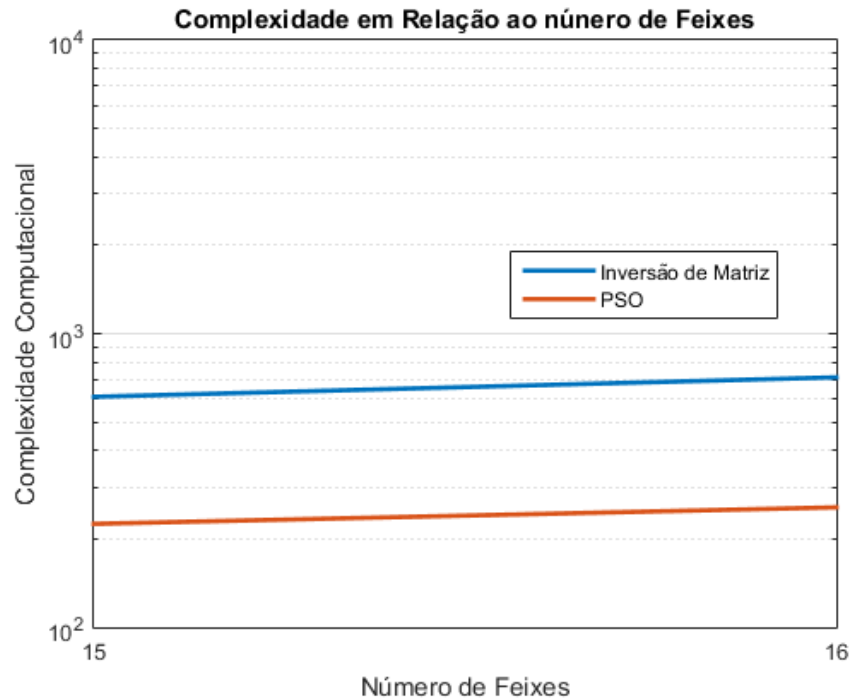


Figura 18 - Complexidade em relação ao número de feixes
Fonte: O autor.

Considerando 16 feixes, a variação de complexidade entre inversão de matriz ($\theta = 709$) e o método de alocação de potência por PSO ($\theta = 709$), é de

aproximadamente 63,5%. A alocação de potência por PSO apresenta alto desempenho em complexidade computacional quando comparado com a busca exaustiva (ES), inversão de matriz (MI) e NSGA-II.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto a alocação de potência, com base na otimização por enxame de partículas (PSO), entre os feixes de um satélite multifeixes, considerando a interferência multifeixes e diferentes condições do canal para cada feixe, devido a atenuação por chuva. Em comunicações por satélite multifeixes, a capacidade alocada para cada feixe é determinada não só pela potência atribuída ao feixe, mas também pela potência alocada a outros feixes, de acordo com a interferência entre os múltiplos feixes, as diferentes condições do canal e a capacidade do canal.

Os resultados numéricos demonstraram a precisão e a viabilidade da alocação de potência por PSO, considerando diferentes situações climáticas (céu claro e chuva) e sua melhor eficiência para a distribuição da melhor alocação de potência em cada feixe, quando comparado com alocação de potência uniforme. Além disso, uma vantagem importante do método de alocação proposto, é a capacidade de diminuir a potência transmitida para os feixes sem chuva, garantindo um SNIR mínimo para o receptor do usuário de cada estação terrestre, e aumentando a disponibilidade de potência para as feixes com chuva.

A complexidade computacional da alocação de potência por PSO proposta é menor do que a complexidade computacional de métodos com base em busca exaustiva (ES), inversão de matriz (MI) e (NSGA-II). Neste sentido, a alocação de potência PSO apresenta alto desempenho e com complexidade computacional aceitável, quando comparado com outros métodos de alocação de potência.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, Taufik; SAMPAIO, Lucas D. H.; ANGÉLICO, Bruno A.; LIMA, Moisés F.; PROENÇA, Mario L. J.; JESZENSKY, Paul J. **Multiple Access Wireless Networks Optimization via Heuristic Search Algorithms**. Search Algorithms, 1st ed. Vienna, Austria: Intech, vol. 1, pp. 261–298. Abr. 2011.

ANTON, Howard; RORRES, Chris. **Álgebra Linear Com Aplicações**. 10ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ARAVANIS, Alexis I.; SHANKAR, Bhavani M. R.; ARAPOGLOU, Pantelis D.; DANOY Grégoire; COTIS, Panayotis; OTTERSTEN Bjorn. **Power Allocation in Multibeam Satellite Systems: A Two-Stage Multi-Objective Optimization**. *IEEE Transactions on Wireless Communications, In Press*, DOI 10.1109/TWC.2015.2402682, 2015.

BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3ª ed. New York: John Wiley and Sons, 2005.

BAPTISTA, Rolden; MARINS, Carlos N. M. **Sistemas de comunicação via Satélite operando em banda Ka**. Revista Seleção Documental. Nº 28. Dez. 2012.

BAPTISTA, Rolden; FILHO, João I. S.; MARINS, Carlos N. M. **Atenuação de sinal no Uso da Banda Ka para acesso à Internet via Satélite em Processos Remotos de Monitoração de Máquinas Operatrizes**. Unisanta – Science and Technology, Vol. 01, Nº 02, p. 64-68. 2012.

CHOI, Jihwan P.; CHAN, Vicent W. S. **Predicting and adapting satellite channels with weather-induced impairments**. *IEEE Transactions Aerospace Electronic Systems*, vol. 38, Nº 3, p. 779-790, Jul. 2002.

CHOI, Jihwan P.; CHAN, Vicent W. S. **Optimum Power and Beam Allocation Based on Traffic Demands and Channel Conditions over Satellite Downlinks**. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.04, Nº 06, p. 2983-2993, Nov. 2005.

DESTOUNIS, Apostolos; PANAGOPOULOS, Athanasios D. **Dynamic Power Allocation for Broadband Multi-Beam Satellite Communication Networks**. *IEEE Communications Letters*, Vol.15, Nº 04, p. 380-382, Abr. 2011.

EGAMI, Shunichiro. **A power-sharing multiple-beam mobile satellite in Ka band**. *IEEE J. Select. Areas Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 145-152, Fev. 1999.

EISENCRAFT, Marcio. **Propagação de Sinais**. UPM - Universidade Presbiteriana Mackenzie. Notas de aula. São Paulo, 2004.

EVANS, J. V. **Twenty Years of International Satellite Communication**. *IEEE Conference Publication, 100 Years of Radio*, p. 239-245, Set. 1995.

FONTES, Marlene S. **Medidas radiométricas da atenuação por chuva em regiões tropicais e equatoriais**. Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (CETUC-PUC-RJ). Jun. 1994.

GARCÍA, Janier A. **Implementação em FPGA de uma Biblioteca Parametrizável para Inversão de Matrizes Baseada no Algoritmo Gauss-Jordan, usando Representação em Ponto Flutuante**. Dissertação (Mestrado). UNB - Universidade de Brasília. Brasília, 2010.

GOLUB, Gene. H.; LOAN, Van C. F. **Matrix Computations**. Maryland, USA: Johns Hopkins University Press, 1996.

HONG, Yang; SRINIVASAN, Anand; CHENG, Brian; HARTMAN, Leo; ANDREADIS, Peter. **Optimal Power Allocation for Multiple Beam Satellite Systems**. IEEE Radio and Wireless Symposium. p. 823-828. Orlando, Jan. 2008.

INTELSAT. **A Practical Introductory Guide on Using Satellite Technology for Communications**. Disponível em: < <http://www.intelsat.com/tools-resources/satellite-basics/> >. Acesso em: 05 set. 2014.

JUNIOR, Laurindo A.; DURAND, Fábio R. **Educational Software for Project and Analysis of Radiowave Propagation**. IEEE Latin America Transactions, Vol. 06, Nº 07, p. 638-646, Dez. 2008.

KALYANMOY Deb; PRATAP, Amrit; AGARWAL Samee; MEYARIVAN T. **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, n. 2, pp. 182-197, Abr. 2002.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Particle swarm optimization**. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, USA, pp. 1942–1948, 1995.

KILIC, Ozlem; ZAGHLOUL, Amir I. **Interference in Cellular Satellite Systems, Satellite Communications**. Nazzareno Diodato, 2010.

KOTA, Sastri L. **Quality of Service for Broadband Satellite internet – ATM and IP Services**. Paper - Department of Electrical and Information Engineering, Telecommunication Laboratory. University of Oulu. Oulu, 2002.

KWANGJAE, Lim; KIM, Sooyoung; LEE, Ho-Jin . **Adaptive Radio Resource Allocation for a Mobile Packet Service in Multibeam Satellite Systems**. *ETRI Journal*, vo. 27, no. 1, pp. 43-52, Feb. 2005.

LEITÃO, Mário J. M. **Apostila: Sistemas de Telecomunicações II**. FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Publicação interna. Porto, 2013.

LI, Duan; SUN, Xiaoling. **Nonlinear Integer Programming**. New York: Springer, 2006.

LUCAS, Diogo C. **Apostila: Algoritmos Genéticos: uma Introdução**. UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Publicação interna. Porto Alegre, 2002.

MACHADO, Renato. **Apostila: Telefonia Celular**. UFSM – Universidade Federal de Santa Maria – Publicação interna. Santa Maria, 2011.

MARINS, Carlos N. M. **Estudo Analítico e Numérico de um Enlace Digital de Comunicação via Satélite em condição orbital Geoestacionária**. Dissertação (Mestrado) – INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí, 2004.

NASCIMENTO, Edmar J. **Análise do Enlace de Comunicação**. UNIVASF – Universidade Federal do Vale do São Francisco. Notas de aula. Petrolina, 2010.

NEDJAH, N.; MOURELLE L. **Swarm Intelligent Systems**. Springer, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

NEELY, Michael J.; MODIANO Eytan; ROHRS, Chales E. **Power allocation and routing in multi-beam satellites with time-varying channels**. *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 11, no. 1, pp. 138–152, Fev. 2003.

PROTZEKa, Marcio A. **Estudo Sobre os Sistemas de Comunicação por Satélites Geoestacionários**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001.

PROTZEKb, Márcio A.; DESCARDECI, José R. **Comunicações por Satélite – Técnicas de Transmissão, Multiplexação e de Acesso**. Revista Científica Periódica, Vol. 04, Nº 02. Dez. 2001.

Recomendação ITU-R P.618-11. **Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems**. União Internacional de Telecomunicações, 2013.

Recomendação ITU-R P.837-6. **Characteristics of precipitation for propagation modelling**. União Internacional de Telecomunicações, 2012.

Recomendação ITU-R P.838-3. **Specific attenuation model for rain for use in prediction methods**. União Internacional de Telecomunicações, 2005.

Recomendação ITU-R P.839-4. **Rain height model for prediction methods**. União Internacional de Telecomunicações, 2013.

RIBEIRO, José A. J. **Engenharia de Microondas - Fundamentos e Aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Erica, 2008.

RODRIGUES, Marcio E. C. **Estudo de técnicas de traçado de raios aplicadas ao rastreamento de campos eletromagnéticos com o objetivo de calcular área de cobertura radioelétrica em ambientes internos e externos**. Dissertação (Mestrado) – PUC Rio – Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2000.

SAMPAIO, Lucas D. H.; ABRÃO, Taufik; ANGÉLICO, Bruno A.; LIMA, Moisés F.; PROENÇA, Mario L. J.; JESZENSKY, Paul J. **Hybrid Heuristic-Waterfilling Game Theory Approach in MC-CDMA Resource Allocation**. *Applied Soft Computing*, v. 12, p. 1902-1912, 2011.

SHANNON, Claude. E. **A mathematical theory of communication**. Bell Syst. Technical Journal, vol. 27, p. 379-423. Jul. 1948.

USIDA, Wesley F. **Sistema Inteligente para Alocação Eficiente de Dispositivos Indicadores de Falta em Alimentadores de Distribuição**. Tese (Doutorado) – USP São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

WANG, Heng; LIU Aijun; PAN, Xiaofei; LI, Jiong. **Optimization of Power Allocation for a Multibeam Satellite Communication System with Interbeam Interference**. *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, Article ID 469437, 8 p., 2014.