MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS	**PROJETO:** **EQUARS**

Relatório de Análise de Enlace de Comunicação Solo-Bordo

DOCUMENTO: EQUARS-4225-ANL-001-A		**ESTADO:** RASCUNHO
DESCRIÇÃO: Este documento descreve como será implementado o subsistema de Telecomunicação TT&C do satélite EQUARS.		
DATA: 26-09-2019	**EDT:** 4225 – ARQUITETURA DE COMUNICAÇÕES	**PÁGINAS:** 26

AUTORES			
NOME	**DIVISÃO**	**DATA**	**ASSINATURA**
Sergio Andrade	CGETE/DIDSE	30/9/19	

REVISORES			
NOME	**DIVISÃO**	**DATA**	**ASSINATURA**
Mateus Aguiar	CGETE/DIDSE	20/09/19	
Carlos Alberto Bento Goncalves	CGETE/DIDEA	30/09/2019	

APROVADO POR			
NOME	**DIVISÃO**	**DATA**	**ASSINATURA**
Leandro Toss Hoffmann	CGETE/DSS	30/9/19	

REVISÕES				
REV.	**DATA**	**MUDANÇAS/ N. PÁG.**	**AUTOR**	**APROVADO POR**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7

1.1 ESCOPO DO DOCUMENTO 7
1.2 DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA 7
1.2.1 Documentos Aplicáveis (DA) 7
1.2.2 Documentos de Referência (DR) 7
1.3 ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES 7
1.3.1 Lista de Acrônimos 7

2 ABORDAGEM DA ANÁLISE 9

3 PREMISSAS E LIMITAÇÕES 10

4 DESCRIÇÃO DA ANÁLISE 12

4.1 CÁLCULO DE *BUDGET* DE ENLACE DE SUBIDA (*UP LINK*) 12
4.2 CÁLCULO DE BUDGET DE ENLACE DE DESCIDA (DOWNLINK-LINK) 13

5 RESULTADOS DA ANÁLISE 14

6 CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO SOLO-BORDO 17

6.1 ESTAÇÕES TERRENAS 17
6.2 CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA DE TT&C 17
6.2.1 Função de Telemetria 20
6.2.2 Função de Telecomando 20
6.2.3 Características dos elementos da arquitetura 20
6.2.4 Redundância 21
6.2.5 Modos Coerentes e Não Coerentes 21
6.2.6 Estimativas dos equipamentos embarcados 22

7 CONCLUSÃO 23

ANEXO A 24

APÊNDICE A 25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama do Sistema de Comunicação de Banda S da Estação Terrena de Alcântara/MA 17

Figura 2 Diagrama em Blocos do Subsistema de Telcomunicação TT&C e sua Interface com o ACDH. 19

Figura 3 Diagrama em blocos simplificado do sistema de comunicação de bordo do Satélite Equars. 23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Principais características dos enlaces de comunicação (TBC-3): 10
Tabela 2 Cálculo estimado do Enlace de Subida (*Up-link*) para o Pior Caso. 15
Tabela 3 Cálculo estimado do Enlace de Descida (Down link) para o Pior Caso..... 15
Tabela 4 Taxa de dados segundo o tipo de órbita e respectivas margens de downlink. 16
Tabela 5 Densidade do Fluxo de Potencia (PSD) considerando uma banda de 4 KHz(ITU)..... 16
Tabela 6 Modos de Operação 20
Tabela 7 Valores estimados dos equipamentos de Bordo do sistema de telecomunicação TT&C. 22

EM BRANCO

1 INTRODUÇÃO

1.1 ESCOPO DO DOCUMENTO

Este documento descreve como será implementado o subsistema de Telecomunicação TT&C do satélite EQUARS e seu compromisso com (1) a missão, (2) o sistema de solo, (3) a carga útil e (4) com o sistema de *housekeeping* (serviço).

1.2 DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA

1.2.1 Documentos Aplicáveis (DA)

[DA-1] EQUARS-4226-ANL-001-A Análise de Arquitetura de Supervisão de Bordo

[DA-2] EQUARS-2000-MDD-001-A Documento de Descrição da Missão - Concepção da Missão EQUARS

[DA-3] EQUARS-2300-ANL-001-A Relatório de Análise de Missão

[DA-4] EQUARS-2000-MDD-001-A Documento de Descrição da Missão - Concepção da Missão EQUARS

[DA-5] EQUARS-4210-TS-001-A Especificação do Sistema do Segmento Espacial (Satélite)

[DA-6] CCSDS 401.0-B-29 RADIO FREQUENCY AND MODULATION SYSTEMS — PART 1 EARTH STATIONS AND SPACECRAFT. March 2019

1.2.2 Documentos de Referência (DR)

[DR-1] INPE. Technical Specification of Alcântara Ground Station, 2010.

[DR-2] INPE. Technical Specification of TT&C Cuiabá Ground Station, 2010

[DR-3] A822500-SPC-002/02 - AMAZONIA-1 TELEMETRY AND TELECOMMAND (TT&C) SUBSYSTEM SPECIFICATION

[DR-4] A822000-DPK-01/01 - MULTI-MISSION PLATFORM DATA PACKAGE FOR SYSTEM REQUIREMENTS REVIEW (SRR)

[DR-5] A820000-SPC-010/01 - TELEMETRY, TELECOMMAND AND RANGE RATE INTEGRATED BASE BAND SYSTEM SPECIFICATION FOR AMAZÔNIA-1 ACDH EGSE AND TT&C APPLICATIONS

[DR-6] MECB - A Missão de Coleta de Dados

[DR-7] ECSS-E-ST-50-05C – Space engineering: Radio Frequency and Modulation

[DR-8] ECSS--E--50--05A 24 January 2003 - Radio frequency and modulation

[DR-9] ITU-R- SF.358-5 – Maximum Permissible values of power flux-density at the surface of the Earth produced by satellites in the fixed-satellite service using the same frequency bands above 1 GHz as line-of-sight radio-relay systems.

[DR-10] CÁLCULO DE ENLACE PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL VIA SATÉLITE. Luciano Barros Cardoso da Silva e Marco Antonio Chamon, INPE/2004

[DR-11] Anatel, 2019 - PLANO DE ATRIBUIÇÃO, DESTINAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL.

1.3 ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES

1.3.1 Lista de Acrônimos

ACDH Attitude Control and Data Handling

CCS Centro de Controle de Satélites

CCSDS Consultative Committee for Space Data Systems

EIRP Effective Isotropic Radiated Power

ET Estação Terrena

G/T Gain to Temperature Ratio

ITU International Telecommunications Union

LHCP Left-Handed Circular Polarization

NRZ Non-return to Zero

PM Phase Modulation

Ppm Part-per-Million

PSK Phase Shift Keying

QPSK Quadrature Phase Shift Keying

RF Radio Frequency

RHCP Right-Handed Circular Polarization

Rx Receiver, Receive

S/N0 Signal-to-noise density ratio

STB Subsistema de Telecomunicação TT&C do Satélite Equars

TC Telecommand

TM Telemetry

TT&C Telemetry, Tracking and Command

Tx Transmitter, Transmit

TBC To Be Confirmed.

TBD To Be Defined.

TTFR Transponder Turnaround Frequency Ratio

UIT União Internacional de Telecomunicações

2 ABORDAGEM DA ANÁLISE

Neste estudo foi utilizada uma planilha de cálculo, desenvolvida pelo INPE, para estimar o *budget* de enlace da Missão EQUARS.

A análise visa demonstrar o atendimento dos requisitos operacionais de comunicação solo-bordo, por meio de margem de enlace definida para o estudo.

Além disto, a análise justifica requisitos funcionais e de desempenho para o subsistema de TT&C, definindo parâmetros de projeto, tais como, banda de operação, potência irradiada pelo satélite e sensibilidade de recepção.

3 PREMISSAS E LIMITAÇÕES

O Segmento Solo a ser utilizado na missão EQUARS é a infraestrutura do Centro de Rastreio e Controle (CRC) que já se encontra disponível nas Instalações do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) [DA-2, DA-3 e DA-4]., a saber:

- Estações Terrenas de Alcântara/MA (ET Principal) e/ou de Cuiabá/MT (ET secundária);
- Centro de Controle de Satélites (São Jose dos Campos):
- Centro de Missão (Cachoeira Paulista):
- Rede de Comunicação de Dados (RECDAS).

As Estações Terrenas (ETs) deverão ser utilizadas para o rastreio e controle dos satélites e para recepção de dados de carga útil. Estas estações são os pontos de contato com o satélite, pois, o processamento dos dados quer de rastreio, quer de controle, é realizado no Centro de Controle de Satélites (CCS), onde são tomadas todas as decisões relativas às operações em andamento.

As ETs devem transmitir com polarização circular á direita (RHCP) ou à esquerda (LHCP), dependendo da antena do satélite que esta em visada direta com a ET.

No Centro de Missão, os dados de carga útil são processados e disponibilizados para os usuários.

O subsistema de Telecomunicação TT&C do satélite Equars (Subsistema de Telecomunicação de Bordo - STB) deve ser dimensionado para descarregar, durante o tempo médio de visada com a estação terrena (ET), os dados de serviço (Telemetria – TM) e os dados das Cargas Úteis, que foram adquiridos nas orbitas do satélite. O sistema também deve receber os dados de telecomando (TC) oriundos da ET, demodulá-los e entregá-los ao Computador de bordo.

Dado que a taxa de dados prevista para a Missão é da ordem de 600 Kbps (ref: DA-1), então o estudo assume o uso de Banda S para o enlace de solo-bordo (DR-11).

As principais características dos enlaces de comunicação estão listadas na Tabela 1. As frequências dos enlaces de subida (*uplink*) e de descida (*downlink*) devem estar em conformidade com a recomendação ITU-R M.2024 (Apêndice 1) e Recomendação ITU-R F.1098.

Tabela 1 Principais características dos enlaces de comunicação (TBC-3):

Função	**Parâmetro**	**Característica**
Enlace de Subida	Frequência	2033,2 MHz
	Modulação da Portadora	PM
Enlace de Descida	Frequência	2208,0 MHz
	Modulação da Portadora	PM
Telecomando (Modula uma Subportadora e posteriormente a portadora)	Taxa de Bits	4 Kbps
	Modulação	**NRZ-L / PSK / PM**
	Freq. da Subportadora	8 KHz
	BER requerida	10^{-5} ou melhor
Telemetria (Modula direto a portadora)	Taxa de Bits	Modo Normal: 600 Kbps Modo de Emergência: 32 kbps
	Modulação	**NRZ-L / QPSK / PM**
	BER requerida	10^{-5} ou melhor

- *S-band*: de 2025 até 2110 MHz para *uplink (DA-6, item 2.6.1)*;
- *S-band*: de 2200 até 2290 MHz para *downlink (DA-6, item 2.6.1)*;

Além disto, as seguintes premissas foram consideradas neste estudo:

- O sistema deve ser compatível com a regulamentação ITU e com as recomendações CCSDS.
- Deve-se utilizar uma solução de TT&C com alta confiabilidade (redundância fria) para Transmissão (TX) e (redundância quente) para a Recepção (RX).
- Assume-se que o satélite terá um subsistema de supervisão de bordo (OBS) que é composto por um computador de bordo. Entre outras funções, este deve implementar também a função de codificação de telemetria. O OBS deve adquirir, processar e armazenar os dados dos vários subsistemas de bordo e enviá-los ao subsistema STB para que sejam transmitidos às ETs, em tempo real ou em passagens subsequentes onde os dados foram previamente armazenados. O OBS deve adquirir e enviar as telemetrias de tempo real e deve distribuir os telecomandos que não são executados em tempo real.
- Será utilizado como código corretor de erro o *Reed Solomon (RD)*, todavia, não serão utilizados outros códigos corretores de erro como, por exemplo, o Viterbi ou Convolucional para evitar o aumento da taxa de dados a ser transmitida. O OBS deve implementar os códigos corretores de erro.
- O Satélite Equars possui um subsistema de Carga útil composto por 05 experimentos. Estes experimentos adquirem dados durante todo o período orbital, independente do satélite estar ou não em visada com a estação terrena. Todavia, a transmissão de dados de carga útil do satélite para a ET somente poderá ocorrer quando existir visada entre ambos. Assim, o subsistema OBS será equipado com um gravador para adquirir e armazenar os dados das cargas úteis (e também das telemetrias) e posteriormente disponibilizá-los ao subsistema STB, para transmissão à ET, quando existir visada entre ambos.
- O Computador de Bordo será o responsável por armazenar os dados (de serviço e de carga útil) a serem transmitidos para a ET. Segundo a Ref: DA-1, a capacidade de armazenamento do computador deve considerar os períodos orbitais válidos para obtenção dos dados de carga útil. Deve-se calcular então o volume de dados adquiridos e armazenados nestes períodos orbitais. Deve-se considerar também o tempo de visada entre o satélite e a estação terrena e assim, definir a taxa de transmissão do transponder que para o caso do satélite Equars será de 600 kbps. Esta taxa de transmissão de dados será utilizada como entrada para o estudo de LinkBudget.
- As medidas de distância e velocidade (*ranging e range rate*) do satélite Equars serão feitas utilizando os dados do equipamento GPS embarcado no modulo de serviço do satélite Equars (TBC-4).
- Não foi considerado neste estudo, as fases de lançamento, aquisição e/ou controle do satélite EQUARS, na qual será provável o suporte de outras estações terrenas, por exemplo da ESA, para se fazer o adequado controle do satélite. Assim, o sistema de controle do satélite EQUARS (p.ex: *ranging* e *range rate*) deverá ser compatível com os padrões da ESA (*European Space Agency*). Deve-se considerar também que outras estações terrenas podem não ter a potencia de transmissão das ETs disponíveis no INPE o que impacta na margem que deve ser considerada no LinkBudget.

4 DESCRIÇÃO DA ANÁLISE

Conforme explicado em DR-10, a análise de desempenho de um enlace de comunicação via satélite pode ser caracterizado em duas partes: a primeira refere-se ao enlace de RF propriamente dito, ou seja, o cálculo da Relação Sinal/Ruído (C/N_o) do sistema, a segunda parte refere-se ao desempenho do canal e ao número de canais disponíveis em função da relação C/N_o do enlace.
Na primeira parte da análise faz-se o levantamento da relação Sinal/Ruído (C/N_o) do canal de comunicação. A relação C/N_o depende de diversos fatores, tanto positivos, como a Potência do Transmissor ou o Ganho das Antenas, quanto negativos, como às diversas perturbações ou atenuações (naturais ou não) que ocorrem em um enlace de RF, tais como chuva, atenuação atmosférica, desalinhamento entre as antenas, descasamento de polarizações, etc.
Na segunda parte da análise se faz a especificação do tipo de modulação (BPSK, QPSK etc.) e o tipo de técnica de múltiplo acesso que será empregada no sistema. Para sistemas digitais, calcula-se ainda a relação Energia de bit / Densidade Espectral de Potência (Eb/N_o), que tem uma importante função na análise do desempenho e da confiabilidade do sistema, tendo relação direta com a probabilidade de erro de bit (BER) que se admite para o sistema (normalmente especificada pelo usuário). Dependendo das características do sistema de comunicação, o enlace pode ainda ser classificado em: *Uplink*, referente ao enlace de subida, onde a Estação Terrena transmite o sinal ao satélite; e *Downlink*, referente ao enlace de descida, onde o satélite transmite o sinal à Estação Terrena. Para detalhes sobre a formulação utilizada nos cálculos de enlace, sugere-se consultar a referência DR-10.

4.1 CÁLCULO DE *BUDGET* DE ENLACE DE SUBIDA (*UP LINK*)

Conforme mencionado anteriormente, um dos principais objetivos em uma análise de enlace é determinar a relação Sinal Ruído (C/N0) do sistema. A equação que caracteriza essa relação está mostrada abaixo (ver DR-10):

$$\mathbf{C/N_0 = EIRP * 1/L * G/T * 1/k\ (Hz)}$$

Onde:

EIRP, caracteriza a potencia efetivamente irradiada pela estação terrena;

L, caracteriza as perdas no espaço livre e perdas atmosféricas;

G/T, que é igual a "Ganho do Receptor / Temperatura de Ruído" e caracteriza o equipamento de recepção. G/T também é conhecida como figura de mérito do equipamento de recepção.

K, é a constante de Boltzman ($1{,}38 \times 10^{-23}$ W/Hz-K).

O budget de enlace de descida é definido com base na relação de sinal/ruído (C/N_o) do enlace e a taxa de transmissão de dados que esta sendo utilizada no enlace. Esta relação determina a energia de bit do enlace e é caracterizada pela equação:

$$\mathbf{E_b/N_0 = C/N_0 \,.\, 1/R_b}$$

Onde:

R_b, caracteriza taxa de transmissão utilizada no canal de comunicação;

A Margem do Enlace pode ser definida pela diferença existente entre a energia de bit observada no enlace e a energia de bit requerida para que o sistema opere normalmente. A energia de bit requerida é determinada pelo tipo de modulação que o sistema utiliza (p. ex PSK, QPSK, QAM, etc.). Assim, a Margem do enlace é dada pela seguinte equação:

$$\textbf{Margem} = E_b/N_0 \text{ real} - E_b/N_0 \text{ requerida}$$

Baseado nas experiências com as missões satelitais desenvolvidas no INPE (SCDs, CBERs e AMZ1), para os cálculos de enlace, utilizados neste relatório, definiu-se que a Margem do Sistema deverá ter um valor final maior ou igual a 6dB (TBC-1).

Ver outros detalhes sobre o formulário de cálculo de enlace na referência DR-10.

4.2 CÁLCULO DE BUDGET DE ENLACE DE DESCIDA (DOWNLINK-LINK)

O *rationale* dos cálculos utilizados no Link budget do *downlink* segue a mesma lógica utilizada no *uplink*. Todavia, no *downlink* os locais de TX e de RX estão invertidos em relação ao *uplink*, o transmissor se encontra no satélite e o receptor se encontra no solo. Detalhes do formulário podem ser encontrados na referência DR-10.

5 RESULTADOS DA ANÁLISE

Os seguintes parâmetros de entrada são considerados para a análise:

- **Altitude da órbita do satélite: 635 km** (valor estimado para orbita da Missão Equars).
- **Taxa de dados para TM: 600 kbps** (valor estimado para a taxa de dados da Missão Equars).
- **G/T do RX da Estação Terrena: 21 dB/K** (referente a ET de Cuiabá)
- **G/T do RX do Satélite: -37 dB/K** (valor estimado baseado em missões anteriores desenvolvidas pelo INPE).

A análise do *Link Budget* é realizada considerando o pior caso de posicionamento do satélite em relação à estação terrena. Ou seja, quando ele encontra-se no horizonte e a visada entre a estação terrena e o satélite se estabelece para a estação terrena com 5° de elevação e a antena do satélite com um ângulo de meia potencia (p.ex: **62,5°**). Em outras palavras, o *Link budget* considerará o enlace para a maior distância entre o satélite e a estação terrena e o alinhamento entre as antenas no pior caso. Com estas premissas e considerando também que o satélite está a uma altitude de 635km, a distância entre satélite e estação terrena será de 2.412,76 km. O *Link budget* deve ser calculado para que se obtenha uma boa margem no enlace de comunicação, como mencionado anteriormente será utilizado como parâmetro de design deste relatório de análise que a margem deve ser maior ou igual a 6 dB em condição de chuva (TBC-1).

Outra característica importante a ser considerada é quanto à formatação dos dados, ou seja, o protocolo utilizado. Os dados a serem transmitidos devem ser colocados dentro de um protocolo da CCSDS com um controle de erro *Reed Solomon* (RS). Esse processo é realizado pelo computador de bordo, o que diminui a sensibilidade do enlace às distorções causadas por ruído o que de forma indireta permite que se aumente a capacidade de transmissão do sistema TT&C (maior taxa de dados poderá ser transmitida). Os links calculados foram todos analisados considerando a taxa de dados com CCSDS+RS. Avaliou-se também o uso de controle de erro adicional, como por exemplo, o Viterbi ou convolucional. Apesar desse controle de erro permitir que se reduza a potência requerida do sinal na entrada do receptor, a taxa de dados sofre um aumento de aproximadamente 2 vezes, o que causa um aumento de requisito para o transponder. Devido a esta condição de compromisso optou-se por não utilizar controle de erro Viterbi ou Convolucional.

Assim, para as estimativas iniciais do *Link Budget*, utilizou-se no satélite um transmissor com 5 watts (37 dBm) de potência em sua saída. As antenas utilizadas são as mesmas empregadas nos satélites da família CBERS e SCD, uma vez que foram projetadas e desenvolvidas no INPE. Essas antenas são do tipo quadrifilar com ganho de 2,5 dBi a 0° e -3 dBi a 60°. No pior caso pode-se utilizar o Ganho da antena como -5 dBi a 62° (antenas da Fabricante Neuron).

Os resultados das análises são apresentados nas Tabelas 2 até 5.

Considerando a estação terrena com 5° de elevação e o satélite a 635 Km de altitude, a relação portadora ruído (C/No) de *Uplink* (S-BAND), computada para a missão EQUARS é **de 61,54 dBHz**, com margem **de 9,41 dB** (para taxa de transmissão de 8 Kbps), conforme se vê nas Tabelas 2 e 3. Já a relação de sinal ruído para o *Downlink* (S-BAND) é de **77,66 dBHz** e as margens são computadas em função da taxa de dados estimada, conforme descrito na Tabela 3. A Densidade do Fluxo de Potencia (PSD) está descrita na Tabela 5.

Tabela 2 Cálculo estimado do Enlace de Subida (*Up-link*) para o Pior Caso.

EQUARS S-BAND TT&C LINK BUDGET					
ET = Estação Terrena; **ST** = Satélite, **C/N$_0$** = Relação Portadora Ruido					
Constante de Boltzmann	1,38*10^{-23}	W/Hz-K	228,60	dB W/Hz-k	Dado de entrada
Telecomando (TC) UP-LINK					
EIRP da ET(Potencia Efetivamente Irradiada)	47,00	dBW			Dado de uma ET de apoio (diferente da ET do INPE) com antena de 5 m.
Frequência de UP-LINK	2033,20	MHz			Dado do enlace
Altitude do Satélite (ST)	635,00	Km			Dado da Missão
Ângulo de Elevação da Estação Terrena (ET)	5,00	deg			Dado da ET
Distância entre ET e ST	2412,76	Km			Valor calculado
Atenuação no Espaço Livre			166,26	dB	Valor calculado
Perda por apontamento na ET			0,50	dB	Dado de entrada
Perda Atmosférica			0,50	dB	Dado de entrada
Perda por Polarização			3,00	dB	
Perda Devido a Chuva			0,50	dB	
Ganho efetivo da antena do ST	-5,00	dBi			Dado do equipamento
Figura de Ruído do Receptor (RX) do ST	4,00	dB	2,5		Dado do equipamento
Perda nos circuitos do RX do ST	4,00	dB	2,5		Dado do Sistema
Temperatura de Ruído do Sistema RX do ST	676,69	K			Dado do Sistema
G/T: Figura de Mérito do sistema de RX do ST			-37,3	dB/K	Dado do Sistema
C/No UP-LINK			67,54	dBHz	Valor calculado
Perda devido a Modulação da Sub-portadora (quando não ocorrer a modulação direta da portadora)			3,0	dB	Dado de entrada
Outras Perdas do sistema			3,0	dB	Dado de entrada
C/No do TC			61,54	DBHz	Valor calculado
Eb/No Requerido: para BER=10^{-5} (9,6 dB) ou para BER=10^{-6} (10,5 dB)	9,60	dB			Dado de entrada
Perdas tecnológicas	3,50	dB			Dado de entrada
Taxa de dados de TC do UP-LINK	8000,00	b/s	39,0	dBb/s	Dado de entrada
C/No Requerido para o TC			52,13	DBHz	Valor calculado
Margem resultante para o TC			9,41	dB	Valor calculado

Tabela 3 Cálculo estimado do Enlace de Descida (Down link) para o Pior Caso.

TELEMETRIA (TM) DOWN-LINK					
Constante de Boltzmann	1,38*10-23	W/Hz-K	228,60	dB W/Hz-k	Dado de entrada
Potencia de Transmissão do Satélite (ST)	37,00	dBm			Dado do Equipamento
Ganho da Antena do ST	-5,00	dBi			Dado do Equipamento
Predas no Circuito de TX do ST	3,00	dB			Dado de Entrada
EIRP do ST			29,00	dBm	Valor Calculado
Frequência de DOWN-LINK	2200,80	MHz			Dado de Entrada
Distância entre ET e ST	2412,76	Km	0,00	0,00	Valor calculado
Atenuação no Espaço Livre			166,9	dB	Valor calculado
Perda por apontamento na ET			0,50	dB	Dado de entrada
Perda Atmosférica			0,50	dB	Dado de entrada
Perda por Polarização			3,00	dB	
G/T: Figura de Mérito da ET			21,00		Dado da ET
C/No do DOWN-LINK			77,66		
Eb/No Requerido: para BER=10^{-5} (9,6 dB) ou para BER=10^{-6} (10,5 dB)	9,60	dB			Dado de Entrada
Perdas tecnológicas	3,50	dB			Dado de Entrada
Ganho devido à codificação RS (sem cod. Convulocional/Viterbi)	1,50	dB			Dado de Entrada
Perda Devido a Chuva	0,50	dB			Dado de Entrada
Taxa de dados de Telemetria (TM) do DOWN-LINK	600000,00	b/s			Dado de Entrada
Outras Perdas do sistema	0,50	dB			Dado de Entrada
C/No Requerida para TM			70,38	dBHz	Valor Calculado
Margem resultante pata TM			7,28	dB	Valor Calculado

Admitindo como dados de entrada que o satélite está a uma altitude de 635 Km e que a estação terrena é a de Alcântara/MA, obtêm-se os seguintes resultado para o cálculo de LinkBudget:

- Módulo de Serviço TM/TC:
  Up Link (Banda S – Freq 1 e taxa de 8 kbps): Margem = 9,41 (dB)
  Down Link (Banda S - Freq 2 e taxa de 600 Kbps): Margem = 7,28 (dB)

Ou seja, observando a Tabela 4 a taxa de dados que será utilizada na transmissão de sinais entre o satélite e a estação terrena será o elemento mandatório para se definir a potencia de saída a ser requerida do transponder de bordo do satélite Equars.

Tabela 4 Taxa de dados segundo o tipo de órbita e respectivas margens de downlink.

Plano orbital	Estação Terrena	Taxa de dados DownLink (kbps)	S-BAND downlink Margem (dB)
Equatorial	Alcântara	50	18,07
Equatorial	Alcântara	250	11,08
Equatorial	Alcântara	300	10,29
Equatorial	Alcântara	500	8,07
Equatorial	Alcântara	600	7,28
Equatorial	Alcântara	700	6,61
Equatorial	Alcântara	800	6,03
Equatorial	Alcântara	1000	5,06

Os Regulamentos de Rádio da UIT especificam que para serviços de operação espacial (somente TT&C), serviços de pesquisa espacial e serviços de exploração terrestre com satélites, deve-se usar a banda S. Para as comunicações do espaço para a Terra, a banda alocada é de 2200 a 2290 MHz enquanto da Terra para o espaço a banda é de 2025 a 2110 MHz.

Tabela 5 Densidade do Fluxo de Potencia (PSD) considerando uma banda de 4 KHz(ITU).

Rec. ITU-R SF.358-5 1 (*Table* 1) ITU RRS21-11 (*Table* S21-4)		***Link Budget* (Cálculo)**	
in the band 1.7 to 2.5 GHz, in any 4 KHz band:		**PFD** Calculada dB(W/m2/4KHz	
Ângulo de Elevação da Antena da Estação Terrena	**PSD** Recomendada pela ITU dB(W/m2/4KHz)	Banda de 600 KHz	Banda de 1 MHz
$\theta \leq 5°$	–154	-160	- 162
$5° < \theta \leq 25°$	$-154 + 0.5\ (\theta - 5)$	- 154	- 157
$25° < \theta \leq 90°$	–144	- 148	- 151

6 CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO SOLO-BORDO

A partir dos budgets de enlace definidas na seção 5, uma concepção de arquitetura para comunicação solo-bordo é apresentada nesta seção.

A arquitetura como um todo considera a infraestrutura de solo já instalada no INPE e propõe elementos conceituais para o segmento espacial, que por sua vez definirão o subsistema de TT&C (STB).

6.1 ESTAÇÕES TERRENAS

A Figura 1 mostra o diagrama em blocos das Estações Terrenas de Alcântara e de Cuiabá com valores de EIRP e G/T utilizado para o cálculo de enlace. Demais características estão disponíveis em [DR-1 e DR-2].

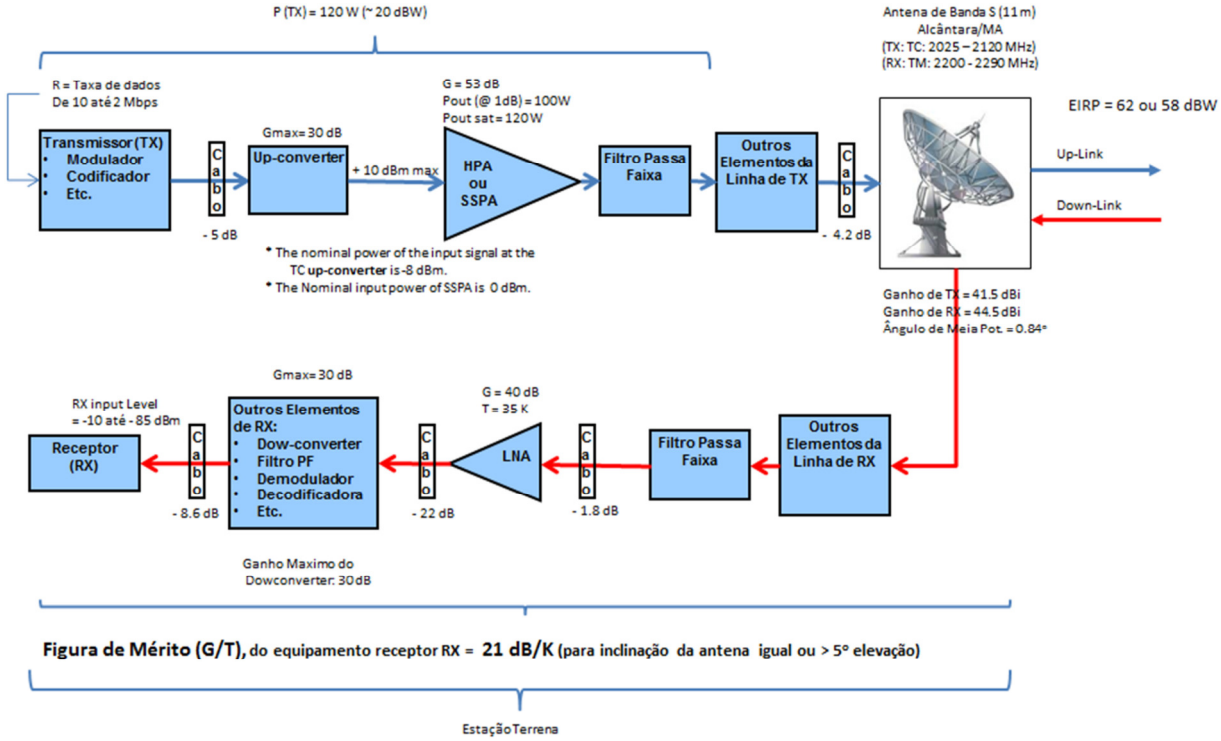

Figura 1 Diagrama do Sistema de Comunicação de Banda S da Estação Terrena de Alcântara/MA

6.2 CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA DE TT&C

As funcionalidades do enlace em bordo deverão ser atendidas por um Subsistema de Telecomunicação TT&C de Bordo (STB), que deve viabilizar o fluxo de informação (dados) entre o satélite e o Segmento Solo, quanto existir visada direta entre esses elementos.

A solução de comunicação TT&C do satélite Equars (STB) contará com apenas 1 módulo que implementará as funções de transmissão (TX) e recepção (RX), conforme se vê na Figura (2). O

módulo de comunicação TT&C será responsável por transmitir, simultaneamente, os sinais de carga útil e de serviço (telemetria - TM) e por receber os sinais de serviço (Telecomando - TC). Para garantir a alta confiabilidade do sistema STB, será utilizada redundância nos transpondes. O receptor de ambos os transpondes estará sempre ligado (redundância a quente) para garantir a recepção de sinais, mesmo em condições não nominais de funcionamento do satélite. O transmissor do transponder redundante será ligado em caso de falha do transmissor do transponder principal (redundância a frio).

O STB proverá comunicação solo-bordo (RX) e bordo-solo (TX) em banda S com o objetivo de utilizar a infraestrutura já existente nas estações terrenas de Alcântara/MA (estação Terrena Principal) e Cuiabá/MT (estação terrena secundária).

O STB fará interface direta com o modulo computador de bordo (OBS). O computador de bordo será responsável por implementar as codificações de sinal (protocolos de comunicação) necessárias para compatibilizar a comunicação entre o satélite e a estação terrena (p. ex: codificação de sinais, CCSDS, Reed Solomon, etc..).

O sistema de antenas fornece uma cobertura quase-omnidirecional por meio de duas antenas hemi-direcionais trabalhando com polarizações circulares opostas. Ambas as antenas devem operar tanto na recepção quanto na transmissão de sinais de RF. Quando o satélite esta em seu apontamento nominal, ou seja, apontando para a terra, somente uma das antenas esta em operação, aquele que está apontada para a terra. A segunda antena, apontando no sentido oposto, fornece suporte em todos os casos quando a atitude difere da nominal, isto é, durante a aquisição do lançamento e da órbita ou devido a um mau funcionamento (condições não nominais) do equipamento ou do satélite.

O STB deve desempenhar as seguintes (TBC-2) funções básicas:

1. A Função de Telecomando, que consiste em:
    a. receber sinais de rádio frequência, modulados em fase;
    b. demodular e decodificar as mensagens de telecomando;
    c. distribuir comandos de alto nível pare o satélite ou dados de carga serial pare OBS.
2. A Função de Telemetria que consiste em:
    a. modular uma portadora na bande S com sinais de vídeo, fornecidos pelo OBS
    b. transmitir um sinal modulado em fase na bande S.
3. A Função de *Ranging* e *Rage-Rate*:
    O STB não implantará a função de *Ranging* e *Rage-Rate*. A predição de orbita será exclusivamente feita em solo com os dados fornecidos pelo equipamento GPS embarcado no satélite Equars (TBC-4).

O STB é responsável por implementar as funções de Telecomando e Telemetria. O STB não fornecerá suporte para a execução da função de localização (distância e variação temporal de distância entre o satélite e a estação terrena). O STB deve implementar a transmissão (TX) dos dados de telemetria e de carga útil, oriundos do satélite, para a ET, deve implementar também a recepção (RX) dos dados de telecomando, oriundos da ET, para o satélite.

A Figura 2 apresenta o diagrama em blocos, simplificado do Subsistema de Telecomunicação TT&C (STB). A carga útil do satélite Equars devem enviar seus dados ao computador de bordo que deverá processá-los e entregá-los ao STB para serem transmitidos à estação terrena.

O STB é composto pelos seguintes equipamentos:

- 2 Antenas;
- 1 Hibrida;
- 2 transponders (um Principal-P e outro Redundante-R);
    - 2 diplexers;
    - 2 Transmissores;
    - 2 receptores.
- cablagem de interconexão.

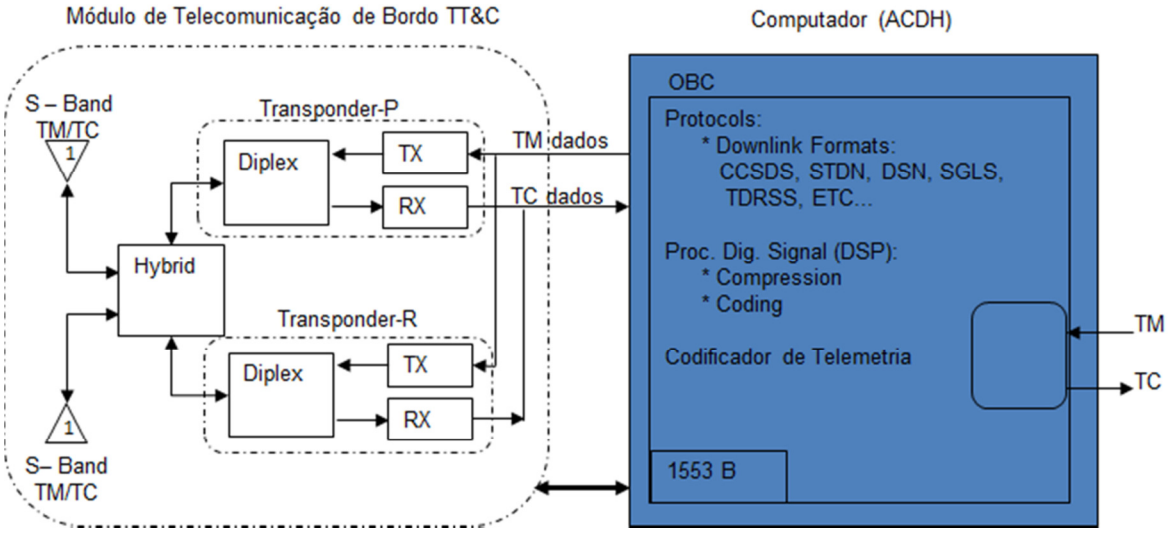

Figura 2 Diagrama em Blocos do Subsistema de Telcomunicação TT&C e sua Interface com o ACDH.

O comando do satélite é feito através de dois receptores que alimentam decodificadores redundantes. Codificadores de telemetria, também redundantes, se encarregam de entregar as informações de bordo aos transmissores, cujas saídas alimentam 2 antenas situadas nas partes superior e inferior (faces opostas) do satélite. Isto permite uma cobertura radioelétrica quase onidirecional, de modo que a comunicação com a estação terrena pode ser viabilizada em todas as fases operacionais do satélite, independente de sua atitude.

As comunicações de serviço (banda S) entre o satélite e o segmento solo consistem de:

- mensagens de telecomando transmitidas do solo pare o espaço;
- mensagens de telemetria transmitidas do espaço para o solo;

São possíveis os seguintes modos de operação (ver Tabela 6):

Tabela 6 Modos de Operação

MODO	LINK-SUBIDA	LINK-DESCIDA
1	TC	-
2	-	TM
3	TC	TM

6.2.1 Função de Telemetria

Esta função é desempenhada por 2 subsistemas, o subsistema de Comunicação TT&C (STB) e o subsistema Supervisão de Bordo (OBS). O OBS desempenha as funções de aquisição, conversão A/D, formatação dos sinais a serem transmitidos. Na sequencia, o STB desempenha a função de modulação de uma portadora e transmissão do sinal de RF para a ET. A frequência de transmissão pode ser coerente com a frequência recebida de solo, com uma razão de conversão de frequência igual a 240/221 TTFR (DA-6, item 2.6.1) ou não coerente, derivada de um oscilador local.

O OBS gera 2 sinais de vídeo, um sinal de vídeo consiste de dados em tempo real e outro consiste de dados em tempo real e dados armazenados. O transmissor faz um chaveamento e escolhe um destes sinais e modula em fase a portadora que é transmitida pelo sistema irradiante em polarização circular à direita.

6.2.2 Função de Telecomando.

A função telecomando também é desempenhada por 2 subsistemas, o subsistema de Telecomunicação TT&C (STB) e o subsistema Supervisão de Bordo (OBS). Mais especificamente, pelo sistema irradiante, transponders, decodificador de telecomandos e distribuidor de telecomando. Em solo, o sinal de telecomando modula em fase uma subportadora que posteriormente modula a portadora em banda S que é transmitida ao satélite. O sinal modulado em fase (banda S) transmitido de solo é recebido pelo sistema irradiante do satélite e alimenta os dois receptores redundantes do STB. Os receptores executam o rastreio da portadora e a demodulação PM e entregam os sinais de vídeo para o decodificador de TC no OBC. O decodificador de TC consiste de dois circuitos de decodificação independentes que trabalham em redundância ativa (DA-1).

6.2.3 Características dos elementos da arquitetura

6.2.3.1 Configuração de Antenas

Quando o satélite está em sua atitude nominal, a antena de apontamento para a Terra fornece comunicações Satélite-Terra. No entanto, durante o lançamento e, possivelmente, quando ocorre um mau funcionamento, a atitude nominal pode não ser obedecida, e o contato com a antena de apontamento para a Terra pode ser perdido. Portanto, um subconjunto de antena omnidirecional ou quase omnidirecional é necessário. Uma segunda antena com apontamento para o espaço está localizada no painel superior oposto do satélite. Ambas as antenas são alimentadas circularmente, com polarizações opostas, e a estação terrestre transmite com uma polarização ou outra, de modo que uma antena só esteja ativa em um dado instante. A antena com apontamento para o espaço entra em operação quando o contato com a outra antena é perdido. As duas antenas juntas fornecem um padrão quase omnidirecional.

6.2.3.2 Hardware de Conexão RF

Cada antena é conectada a uma das portas de entrada (junção) da híbrida e as duas portas de saída (junção) da híbrida são conectadas ao diplexer (ver detalhes na Figura 2). A energia de entrada de uma antena é igualmente dividida entre os dois receptores e, de forma semelhante, a potência de saída proveniente de um dos dois transmissores é igualmente dividida entre as duas antenas. Em ambos os casos, ocorre uma perda de metade da energia.

É possível evitar essas perdas de energia se a junção híbrida for substituída por chaves. Esta configuração não é adotada no diagrama da Figura 2 devido a considerações de confiabilidade.

Cada diplexer atua isolamento entre um receptor e um transmissor. Este isolamento é obtido em parte por um circulador e em parte por dois filtros passa-banda de entrada e saída, e é de tal magnitude que a onda de saída está essencialmente ausente na entrada do receptor.

6.2.3.3 Diplexers

Cada diplexer é composto por um filtro passa-banda RX sintonizado na frequência de entrada, um filtro passa-banda de saída sintonizado na banda de frequência TX, ambos conectados a duas portas de um circulador, cuja porta restante está conectada à híbrida.

6.2.3.4 Receptores

Dois receptores idênticos estão presentes, cada um recebendo metade da energia de ambas as antenas, que, no entanto, estão ativas, uma de cada vez, devido ao isolamento causado pela polarização. As duas saídas dos receptores são unidas e entregue ao subsistema OBC.

6.2.3.5 Transmissores

Dois transmissores idênticos estão presentes, somente um deles no modo ativo. A potência de saída é fornecida ao diplexer e na sequencia à híbrida. Metade dessa potencia é fornecida à antena apontada para a terra e a outra metade para a antena apontada para o espaço. Assim, metade da energia fornecida pelo transmissor é “desperdiçada”.

6.2.4 Redundância

Os dois receptores estão permanentemente conectados à fonte de alimentação (redundância a quente). Ambos os equipamentos estão conectados a ambas as antenas simultaneamente. A cada instante de tempo somente uma antena estará em visada com a estação terrena (devido à sua alocação física na estrutura do satélite) e consequentemente estará apta a recebendo sinais da estação terrestre.

Apenas um dos dois transmissores está ativo (redundância a frio) a qualquer momento. A energia do transmissor é ligada e desligada pela estação terrestre, via telecomando.

6.2.5 Modos Coerentes e Não Coerentes

Qualquer um dos modos pode ser escolhido pela estação terrestre via telecomando.

No modo coerente, a portadora de descida (de *downlink*) é obtida da portadora recebida, através da multiplicação por um número racional adequado. Este modo está, portanto, disponível somente quando a portadora de *uplink* está ON e o receptor está em "*phase locked*".

No modo não-coerente, a portadora de *downlink* é obtida de um oscilador local com estabilidade adequada (p.ex: $1x10^9$).

6.2.6 Estimativas dos equipamentos embarcados

Para o cálculo de enlace (*LinkBudget*), o ganho da Antena (utilizada no Satélite) foi estipulada em -5 dBi. Todavia, pode-se encontrar no mercado, com relativa facilidade, antes com ganhos da ordem de 0 a 10 dBi.

Na Tabela 7 faz-se uma estimativa de potenciais equipamentos que poderiam ser embarcados no satélite Equars.

Tabela 7 Valores estimados dos equipamentos de Bordo do sistema de telecomunicação TT&C.

	Transponder	Antena	Hibrida	Diplexer
Massa (Kg)	3	0,5	0,05	NA
Potência requerida para funcionamento (W)	30			NA
Potência em Standbay Receptor-2 ON (W)	5			NA
Potência de Transmissão EIRP (dBm)	37 dBm			NA
Taxa de transmissão (bps)	de 50 K até 8M			NA
Dimensão (LxHxC – mm)	228 x 170 x 194	260 x 80	30 x 19 x 10	NA
Ganho (dBi)		de 0 até -8		NA

A Tabela 7 considera apenas 1 equipamento (p. ex: Uma antena, um transponer, etc.) caso o sistema utilize mais de um equipamento, os valores de massa e consumo devem ser proporcionalmente considerados. Na Figura 2 mostrada anteriormente, o subsistema STB utiliza 2 transponders, 2 antenas e uma Híbrida. O Diplexer faz parte do transponder.

7 CONCLUSÃO

Do exposto acima pode-se concluir que há viabilidade técnica para se construir o sistema de comunicação de bordo (STB) do satélite Equars. Existem soluções de prateleira capazes de atender aos requisitos de telecomunicação da missão. A Figura 3 a seguir é um exemplo possível do sistema de comunicação de bordo (transponder e antena) que pode ser embarcado no satélite Equars. O diagrama da Figura 3 utiliza como referência um transponder de 5 W da fabricante Thales e antenas das missões pregressas do INPE (p.ex: SCD 1-2, Amazônia e CBERS).

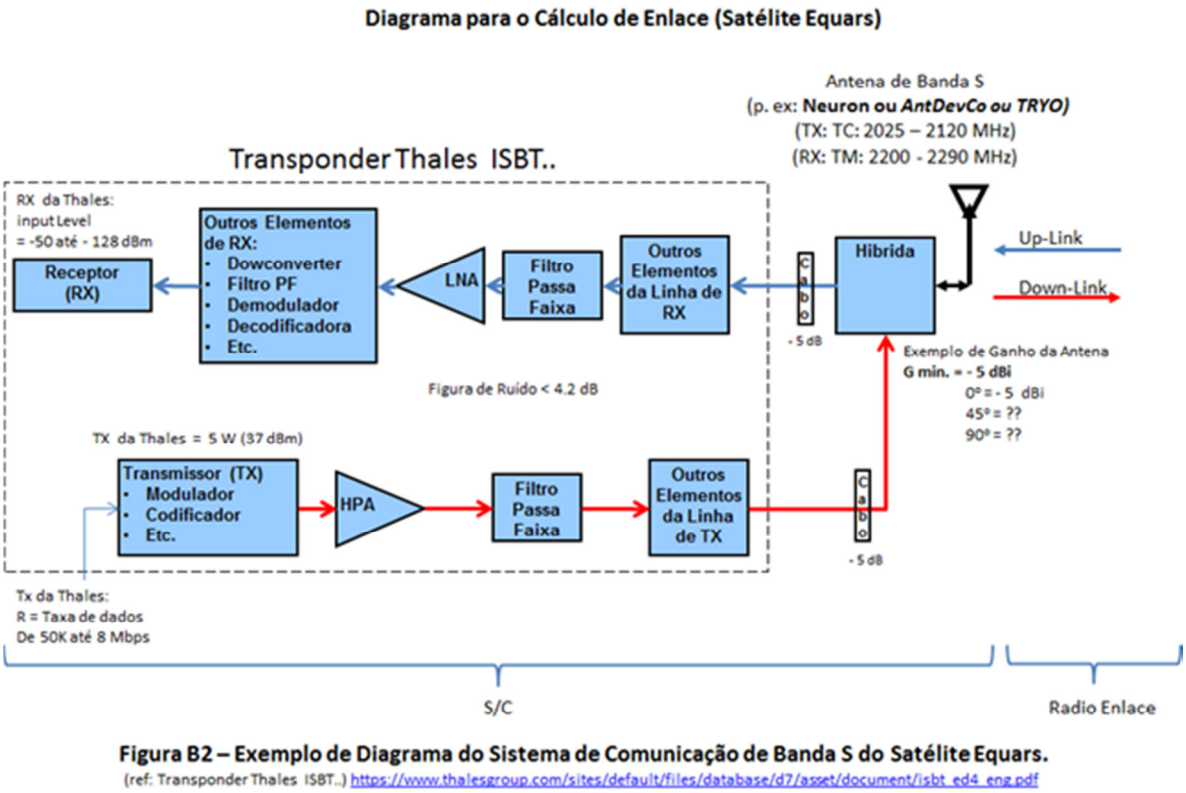

Figura 3 Diagrama em blocos simplificado do sistema de comunicação de bordo do Satélite Equars.

Ainda a título de exemplo, como potenciais antenas de Banda S, a serem embarcadas no satélite Equars, pode-se utilizar como referência as antenas usadas no CBERs-4 e AMz-1. Ou ainda antenas comerciais como, por exemplo, dos fabricantes ANTDEVCO e TRYO.

ANEXO A

APÊNDICE A

LISTA DE ITENS *TO BE DEFINED*			
ID	**DESCRIÇÃO**	**STATUS**	**PREVISÃO DE CONCLUSÃO**
TBD-1			

LISTA DE ITENS *TO BE CONFIRMED*			
ID	**DESCRIÇÃO**	**STATUS**	**PREVISÃO DE CONCLUSÃO**
TBC-1	Estima-se que a margem de reserva no linkbudget deve ser de no mínimo 6 dB visto que não se conhece as estações terrenas que podem vir a dar suporte à missão.	Aberto	Evento PRR.
TBC-2	Definição das funções básicas do Sistema de Telecomunicação de Bordo (STB)	Aberto	Evento PRR
TBC-3	Para a análise de viabilidade da missão, adotou-se para este relatório os canais de *uplink* (2033,2 MHz) e de *downlink* (2208,0 MHz) que são os mesmos alocados para os satélites AMZ-1 e CBERS. Caso se decida por alocar outros canais de *uplink* e *dowlink* para a missão Equars, com o objetivo de minimizar possíveis interferências, deve-se adotar o que esta previsto em (1) Rep. ITU-R M.2024 pagina 11 e (2) no apêndice 1 da Recomendação ITU-R F.1098.	Aberto	Evento PRR
TBC-4	A predição de órbita será feita em solo utilizando somente os dados fornecidos pelo GPS embarcado no satélite Equars.	Aberto	Evento PR