

ABORDAGEM DE ENGENHARIA DE SISTEMAS APLICADA A UM SUBSISTEMA DE TELEMETRIA E TELECOMANDO PARA SATÉLITES

Jonas Bianchini Fulindi

Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/CSE)
S. J. Campos - SP, Brasil.
jonas.bianchini@yahoo.com.br

Geilson Loureiro

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/LIT)
S. J. Campos - SP, Brasil.
geilson@lit.inpe.br

Bruno Vicente dos Santos

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/DEA)
S. J. Campos - SP, Brasil.
bruno@dea.inpe.br

José Antonio Rodrigues

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/DEA)
S. J. Campos - SP, Brasil.
jar@dea.inpe.br

Vicente Damasceno da Costa

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/DEA)
S. J. Campos - SP, Brasil.
vicente@dea.inpe.br

Resumo: *Este trabalho apresenta uma abordagem de engenharia simultânea de sistemas aplicada ao desenvolvimento de um subsistema de satélite. O subsistema é o subsistema de telecomando e telemetria. A abordagem leva em consideração, desde o princípio do processo de desenvolvimento do produto, os cenários dos processos do ciclo de vida do produto e as organizações que implementam esses processos. A abordagem é focada em stakeholders, ao invés de somente no cliente ou no usuário. A abordagem captura o fato de que a solução de sistema não é somente composta por elementos do produto, mas também por elementos de organização.*

Palavras-Chave: *Análise de stakeholders, análise de requisitos, engenharia de sistemas, análise funcional, análise física*

1 Introdução

Satélites são usados para os mais diversos propósitos como comunicações, previsão de tempo entre outros. Não importa a aplicação, um satélite é constituído basicamente de um conjunto de subsistemas mais uma carga útil que está associada à missão que cumpre esse satélite. Por exemplo, no caso do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres - CBERS (2010), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2010) em cooperação com a Agência Espacial Chinesa, a carga útil inclui câmeras imageadoras e um repetidor para um sistema de coleta de dados ambientais (CBERS 3&4, 2005). Uma decomposição típica de um satélite é mostrada na Figura 1.

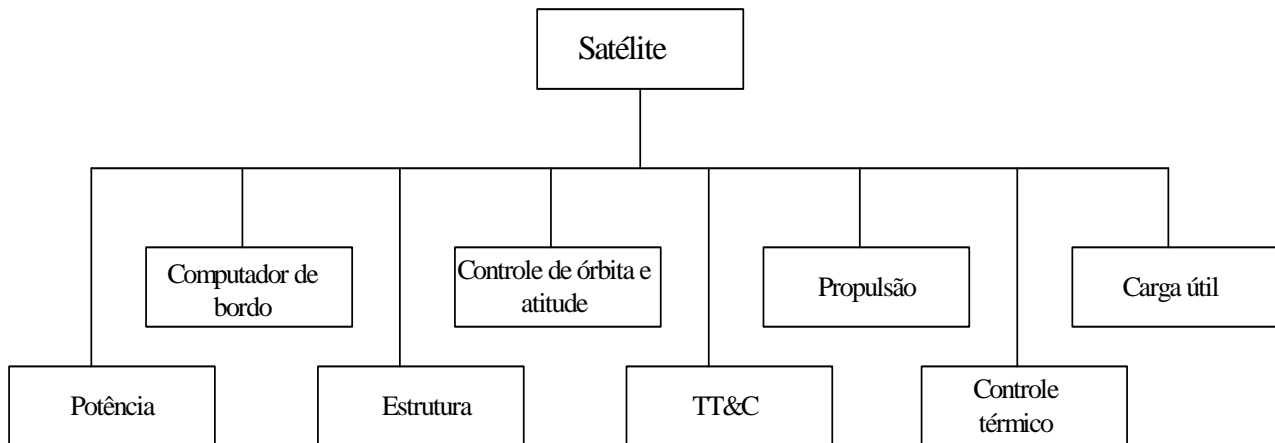


Figura 1. Elementos que Compõem um Satélite.

O objeto deste trabalho, o subsistema de telecomunicações de serviço (ou TT&C) tem a missão de assegurar a comunicação do satélite com as estações terrenas por meio das seguintes funções: rastreamento, telemetria e telecomando (Rodrigues, Gonçalves, 2005).

O subsistema de TT&C recebe e demodula os sinais (telecomandos) provenientes das estações terrenas e modula e transmite sinais (telemetrias) para essas mesmas estações. O TT&C também permite que o satélite seja rastreado por essas estações por meio de correlações entre os sinais recebidos e transmitidos. A comunicação com as estações terrenas requer que a antena do satélite possua um campo de visibilidade desobstruído e forneça uma cobertura no mínimo hemisférica. Adicionalmente, o projeto de um subsistema de TT&C deve estabelecer um nível mínimo de potência transmitida bem como um receptor que permitam detectar os sinais com uma taxa de erro que seja aceitável (CBERS 3&4, 2005).

O escopo do esforço associado ao desenvolvimento do TT&C contempla os processos do ciclo de vida identificados para o produto, que são seis: concepção, desenvolvimento, produção, integração testes e lançamento (IT&L), operações e descarte. Este trabalho ocupa-se do desenvolvimento, produção, IT&L e operações.

2 Análise de Requisitos

Esta seção é dedicada ao processo que vai obter os requisitos técnicos do produto. Inicialmente são identificados os stakeholders, entidades que de alguma forma afetam ou são afetadas pelo projeto durante o processo do ciclo de vida do produto. Em seguida, a partir dos interesses dos stakeholders, são identificadas funções, metas, condições e outros atributos que serão então consolidados em termos de requisitos técnicos. O diagrama IDEF0 da Figura 2 reúne em seqüência os quatro processos do ciclo de vida do TT&C estudados neste trabalho (Marca, McGowan, 1987).

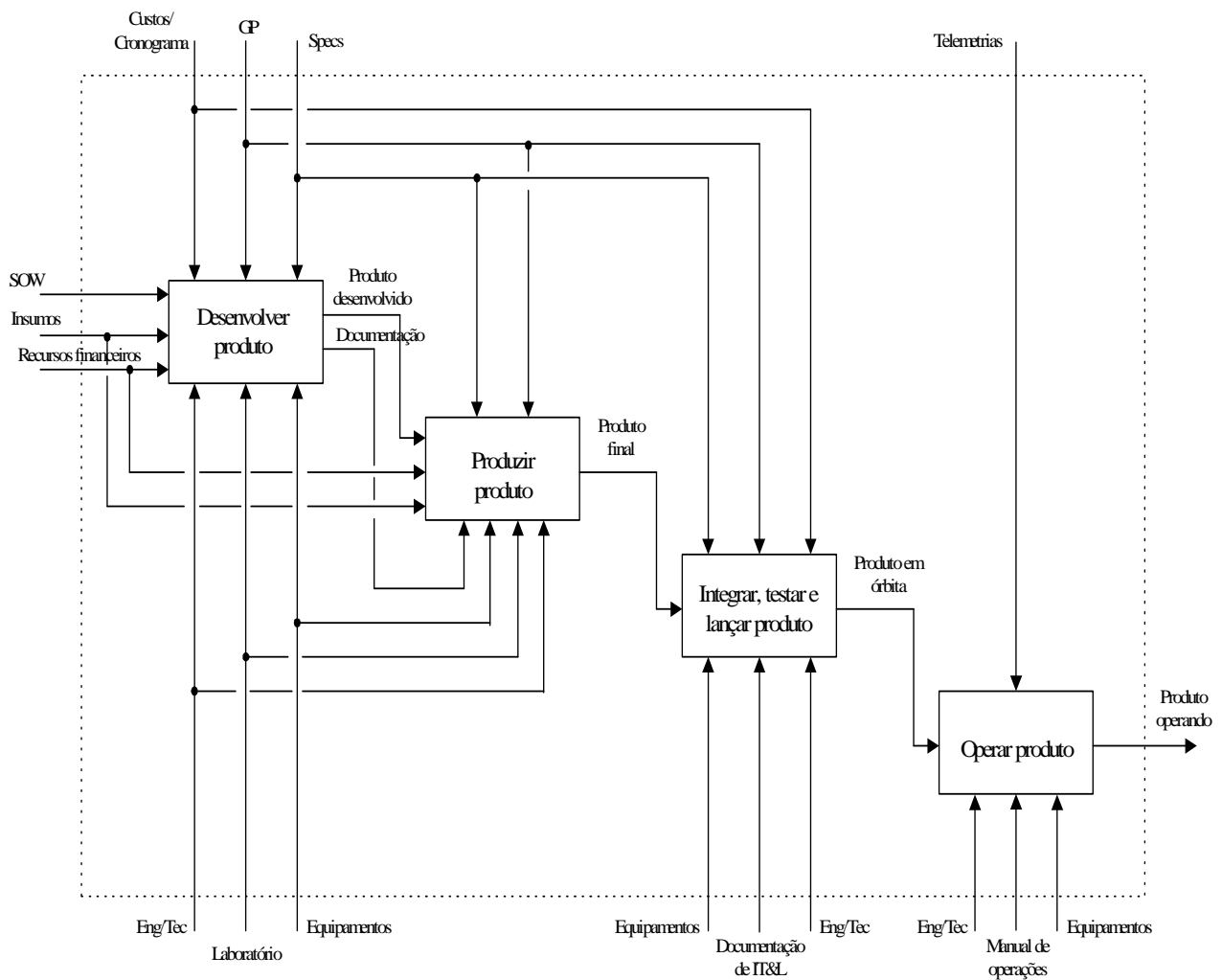
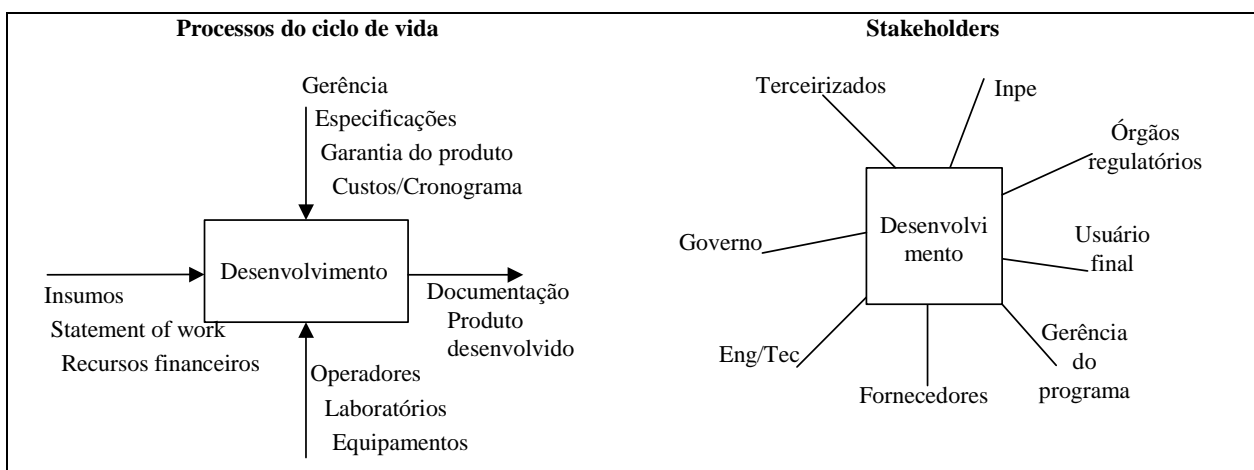


Figura 2. Processos do Ciclo de Vida do TT&C.

O digrama da Figura 2 é desmembrado em diagramas IDEF0 na Figura 3 onde, para cada processo do ciclo de vida, as entradas e as saídas bem como os controles, recursos e mecanismos empregados (Marca, McGowan, 1987). Os correspondentes stakeholders são identificados em diagramas DFD na mesma figura (Yourdon, 1989). Por exemplo, para o processo de desenvolvimento são identificados como stakeholders: o INPE, que elabora o statement of work (SoW), os fornecedores, responsáveis pela provisão de componentes, partes e materiais, e o governo, que provê os recursos financeiros para o programa.



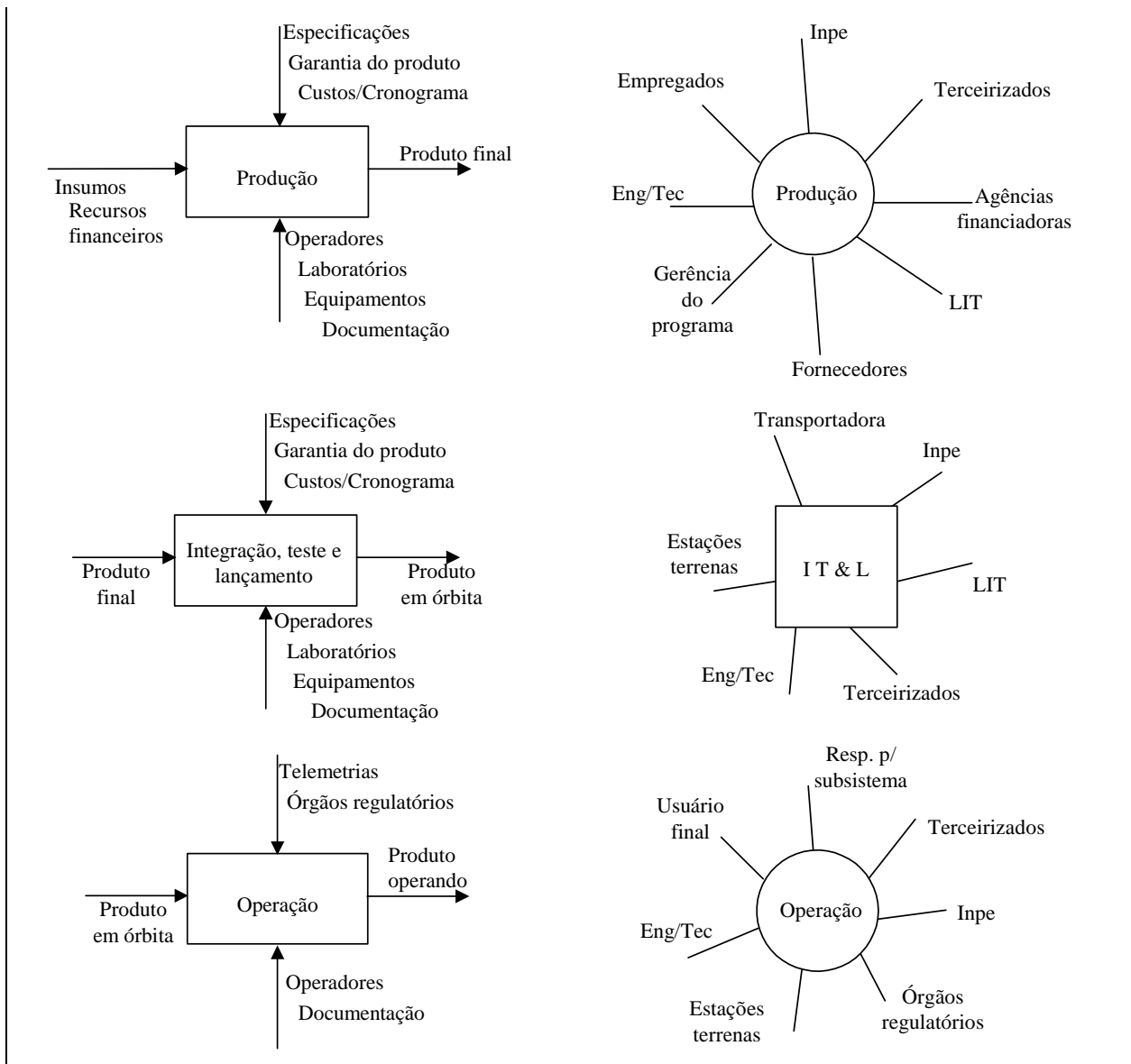


Figura 3. Identificação dos Stakeholders.

As medidas de efetividade (MoE) são as métricas pelas quais os desenvolvedores poderão medir a satisfação dos stakeholders com a solução que resulta do esforço de desenvolvimento. Para identificá-las foram considerados os diversos interesses dos stakeholders com relação ao produto e seus processos em um método conhecido como goal-question-metric (objetivo-questão-métrica). Para cada um dos quatro processos escolhidos neste trabalho a Tabela 1 apresenta o interesse dos stakeholders e sua correspondente medida de efetividade. Apenas um stakeholder é apresentado.

Tabela 1. Interesses dos Stakeholders e Medidas de Efetividade.

SH	P/O	INTERESSE	MoE			PROCESSO
			OBJETIVO	QUESTÃO	MÉTRICA	
Estação terrena	P	Manter a comunicação com o TT&C durante as passagens do satélite	O TT&C deve ser capaz de receber/transmitir sinais de RF da/para estação terrena em bandas de frequências específicas	Quais meios são necessários para prover comunicação do TT&C com a estação terrena?	Resultados de testes funcionais de desempenho	Operação

Gerência do Programa	O	O limite de massa alocado para o TT&C não deve ser excedido	< 20kg	O que fazer para minimizar o peso do subsistema?	Medida de propriedade de massa	Desenvolvimento
Inpe	P	A vida do produto deve atender a duração da missão	3 anos em órbita	O que faz o produto ser robusto para enfrentar a missão?	Partes e materiais qualificados para uso no espaço. Análise de confiabilidade.	Produção
LIT	O	Verificar que o TT&C atende aos requisitos ambientais da missão	Testar o TT&C em nível de equipamento, subsistema e sistema	Quais os meios necessários para testar o TT&C?	Teste do subsistema com EGSE	IT&L

Um conjunto de requisitos técnicos é obtido a partir dos interesses dos stakeholders. A Tabela 2 especifica requisitos funcionais para o produto final TT&C e indica a obrigatoriedade no cumprimento e o tipo de verificação a ser empregado. É feita correspondência com a Tabela 1.

Tabela 2. Requisitos Técnicos.

Stakeholder	Requisito de sistema	P/O	Tipo	Cumprimento	Verificação
Estação terrena	O TT&C deve prover cobertura radioelétrica para transmissão e recepção de sinais de telemetria, telecomando e rastreo.	P	F	M	A/T
Gerência do Programa	A massa do TT&C não deve exceder 20Kg.	O	C	M	I/A
Inpe	O TT&C deve atender a uma expectativa de vida útil de 3 anos em operação em órbita.	P	C	M	A
LIT	O TT&C deve ser testado em níveis de equipamento, de sistema e de subsistema com um EGSE.	O	C	M	D
Alocação: P – Produto O – Organização		Tipo: F – Função C – Condição D – Desempenho		Cumprimento: M – Mandatório D – Desejável	
				Verificação: A – Análise T – Teste I – Inspeção D – Demonstração	

3. Análise Funcional

Esta seção apresenta uma arquitetura funcional para o subsistema TT&C a partir dos requisitos técnicos identificados na seção anterior (Rodrigues, Gonçalves, 2005).

A Figura 4 é um diagrama DFD definindo o contexto do produto. Os terminadores representam os elementos que interagem com o subsistema TT&C durante os processos de seu ciclo de vida. São entidades terceirizadas, contratadas para executar as atividades de desenvolvimento, fabricação e testes do produto, são os operadores responsáveis por operar o produto em órbita, os fornecedores de insumos, os equipamentos de teste, as estações terrenas. Interagem também com o TT&C outros subsistemas do satélite como o térmico e o suprimento de energia além do próprio ambiente (CBERS 3&4, 2005).

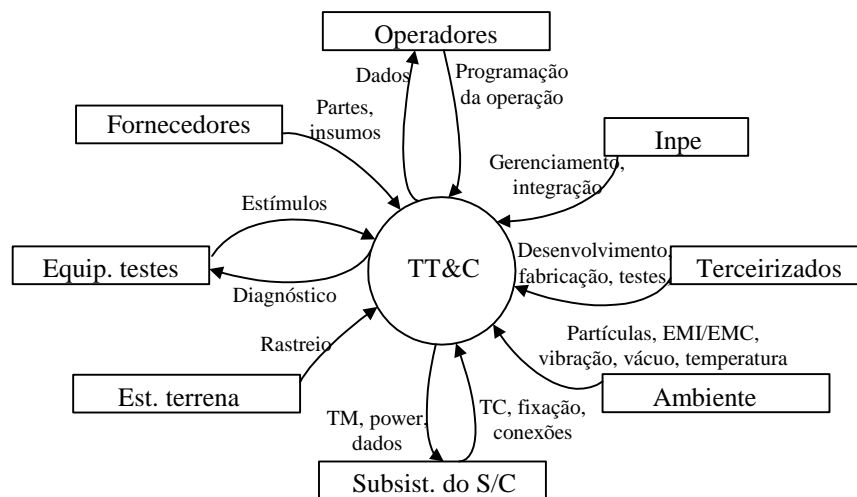


Figura 4. Contexto Funcional do TT&C.

Cada uma das ações iniciadas nos terminadores representa um estímulo ao produto. Esses estímulos são apresentados em uma lista de eventos na Tabela 3 juntamente com a resposta que o produto fornece.

Tabela 3. Lista de Eventos.

Estímulos	Resposta: O sistema ...
Estação terrena envia Sinais de RF de telecomando	Demodula os sinais de RF da estação terrena e envia para o computador de bordo
Computador de bordo envia Sinais de RF de telemetria	Recebe a telemetria do computador de bordo, modula e transmite para a estação terrena
Estação terrena envia Sinais de RF de rastreio	Recebe os sinais de rastreio e os retransmite para a estação terrena
Equipamento de teste EGSE envia comandos de teste enviados	Fornecer Parâmetros de desempenho do subsistema
Subsistema de suprimento de energia fornece Tensões	Gera tensões secundárias para os circuitos internos

As respostas apresentadas na Tabela 3 estão associadas a funções do produto TT&C e estão representadas em um diagrama DFD conforme mostrado na Figura 5.

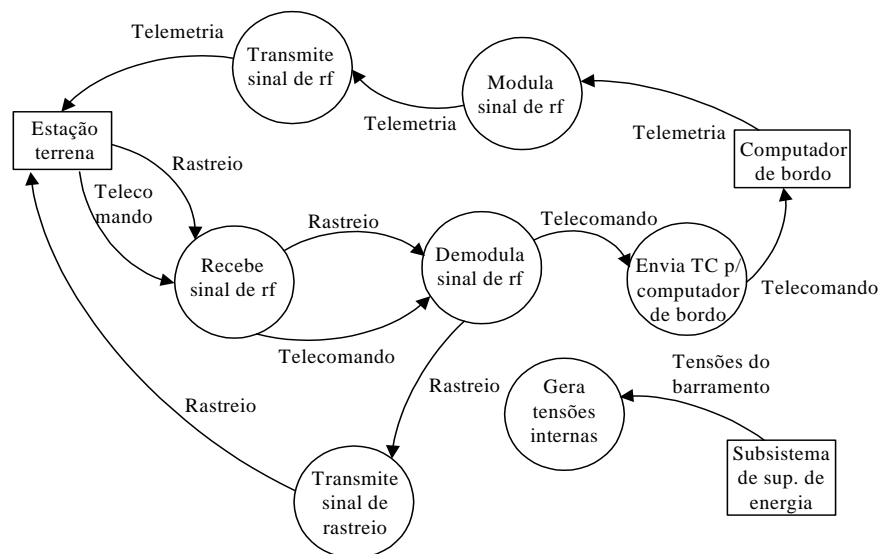


Figura 5. Decomposição Funcional do TT&C.

É feita análise de criticalidade e de modos de falhas (FMECA) considerando a decomposição funcional do produto no diagrama da Figura 5. Para cada falha identificada são apontadas sua causa e sua consequência e são atribuídos valores para gravidade, probabilidade de ocorrência e dificuldade de detecção. O risco envolvido é então calculado como o produto desses três parâmetros. A Tabela 4 resume os resultados obtidos e aponta uma solução, quando houver, para o problema. Note-se, por exemplo, que a perda de comunicação decorrente da falha na antena é considerada como falha catastrófica, sem solução, portanto (Loureiro, 2009).

Tabela 4. FMECA.

Falha	Causa	Consequência	Gravidade 1 – 5	Probabilidade 1 – 5	Dificuldade de detecção 1 – 3	Risco $R=G*P*D$	Solução
Não recebe TC	Falha na antena	Perda de comunicação	5	1	2	10	Falha catastrófica
Não demodula TC recebido da estação terrena	Falha em circuito do receptor	Telecomando não é processado	4	1	1	4	Usar unidade redundante
Não envia TC p/ OBDH	Falha em circuito de interface	Telecomando não é processado	4	1	1	4	Usar unidade redundante
Não modula TM recebida do computador de bordo	Falha em circuito modulador	Estação terrena não recebe TM	4	1	4	4	Usar unidade redundante
Não transmite TM p/ estação terrena	Falha em circuitos do transmissor	Estação terrena não recebe TM	4	1	1	4	Usar unidade redundante
Não recebe sinal de rastreo	Falha na antena	Perda do rastreo	5	1	2	10	Falha catastrófica
Não retransmite sinal de rastreo p/ estação terrena	Falha em circuitos do transmissor	Dificuldades no rastreo	3	1	1	3	Usar redundância ou técnicas alternativas
Parâmetros de desempenho fora da especificação	Falhas no EGSE	Impossibilidade de testar o TT&C	1	2	1	2	Fazer teste manualmente
Tensões secundárias fora da especificação	Problema nos conversores DC/DC	Degradação de funções do TT&C	4	1	2	8	Usar unidade redundante

4. Análise Física

Nesta seção a arquitetura funcional do TT&C obtida na seção anterior é traduzida em uma arquitetura física identificando cada um de seus elementos e destacando a interação entre eles (Loureiro, 2009). O diagrama da Figura 6 é um diagrama FBD (Function Block Diagram) onde o produto TT&C ocupa o centro e está circundado por terminadores que representam elementos do ambiente. As conexões do diagrama representam conexões físicas.

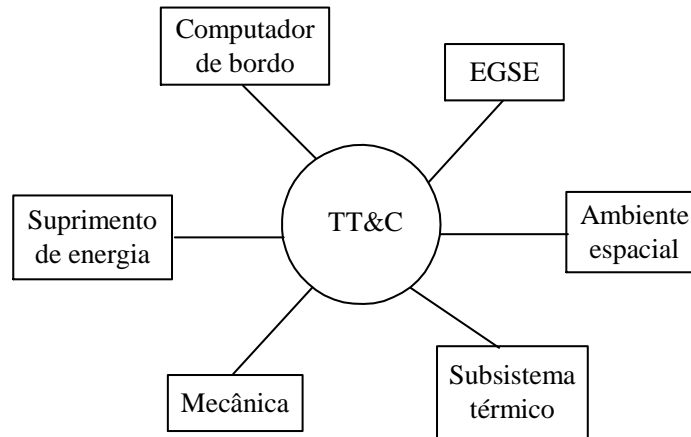


Figura 6. Conexões Físicas do TT&C com o Ambiente.

O diagrama da Figura 6 é expandido para destacar as partes componentes do TT&C e as relações entre elas. O diagrama DFD da Figura 7 representa a interconexão física entre os componentes do produto bem como entre cada componente e os elementos do ambiente. Fluxos de dados, de energia ou de material são indicados com o sentido das setas.

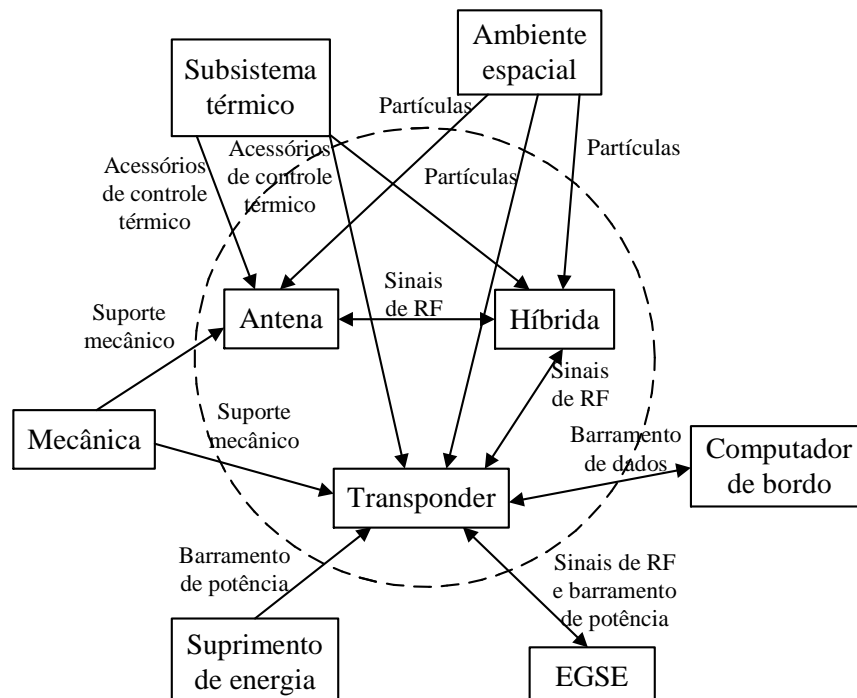


Figura 7. Diagrama de Interconexão.

O subsistema TT&C com suas partes componentes é representado em um diagrama de blocos como o da Figura 8. Note-se que diplexador, transmissor e receptor constituem o Transponder (Rodrigues, Gonçalves, 2005).

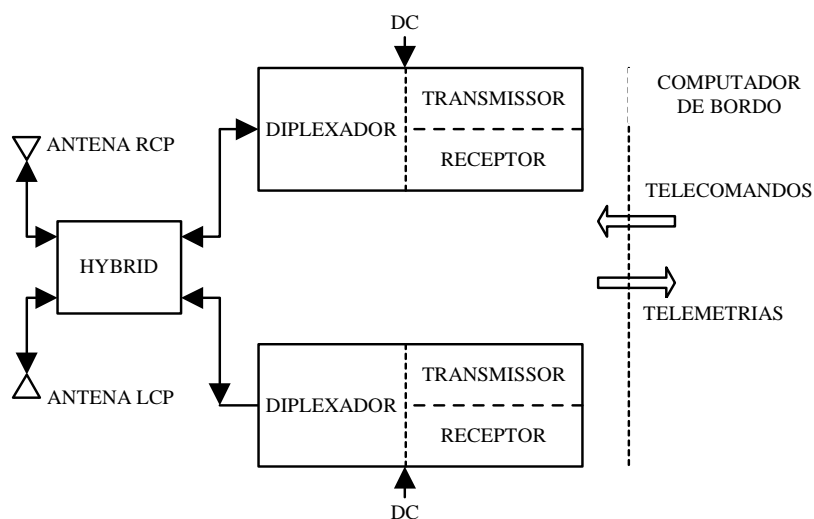


Figura 8. Diagrama de Blocos do TT&C.

A Tabela 5 é uma matriz de alocação do produto TT&C, isto é, uma tabela que identifica que parte componente do produto é responsável por desempenhar qual função. Pode-se notar claramente o transponder como o item que desempenha o papel principal sem, no entanto, deixar de observar a importância das antenas e da híbrida.

Tabela 5. Tabela de Alocação Funcional.

Função	Transponder	Antenas	Híbrida
Receber telecomando da estação terrena	X	X	
Demodular TC recebido	X		
Enviar telecomando p/ computador de bordo	X		
Modular telemetria recebida do computador de bordo	X		
Transmitir telemetria p/ estação terrena	X	X	
Receber sinal de rastreamento da estação terrena	X	X	
Retransmitir sinal de rastreamento p/ estação terrena	X	X	
Prover parâmetros de funcionais de desempenho	X		
Prover tensões secundárias	X		
Prover redundância	X		X

5. Conclusão

Este trabalho considerou o desenvolvimento de um subsistema de telemetria, telecomando e rastreamento para aplicação em satélites a partir da abordagem de engenharia de sistemas (NASA, 2007). Especificamente utilizando o método de análise estruturada proposto por Loureiro (1999). A partir de requisitos técnicos do produto originados dos interesses dos stakeholders foi obtida uma arquitetura funcional para o produto TT&C cujas funções, depois de identificadas, foram alocadas em partes componentes físicas.

Foi dado destaque às medidas de efetividade identificadas para verificar o interesse dos stakeholders na análise dos requisitos e também à análise de criticidade e de modos de falhas como parte da análise funcional.

A abordagem de engenharia de sistemas permitiu uma melhor compreensão do produto como um todo porque oferece uma visão ampla de todas as etapas do ciclo de vida desde os interesses dos stakeholders até a arquitetura física do produto.

6. Referência

CBERS 3&4 Satellite Specification, RB-HDS-0023. Rev. 01. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2005.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Disponível em: <www.inpe.br>. Acesso em: 01 mar 10.

Loureiro, G. “Curso de Introdução à Engenharia de Sistemas Espaciais”, CSE-201-4. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Material de Aula, 2009.

Loureiro, G., “Systems Engineering and Concurrent Engineering Framework for the Development of Complex Products”. Loughborough, UK, 1999.

Marca, D. A., McGowan, C. L., “SADT: Structured Analysis and Design Technique”. McGraw-Hill, New York, 1987.

NASA System Engineering Handbook. National Aeronautics and Space Administration – NASA. Washington, 2007.

Rodrigues, J. A., Gonçalves, C. A. B., TTCS Subsystem Specification, RBE-HDS-0005. Ver. 03. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2005.

Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres – CBERS. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/>>. Acesso em: 01 mar 10.

Yourdon, E., “Modern Structured Analysis”. Yourdon press, New Jersey, 1989.