

Uma análise de falhas e de seus tratamentos para melhorar a disponibilidade de uma estação terrena de TT&C

Aureliano Magalhães de Sousa Neto¹, Marcelo Lopes de Oliveira e Souza² e Cristiane Mariano Zavati Silva²

¹Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE), ²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo — Estações Terrenas de Rastreamento, Telemetria e Telemando (*Telemetry, Tracking and Command - TT&C*) são essenciais para monitorar e controlar satélites e seus subsistemas. Entretanto, como sistemas complexos, estão sujeitas a falhas que podem comprometer comunicações e missões espaciais. Este trabalho analisou históricos de falhas e manutenções em uma estação terrena de TT&C entre abril de 2024 e abril de 2025, visando identificar deficiências e propor melhorias. O estudo envolveu tratamento de dados, construção de Diagramas de Pareto e aplicação de métodos de Análise de Risco, como a Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) e a Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falhas (FMECA). A partir dos resultados, foram propostas ações para aumentar a robustez e a disponibilidade da estação, com potencial de adaptação a outras infraestruturas semelhantes. Assim, o trabalho contribui para fortalecer a dependabilidade de operações espaciais, tema ainda pouco explorado na literatura técnica.

I. INTRODUÇÃO

Estações terrenas de TT&C são fundamentais para o monitoramento e controle dos segmentos espaciais e, em algumas arquiteturas de missão, podem ainda receber dados de missão (*payload*), desempenhando, desta forma, dupla função. Como mostrado na Figura 1, essas estações possibilitam todo o fluxo de telemetrias e telemandos entre o centro de controle (*mission operations system*) e o segmento espacial (*spacecraft*) [1].

Apesar de sua importância, elas são suscetíveis a malfunçamentos que podem comprometer a missão espacial.

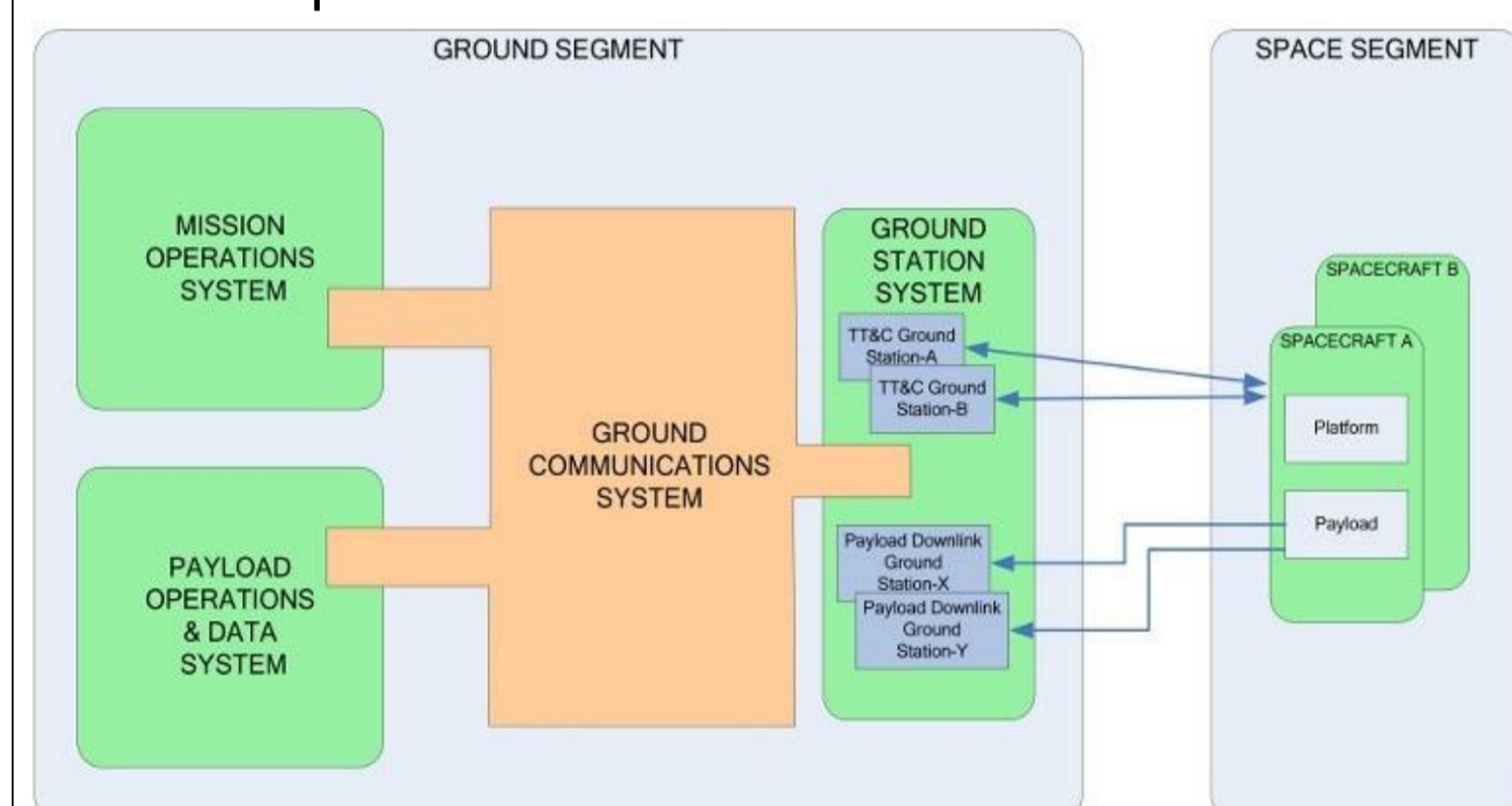


Fig. 1 – Ground segment systems [2].

Diante desse contexto, neste trabalho é feita uma análise de falhas e de seus tratamentos visando aumentar a disponibilidade de uma estação terrena de TT&C específica, baseando-se nos históricos de falhas e manutenções ocorridas entre abril de 2024 e abril de 2025 e empregando ferramentas como o diagrama de Pareto e os métodos FMEA e FMECA. Dessa forma, busca-se oferecer subsídios técnicos para a implementação de medidas que aumentem a robustez e a disponibilidade do sistema analisado.

II. METODOLOGIA

1. Análise da arquitetura da estação analisada, 2. Coleta de históricos de falhas e manutenções,
3. Filtragem de registros irrelevantes, 4. Classificação das falhas por equipamento,
5. Aplicação dos Diagramas de Pareto, 6. Análise das falhas por FMEA e FMECA, e
7. Proposição de plano de ação.

III. ARQUITETURA DE UMA ESTAÇÃO TERRENA DE TT&C

Uma estação terrena de TT&C pode ser compreendida como uma associação de *softwares*, equipamentos eletrônicos e sistemas mecânicos que permitem a movimentação da antena para o rastreamento do segmento espacial, a recepção de telemetrias e o envio de telemandos. A Figura 2 representa a estação terrena de TT&C que foi analisada neste trabalho, por meio de diagrama de blocos.

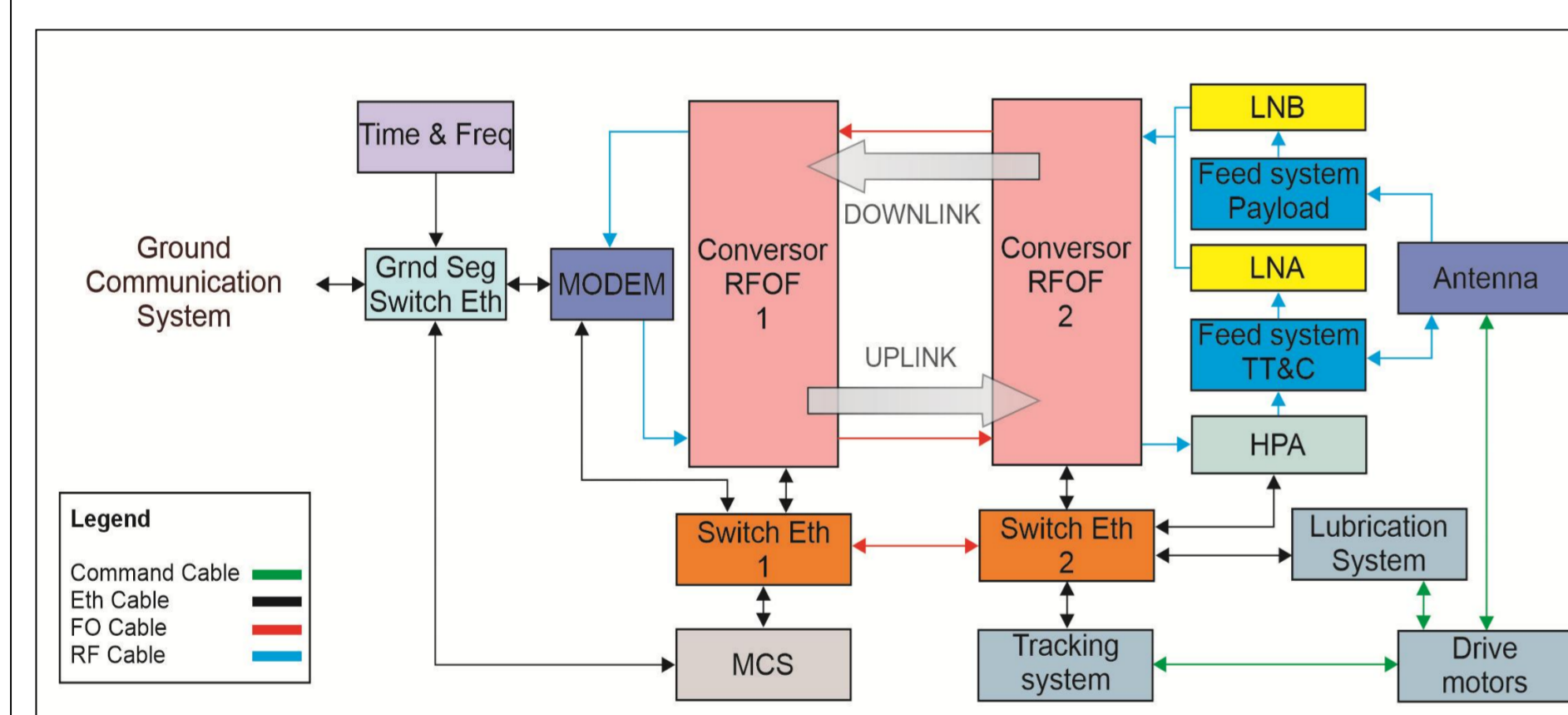


Fig. 2 – Diagrama da estação terrena de TT&C analisada. Inspiração em [3].

Trata-se de uma solução do tipo *Commercial Off-The-Shelf (COTS)*, baseada em componentes comerciais amplamente disponíveis no mercado, adequando-se às principais normas do setor espacial com vistas a garantir a interoperabilidade entre sistemas de diferentes países e reduzindo a necessidade de se desenvolver sistemas personalizados e caros para cada nova missão espacial [4].

IV. ANÁLISE ESTATÍSTICA PRELIMINAR: DIAGRAMAS DE PARETO

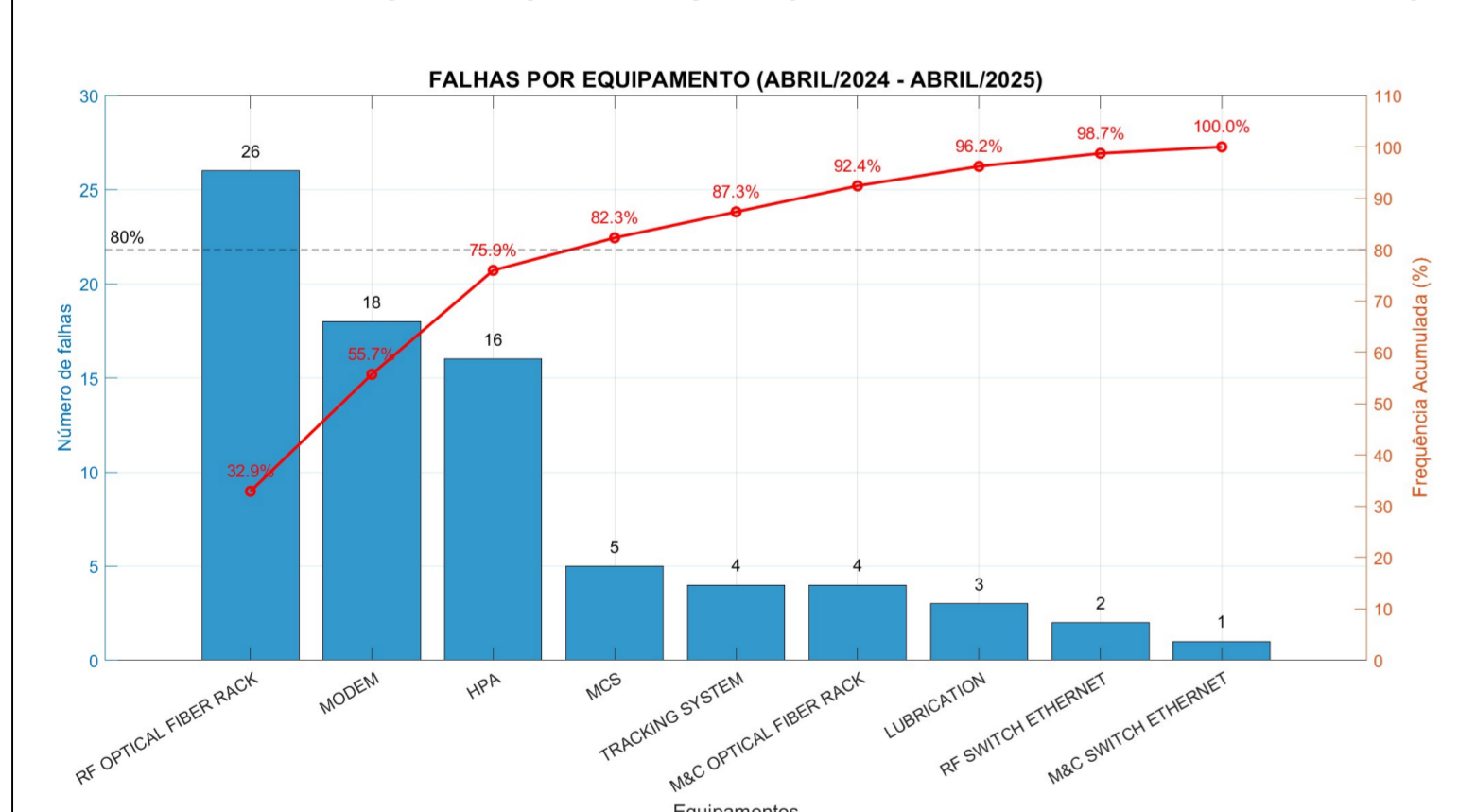


Fig. 3 – Diagrama de Pareto: falhas totais por equipamento.

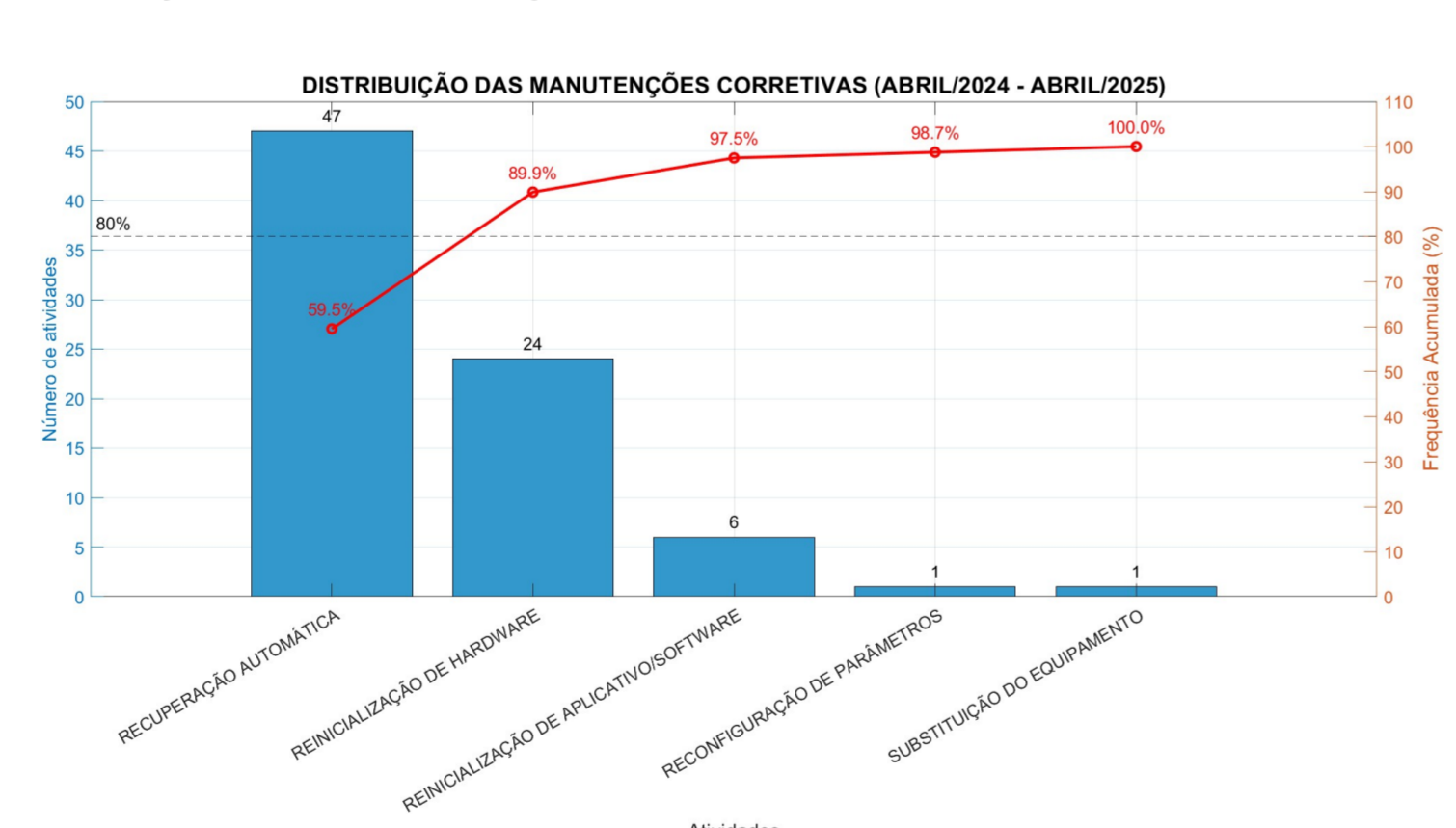


Fig. 4 – Diagrama de Pareto: manutenções corretivas.

V. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA E FMECA

Todos os parâmetros relacionados foram classificados em cinco categorias, de maneira análoga ao que é adotado na norma *Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification (DO-178C)*, da Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), reconhecida internacionalmente, por sua análise da criticidade de falhas [5].

Tabela 1 – Classificação da Severidade por tipo de falha. Inspiração em [5].

SEVERIDADE (S)	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO AFETADA	MOMENTO DA FALHA
Nula	Nenhum impacto. Falha informativa. Sobressalente e reparo não se aplicam.	Nenhuma.	Fora ou durante a janela de passagem de algum satélite.
Baixa	Falha em função com redundância ativa sem impacto imediato. Sobressalente disponível, reparo rápido.	Transmissão ou recepção (redundante).	Fora ou durante a janela de passagem de algum satélite.
Moderada	Pode afetar operação futura; sobressalente disponível ou reparo em tempo razoável minimiza impacto.	Transmissão ou recepção (não redundante).	Fora da janela de passagem de algum satélite.
Alta	Impacto transmissão/recepção durante a janela de passagem. Sobressalente pode estar indisponível e reparo pode ser demorado.	Transmissão ou recepção (não redundante).	Durante a janela de passagem de algum satélite.
Crítica	Perda total de comunicação, sem sobressalente disponível e reparo longo.	Transmissão e recepção.	Durante a janela de passagem de algum satélite.

Tabela 2 – Classificação da Frequência de Ocorrência. Inspiração em [5].

OCORRÊNCIA (O)	QUANTIDADE DE OCORRÊNCIAS NO PERÍODO	DESCRIÇÃO
Nula	0	Nunca ocorreu.
Baixa	1 - 5	Ocorre raramente.
Moderada	6 - 10	Pode ocorrer ocasionalmente.
Alta	11 - 20	Ocorre com frequência.
Crítica	> 20	Ocorre com muita frequência.

Tabela 3 – Classificação da Indetectabilidade. Inspiração em [5].

INDETECTABILIDADE (I)	DESCRIÇÃO
Nula	O sistema detecta a falha imediatamente e com alta precisão. Alerte claro e específico.
Baixa	O sistema detecta a falha de forma automática, mas com informações limitadas ou ambíguas.
Moderada	O sistema detecta sintomas ou falhas secundárias, mas não a causa raiz.
Alta	A compreensão do alarme exige correlação manual de dados do sistema.
Crítica	A falha não é clara, só é percebida por perda de funcionalidade em outros equipamentos.

Tabela 4 – Classificação do Risco Inicial. Inspiração em [5].

RISCO INICIAL (RI)	EXPRESSÃO
Nula	((O ≤ BAIXA) E (S = NULA)) OU ((O = NULA) E (S ≤ BAIXA))
Baixa	((O = NULA) E (S = MODERADA)) OU ((O = BAIXA) E (S = BAIXA)) OU ((O = MODERADA) E (S = NULA))
Moderada	((O = NULA) E (S = ALTA)) OU ((O = BAIXA) E (S = MODERADA)) OU ((O = MODERADA) E (S = BAIXA)) OU ((O = ALTA) E (S = NULA))
Alta	((O = NULA) E (S = CRÍTICA)) OU ((O = BAIXA) E (S = ALTA)) OU ((O = MODERADA) E (S = MODERADA)) OU ((O = ALTA) E (S = BAIXA)) OU ((O = CRÍTICA) E (S = NULA))
Muito Alta	((O = BAIXA) E (S = CRÍTICA)) OU ((O = MODERADA) E (S = ALTA)) OU ((O = ALTA) E (S = MODERADA)) OU ((O = CRÍTICA) E (S = BAIXA))

Tabela 5 – Classificação do Grau de Prioridade de Risco. Inspiração em [5].

GRAU DE PRIORIDADE DE RISCO (GPR)	EXPRESSÃO
Nula	((I = NULA) E (RI ≤ BAIXA)) OU ((RI = NULA) E (I ≤ BAIXA))
Baixa	((I = MODERADA) E (RI = NULA)) OU ((RI = BAIXA) E (I = BAIXA)) OU ((RI = MODERADA) E (I = NULA))
Moderada	((RI = BAIXA) E (I = MODERADA)) OU ((RI = NULA) E (I = ALTA)) OU ((RI = MODERADA) E (I = BAIXA)) OU ((RI = ALTA) E (I = NULA))
Alta	((RI = NULA) E (I = CRÍTICA)) OU ((RI = BAIXA) E (I = ALTA)) OU ((RI = MODERADA) E (I = MODERADA)) OU ((RI = ALTA) E (I = BAIXA)) OU ((RI = CRÍTICA) E (I = NULA))
Muito Alta	((RI = BAIXA) E (I = CRÍTICA)) OU ((RI = MODERADA) E (I = ALTA)) OU ((RI = ALTA) E (I = MODERADA)) OU ((RI = CRÍTICA) E (I = BAIXA))

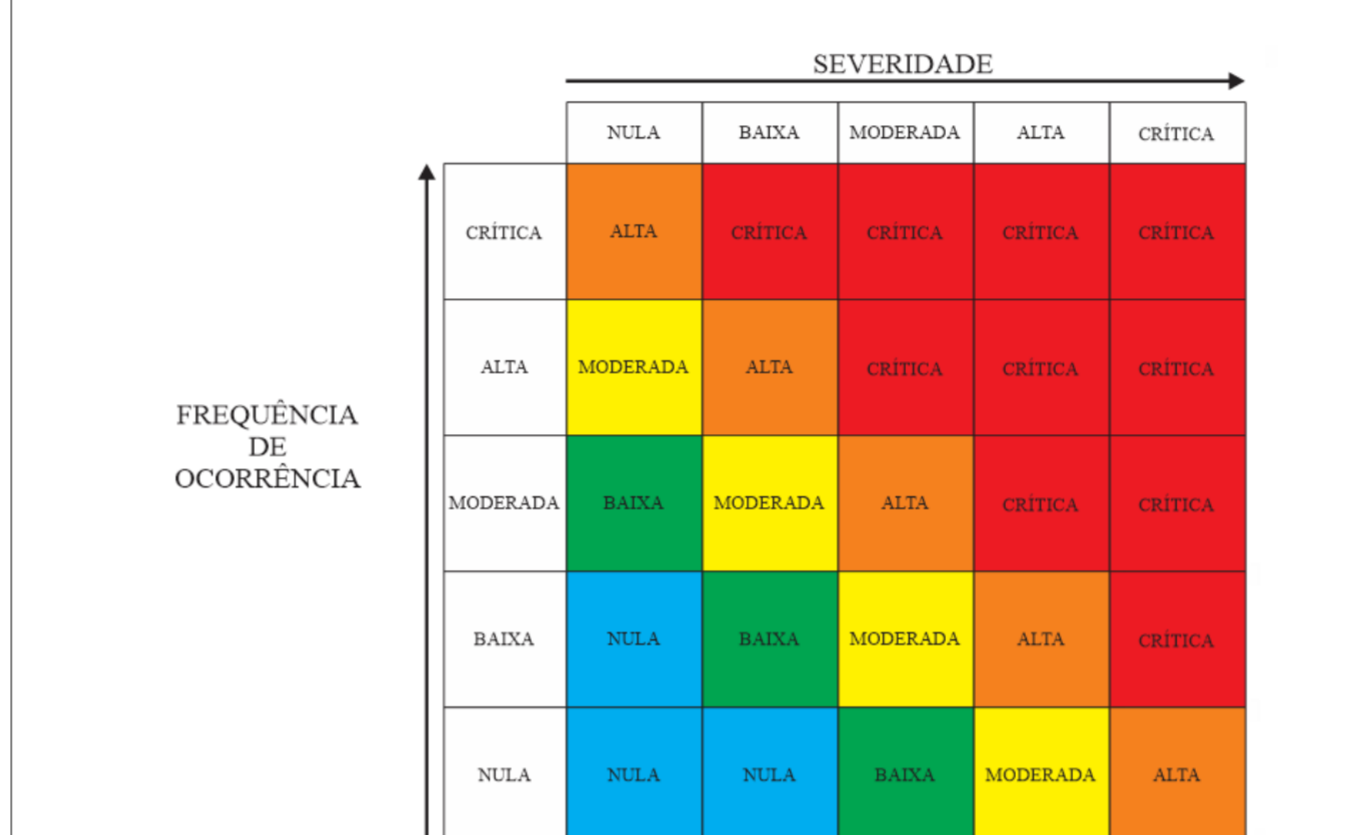


Fig. 5 – Matriz de Risco Inicial. Inspiração em [6].

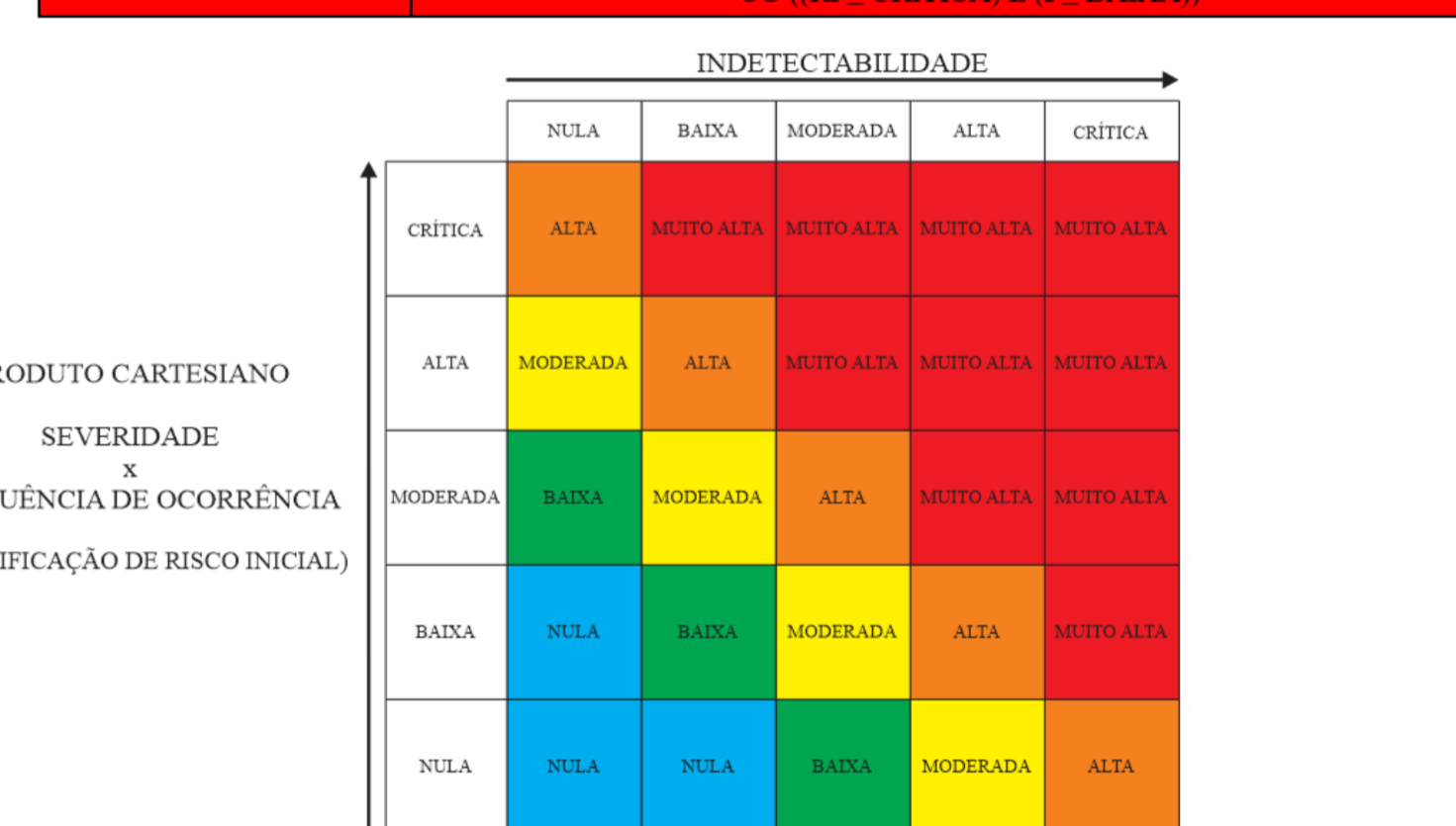


Fig. 6 – Matriz de criticidade. Inspiração em [6].

VI. AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE OPERACIONAL COM BASE NAS FALHAS REGISTRADAS

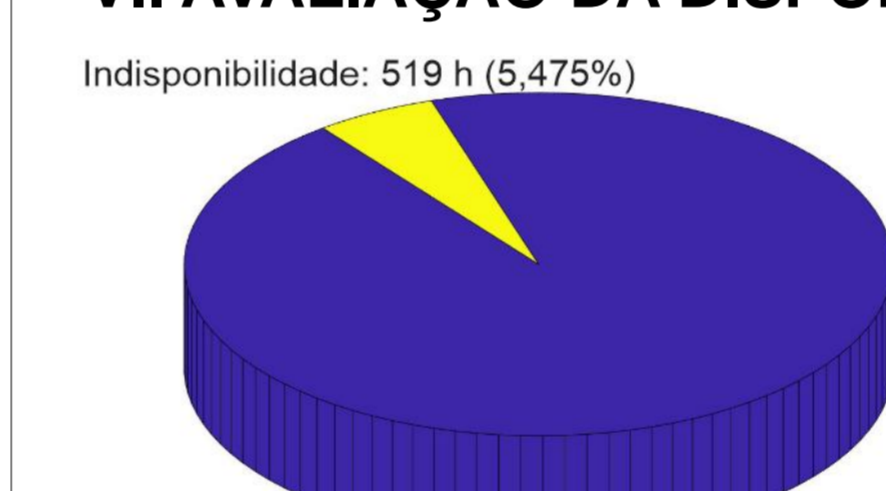


Fig. 7 – Disponibilidade Operacional registrada.

Durante as 9.480 horas de operação, registrou-se um tempo de indisponibilidade de aproximadamente 519 horas, sendo a maior parte das falhas associada à inoperância de ativos de rede. Para fins de comparação, empresas que oferecem serviços comerciais via satélite, como [7], adotam como requisito mínimo de desempenho uma disponibilidade operacional de 99,999%.

VII. RESULTADOS

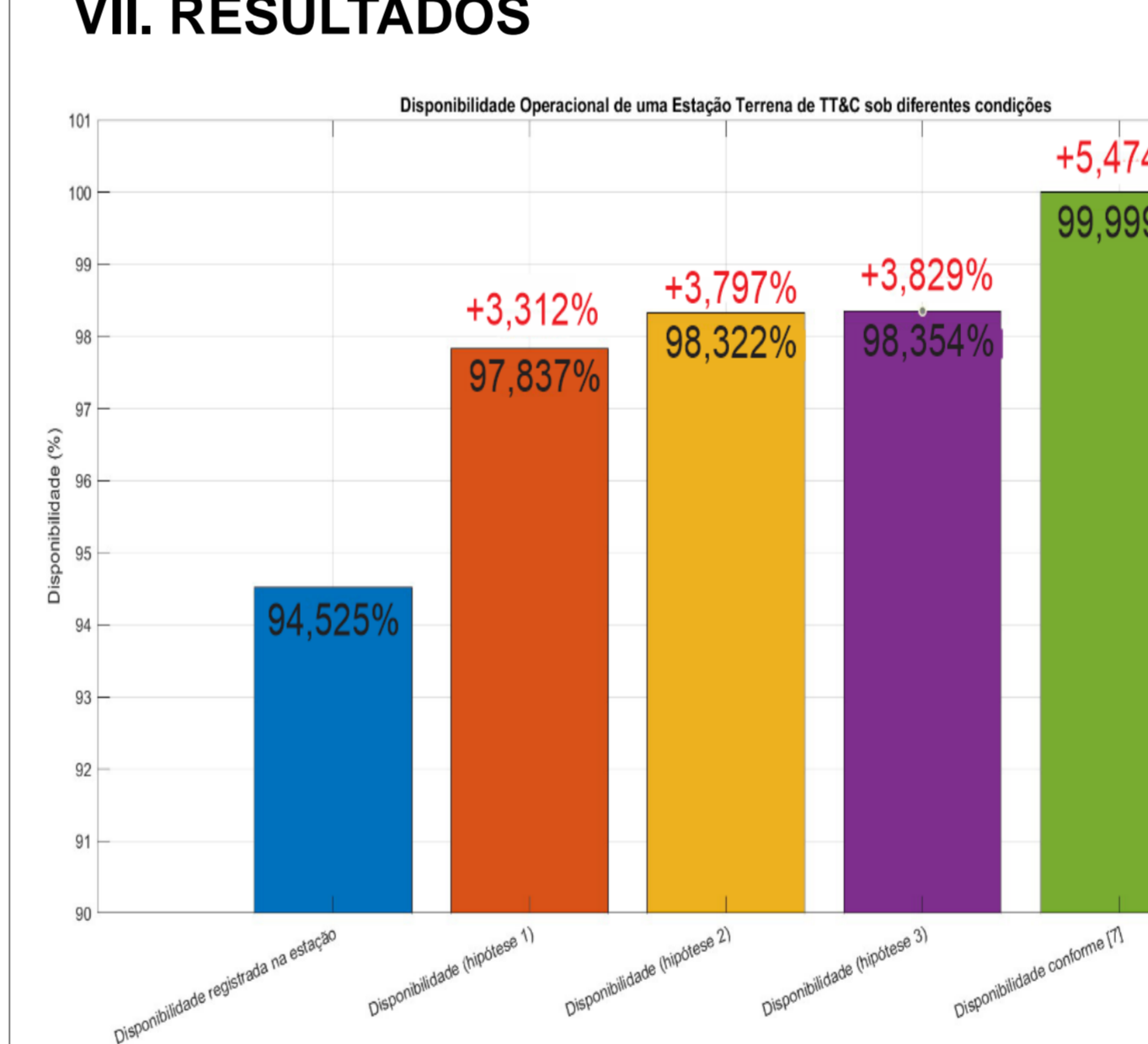


Fig. 8 – Disponibilidade operacional em diferentes condições.

- **Hipótese 1:** *Switch Eth 2 cold spare* disponível na estação no momento em que a falha aconteceu. Disponibilidade real: 8.961h (94,525%) x Projetada: 9.275h (97,837%).
- **Hipótese 2:** além da existência de um *Switch Eth 2 cold spare* disponível na estação, foi considerada a existência de arquivos de configuração e credenciais de acesso para correção do mau funcionamento observado no *Switch Eth 1*. Disponibilidade real: 8.961h (94,525%) x Projetada: 9.321h (98,322%).
- **Hipótese 3:** existência de redundância 1 + 1 para *Switch Eth 1* e *Switch Eth 2* em momento anterior a todas as falhas de maior impacto. Disponibilidade real: 8.961h (94,525%) x Projetada: 9.324h (98,354%).

VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida através dos Diagramas de Pareto e da FMEA/FMECA são importantes, porque permitem a alocação de recursos (econômicos e humanos) de forma mais eficiente. Sistemas que contam com o suporte de recuperação automática de falhas têm contribuído significativamente para reduzir a necessidade de intervenção humana; no entanto, estratégias adicionais, como a utilização de redundância a quente (*hot standby*) e a aquisição de equipamentos sobressalentes (*cold spares*), são fundamentais para minimizar a indisponibilidade operacional. Adicionalmente, foi possível observar que falhas decorrentes de erros operacionais ou de comunicação entre equipes contribuíram para ampliar o tempo de indisponibilidade em situações específicas. Isso evidencia a necessidade de revisão contínua dos procedimentos operacionais, realização de treinamentos de reciclagem e fortalecimento da integração entre equipes técnicas, operacionais e de manutenção.

REFERÊNCIAS

1. NEJAD, B. *Introduction to satellite ground segment systems engineering: principles and operational aspects*. Cham: Springer, 2023, 273 p. ISBN 9783031159008.
2. EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. *ECSS-E-ST-70C: Space Engineering: Ground Systems and Operations*. Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 31 July 2008.
3. ROSHINI, Y. *Earth station*. Electronics Desk, 2022. Disponível em: <https://electronicsdesk.com/earthstation.html>. Acesso em: 13 abr. 2025.
4. WERTZ, J. R.; EVERETT, D. F.; PUSCHELL, J. J. *Space mission engineering: the new SMAD*. Portland, OR: Microcosm Press, 2011.
5. RTCA. *DO-178C - Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification*. Washington, D.C.: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2011.
6. RABELLO, A. P. S. S. *Um novo processo para melhorar a dependabilidade de sistemas espaciais entre as fases de planejamento e projeto detalhado, incluindo extensões do Diagrama de Markov (DMEP) e da FMECA (FMPE) a Projetos*. Tese (Doutorado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3MP6RNL>. Acesso em: 15 junho 2025.
7. TELECOMUNICAÇÕES BRASILEIRAS S.A. *Anexo D5 - Compromissos mínimos de rede*. Minuta. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.telebras.com.br/wpcontent/uploads/2019/08/ANEXO_D_Compromissos_Minimos_de_Rede.pdf. Acesso em: 2 ago. 2025.