

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Rafael Purim de Azevedo**

**ANÁLISE DE MÉTRICAS PARA VALIDAÇÃO DE  
SIMULAÇÃO SISTÊMICA**

Trabalho de Graduação  
2022

**Curso de Engenharia Aeroespacial**

**Rafael Purim de Azevedo**

**ANÁLISE DE MÉTRICAS PARA VALIDAÇÃO DE  
SIMULAÇÃO SISTÊMICA**

Orientador

Prof. Dr. Christopher Schneider Cerqueira (ITA)

**ENGENHARIA AEROESPACIAL**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

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

Purim de Azevedo, Rafael  
Análise de métricas para validação de simulação sistêmica / Rafael Purim de Azevedo.  
São José dos Campos, 2022.  
33f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeroespacial– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022. Orientador: Prof. Dr. Christopher Schneider Cerqueira.

1. Métricas (software). 2. Simulação. 3. Engenharia de sistemas. 4. Engenharia Aeroespacial. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

PURIM DE AZEVEDO, Rafael. **Análise de métricas para validação de simulação sistêmica**. 2022. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

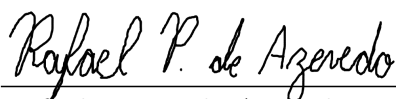
## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Rafael Purim de Azevedo

TÍTULO DO TRABALHO: Análise de métricas para validação de simulação sistêmica.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2022

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



---

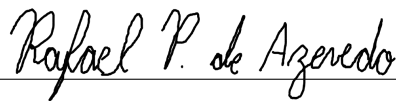
Rafael Purim de Azevedo

Rua H8B, 202

12.228-461 – São José dos Campos–SP

# ANÁLISE DE MÉTRICAS PARA VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÃO SISTÊMICA

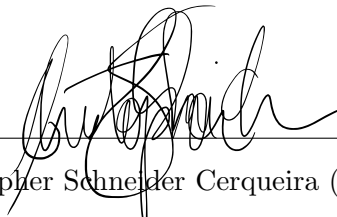
Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



---

Rafael Purim de Azevedo

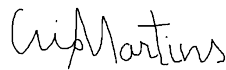
Autor



---

Christopher Schneider Cerqueira (ITA)

Orientador



---

Prof. Dra. Cristiane Aparecida Martins  
Coordenadora do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, 23 de novembro de 2022.

A minha família, que sempre me apoiou.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades que Ele me tem concedido.

Agradeço também à minha família que sempre me apoia nos meus estudos.

Agradeço ao ITA, pela formação que me foi dada.

Agradeço também aos meus colegas da turma 2021 do ITA, com os quais enfrentei essa jornada. Em especial, agradeço a companhia dos meus colegas de quarto no H8B202, Felipe Bastos, Felipe Mourad, Kelven Chen, Ocimar Mota, Francisco de Assis, Artur Souto e Lucas Maia, e a outros colegas especiais, Leonardo Mouta, Rodrigo Monteiro, Pedro Elardenberg, que compartilham meu interesse por humanidades, e Lucas Germano, Leonardo Domingos e Victória Cogo, com os quais, juntamente com Felipe Bastos, mas em momentos diferentes, dividi vários relatórios.

*“Porque o Senhor dá a sabedoria, e da sua boca vem a inteligência e o entendimento.”*

— PROVÉRBIOS 2:6 ALMEIDA REVISTA E ATUALIZADA

# Resumo

No desenvolvimento de sistemas complexos, um dos processos é o de Verificação e Validação. O uso da simulação é um dos métodos para provar que sistemas foram construídos da maneira certa, e para o propósito correto. Uma das dificuldades é descobrir como alinhar as métricas de sucesso do sistema com os resultados da simulação. Este trabalho visa estudar essa associação entre as métricas de sucesso e os resultados de simulações de sistemas complexos.



# Abstract

In the development of complex systems, one of the processes is Verification and Validation. The use of simulation is one of the methods to prove that systems were built in the right way, and for the right purpose. One of the difficulties is figuring out how to align the system's success metrics with the simulation results. This work aims to study this association between success metrics and the results of simulations of complex systems.

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Relação entre os quatro tipos de medidas técnicas definidas nessa seção. (ROEDLER; JONES, 2005) . . . . .	19
FIGURA 2.2 – Medidas técnicas associadas ao Modelo V de desenvolvimento. (ROEDLER; JONES, 2005) . . . . .	20
FIGURA 3.1 – Relação das métricas de sucesso em uma simulação. . . . .	25
FIGURA 3.2 – Fluxograma para determinação das medições técnicas a partir dos requisitos de sistema. . . . .	26
FIGURA 3.3 – Fluxograma para a determinação das medições técnicas a partir de uma simulação. . . . .	27
FIGURA 4.1 – Resultado da simulação do FireSat em 2D.(NADA, a) . . . . .	29
FIGURA 4.2 – Resultado da simulação do FireSat em 3D.(NADA, a) . . . . .	30

# Lista de Tabelas

TABELA 4.1 – Requisitos dos sistema usados nesse exemplo. . . . .	28
TABELA 4.2 – Coordenadas do ponto de observação na Terra. . . . .	29
TABELA 4.3 – Dados do satélite em questão. (LIMA <i>et al.</i> , 2021) . . . . .	29

# Lista de Abreviaturas e Siglas

MOE	Medida de Eficiência
MOP	Medida de Performance
TPM	Medidas de Performance Técnicas
KPP	Parâmetro-chave de Performance
INCOSE	International Council on Systems Engineering

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	Motivação . . . . .	14
1.2	Organização do trabalho . . . . .	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	16
2.1	Medidas de Eficiência (MOEs) . . . . .	16
2.2	Medidas de Performance (MOPs) . . . . .	17
2.3	Medidas de Performance Técnica (TPMs) . . . . .	17
2.4	Parâmetros-chave de Performance (KPPs) . . . . .	17
2.5	A relação entre MOEs, MOPs, TPMs, KPPs . . . . .	18
2.6	Medidas técnicas no modelo V . . . . .	19
3	SOBRE A ESCOLHA DAS MÉTRICAS DE SUCESSO . . . . .	21
3.1	Definição de MOEs e KPPs . . . . .	21
3.2	Definição de MOPs . . . . .	22
3.3	Definição de TPMs . . . . .	23
3.4	Métricas em simulação . . . . .	25
4	APLICAÇÃO . . . . .	28
4.1	Exemplo 1: FireSat . . . . .	28
4.1.1	Sobre o FireSat . . . . .	28
4.1.2	Aplicação na simulação STK . . . . .	28
4.2	Exemplo 2: Míssil . . . . .	30
5	CONCLUSÃO . . . . .	32

---

REFERÊNCIAS . . . . . 33

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

O pensamento voltado para a engenharia de sistemas já é praticado a vários séculos, mesmo que isso tenha acontecido principalmente por intuição e por heurística (SYSTEMS..., ). Esse conhecimento prático eventualmente evoluiu em ferramentas e práticas recorrentes para a aplicação para domínios específicos. Atualmente, a engenharia de sistemas tem uma base teórica mais consolidada e aumentou a quantidade de ferramentas, práticas e padrões utilizados, como por exemplo, a engenharia de sistemas baseada em modelos, uso de Inteligência Artificial e técnicas de aprendizado de máquina, e uso de Simulações (SYSTEMS..., ).

O uso de simulações é uma das maneiras de mostrar que o sistema construído foi feito corretamente (verificação) e se o sistema construído atende às necessidades dos *stakeholders* (validação). Por causa disso, torna-se necessário relacionar as métricas de sucesso do sistema com os resultados das simulações, para que os sistemas possam ser verificados e validados com confiabilidade. Esse trabalho visa estudar, a partir do manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005) alguns tipos de métricas, e como essas métricas se relacionam com simulações. Esse trabalho também visa exemplificar como essa relação entre as medições técnicas e as simulações ocorre.

## 1.2 Organização do trabalho

A organização deste trabalho é explicada a seguir. No primeiro capítulo, foi apresentada a motivação para este estudo. O segundo capítulo usará o manual do *International Council on System Engineering* para a definição de quatro tipos de medições técnicas, além de sua relação com o modelo V, tradicional na engenharia de sistemas. No terceiro capítulo, será explorado como se definir cada uma dessas medições a partir da definição dos requisitos de sistema, e sua relação com simulações. O capítulo 4 apresentará dois exemplos de aplicação dos conceitos dos capítulos anteriores em duas simulações diferentes, um exemplo baseado na missão FireSat, e outro exemplo baseado na simulação de

---

um míssil genérico. E, por fim, o capítulo 5 será a conclusão deste trabalho.



## 2 Revisão Bibliográfica

Uma medição técnica é um conjunto de medições feitas com o propósito de mostrar de alguma maneira o desenvolvimento da solução técnica de um determinado problema, juntamente com os riscos e problemas associados (ROEDLER; JONES, 2005). As medições técnicas são definidas no começo do ciclo de vida do projeto e são realizadas no desenvolvimento da solução técnica do problema (ROEDLER; JONES, 2005). Essas medições são usadas para tomar melhores decisões ao longo do ciclo de vida do projeto, para garantir que os requisitos sejam cumpridos (ROEDLER; JONES, 2005). Para esse trabalho, se usará quatro tipos diferentes de medições, definidas a seguir, a saber, Medidas de Eficiência (Measures of Effectiveness - MOEs), Medidas de Performance (Measures of Performance - MOPs), Medidas de Performance Técnicas (Technical Performance Measures - TPMs), e Parâmetros-chave de Performance (Key Performance Parameters - KPPs).

### 2.1 Medidas de Eficiência (MOEs)

A Medida de Eficiência é a medida operacional de sucesso, ou seja, está relacionada com o resultado ou objetivo da missão, dentro das condições e especificidades determinadas. Em outras palavras, a MOE determina quão bem o sistema cumpre o seu propósito (ROEDLER; JONES, 2005).

As MOEs são determinadas sob o ponto de vista do usuário, e são usadas para comparar soluções alternativas, investigar a sensibilidade da performance do sistema de acordo com as mudanças nos parâmetros de entrada do sistema, definir os valores dos requisitos operacionais, avaliar a realização das principais performances operacionais, e, por fim, são usadas como o Padrão de Aceitação das soluções técnicas (*i.e.*, definem se o comprador pode aceitar a solução proposta ou não, de acordo com suas necessidades) (ROEDLER; JONES, 2005).

## 2.2 Medidas de Performance (MOPs)

A Medida de Performance mostra quão bem a solução atinge seu objetivo, dentro das condições determinadas. A MOP é relacionada com a MOE pelo fato de que MOPs são derivadas das MOEs, ou, alternativamente, as MOPs podem ajudar a identificar MOEs. As MOPs costumam ajudar na identificação dos KPPs e devem ser definidas a partir de elementos quantificáveis (ROEDLER; JONES, 2005).

As MOPs são usadas para comparar as soluções alternativas de um sistema, avaliando os impactos técnicos que as mudanças do sistema causariam; e ajudar a avaliar a sensibilidade do sistema a parâmetros de entrada (ROEDLER; JONES, 2005).

## 2.3 Medidas de Performance Técnica (TPMs)

As medidas de performance técnicas são atributos de medidas de um elemento do sistema para determinar quão bem esse elemento do sistema, ou o sistema como um todo, satisfaz, ou espera-se que satisfaça, um requisito técnico (ROEDLER; JONES, 2005).

As TPMs são relacionadas com as MOPs pelo fato de que TPMs são derivadas das MOPs, ou, alternativamente, as TPMs podem ajudar a identificar as MOPs. As TPMs são estimadas mais cedo no ciclo de vida do projeto, baseadas em simulações e modelagem, e são comparadas com dados reais a medida que o projeto é desenvolvido. Isso permite que medidas sejam tomadas em momentos anteriores aos de teste no ciclo de vida (ROEDLER; JONES, 2005).

As TPMs são usadas para prever os valores a serem atingidos pelos KPPs, identificar diferenças entre a performance esperada e a atingida, avaliar o progresso em se atingir os KPPs desejados, determinar a influência que a performance avaliada tem na efetividade do sistema, determinar riscos ou prever problemas, ou oportunidades de *tradeoff*, ajudar a avaliar alternativa de design de elementos do sistema e os impactos dessa mudança (ROEDLER; JONES, 2005).

## 2.4 Parâmetros-chave de Performance (KPPs)

Os parâmetros-chave de desempenho são o conjunto de parâmetros de performance que indicam características significativas ao ponto de que a falha em atingir esse parâmetros pode levar o conceito do sistema selecionado a ser reavaliado, ou que o projeto como um todo seja reavaliado ou encerrado (ROEDLER; JONES, 2005).

Os KPPs representam os requisitos críticos de performance, e têm um valor para o

limiar (mínimo/máximo) e um valor alvo, ou seja, o valor que se deseja atingir. Com eles, os *stakeholders* podem avaliar as decisões de arquitetura e design. São definidos no momento em que o conceito de operações e os requisitos são definidos. Além disso, algumas MOPs são selecionadas para fornecer *insights* no cumprimento dos KPPs (ROEDLER; JONES, 2005).

## 2.5 A relação entre MOEs, MOPs, TPMs, KPPs

Como dito anteriormente, as MOEs indicam a efetividade da solução, independente de qual solução particular foi escolhida para esse problema, enquanto as MOPs avaliam a performance da solução escolhida. Em outros termos, as MOEs são as medidas usadas para validar um sistema, enquanto as MOPs são usadas para verificá-lo (ROEDLER; JONES, 2005).

Com uma solução definida, e tendo-se em mente as medidas de alto nível, como as MOEs e as MOPs, estabelece-se as medidas de baixo nível, *ie*, MOPs e TPMs, de maneira que se possa tomar decisões em relação ao sistema e a operação. Ou seja, com frequência temos as TPMs sendo derivadas das MOPs, que por sua vez são derivadas das MOEs. Além disso, as KPPs costumam ser derivados das MOEs, e são influências importantes na escolha das MOPs, afinal, KPPs que não são cumpridas comprometem a entrega do processo, isto é, KPPs não cumpridas fazem com que o sistema não cumpra o seu objetivo. A figura 2.1 a seguir ilustra a relação entre as medições técnicas, além de destacar o aumento de detalhamento técnico a medida que o escopo da medida se torna menor (ROEDLER; JONES, 2005).

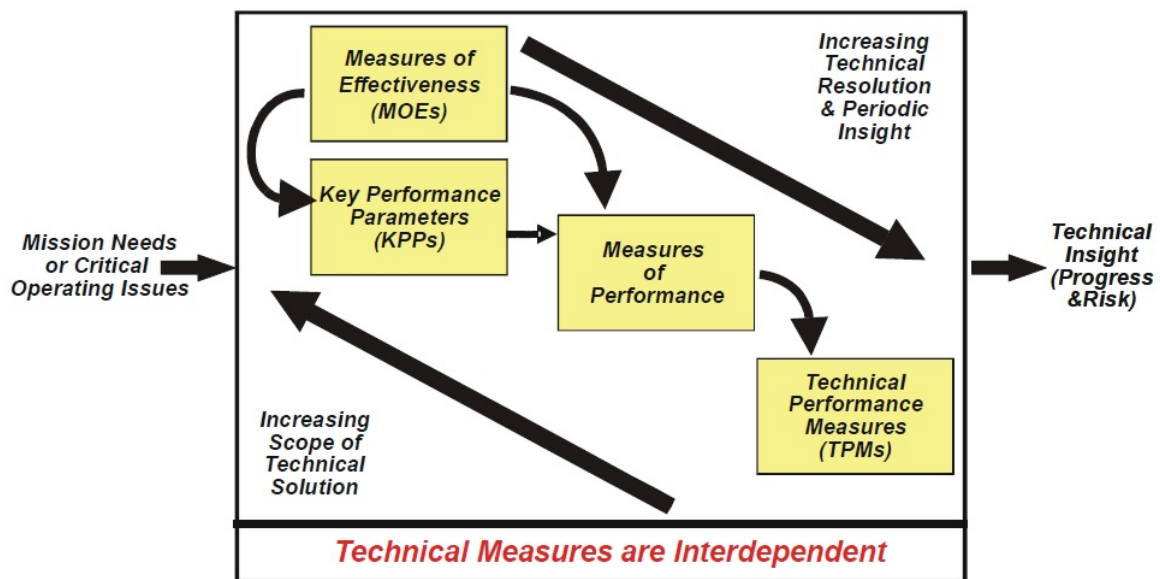


FIGURA 2.1 – Relação entre os quatro tipos de medidas técnicas definidas nessa seção. (ROEDLER; JONES, 2005)

Então, a título de exemplo, se solução para determinado problema militar for um míssil de longo alcance, uma de suas MOEs pode ser o seu alcance, que pode ser também um KPP, se esse alcance, ao não ser atingido, compromete a solução proposta. Desse MOE, pode-se definir alguns MOPs, entre eles, por exemplo, o empuxo desejado pelo *booster*. A partir disso, podem-se definir vários TPMs, como por exemplo a massa de propelente, tempo de queima, entre outros. Assim, nota-se que a medida que a resolução técnica das medidas se torna maior, o escopo diminui, como dito anteriormente.

## 2.6 Medidas técnicas no modelo V

As medidas técnicas descritas nessa seção também se relacionam com o modelo V. Como as MOEs estão associadas com a validação do sistema e as necessidades dos *stakeholders*, essa medida é aplicada no topo do modelo, fornecendo um valor quantificado para auxiliar na justificativa para as decisões tomadas no começo do projeto (relacionadas principalmente às aquisições), e para validar o sistema ao final do projeto (ROEDLER; JONES, 2005).

Já os KPPs são utilizados para definir os principais requisitos para se completar as MOEs, e também são usados para definir as MOPs. As MOPs devem ser medidas o mais cedo possível e ao longo de todo o projeto, de modo a verificar se o sistema cumpre requisitos técnicos (ROEDLER; JONES, 2005).

As TPMs são MOPs destrinchadas para que se possa medir e ter *insights* sobre o desenvolvimento técnico do projeto, sendo medidas através de análises, modelagem e

simulações, além de testes, quando chegar esse momento no ciclo de vida do projeto. Além disso, durante o desenvolvimento do projeto, pode-se estimar os valores das MOEs a partir das MOPs e das TPMs, para se ter algum indicativo de que as MOEs serão cumpridas (ROEDLER; JONES, 2005).

A figura 2.2 mostra a relação das medidas técnicas com o modelo V, como explicado acima. Perceba que as MOEs, MOPs e TPMs estão relacionadas tanto ao braço de desenvolvimento quanto ao braço de Verificação e Validação, isso porque essas medidas são inicialmente definidas baseadas em algumas suposições, e na segunda parte do modelo em V, essas medidas devem ser verificadas e validadas (ROEDLER; JONES, 2005).

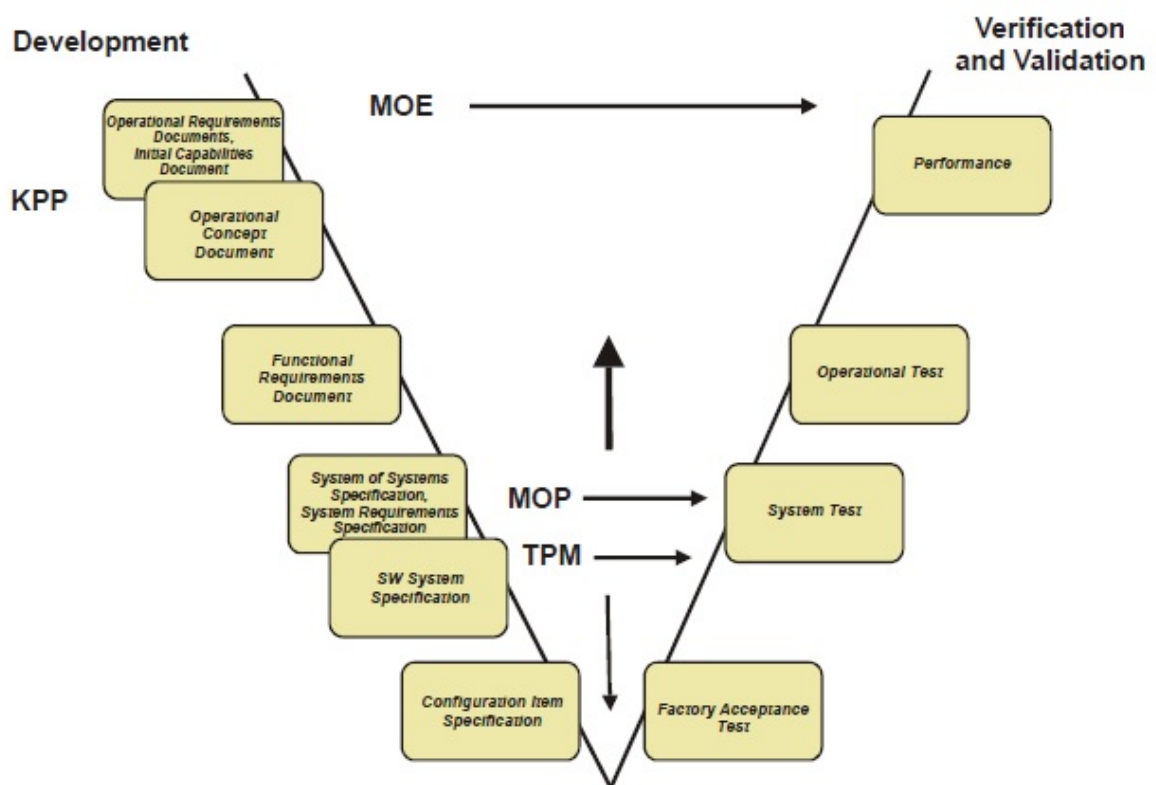


FIGURA 2.2 – Medidas técnicas associadas ao Modelo V de desenvolvimento. (ROEDLER; JONES, 2005)

## 3 Sobre a escolha das métricas de sucesso

Este capítulo tem o objetivo de propor, baseado no manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005), um caminho a ser seguido para a definição das medições técnicas. Entendendo-se as características particulares de cada uma das medidas, como exposto no capítulo anterior, pode-se trabalhar a partir dos requisitos de sistema com o propósito de discriminar as medições técnicas. Tendo-as bem definidas, elas podem ser usadas em simulações tanto para se avaliar o sucesso da missão, quanto para mostrar opções de *trade off* entre os requisitos técnicos.

### 3.1 Definição de MOEs e KPPs

Como explicado anteriormente, as MOEs estão intrinsecamente ligadas à validação do sistema, ou seja, estão ligadas à pergunta "o sistema resolve o problema?". Isso significa que a seleção dessa métrica depende muito dos requisitos da missão que o sistema deve cumprir, e também da visão dos próprios *stakeholders* sobre essa missão.

O próprio manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005) já sugere que as MOEs devem ser determinadas pelo adquirente no momento em que os requisitos da missão e os conceitos de operação são definidos. Além disso, as MOEs também devem estar relacionadas com ao menos um requisito de missão, ou objetivo operacional. Outro ponto destacado é que deve-se tentar definir as MOEs de maneira que elas não sejam relacionadas umas com as outras pois assim pode-se ter *insights* sobre vários aspectos operacionais diferentes, e, conseqüentemente, pode-se avaliar diferentes possibilidades de soluções. Deve-se notar também, considerando que as MOEs são definidas no começo do ciclo de vida do projeto, que elas são definidas baseadas em várias suposições, as quais devem ser validadas, de modo a não criar critérios de validação inatingíveis.

Um mesmo sistema pode ter diferentes tipos de MOEs, dependendo da missão a ser realizada, ou dos critérios que os *stakeholders* considerem mais essenciais. O manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005) mostra um exemplo de sistema no capítulo 3.2.6, em que uma das MOEs é que o satélite desse exemplo deve ter um tempo de vida de 8 anos. Essa MOE é derivada de várias considerações iniciais sobre a missão, por exemplo,

o orçamento disponível (que costuma ser considerado outra MOE). Assim, um grupo de *stakeholders* pode considerar mais vantajoso o gasto em um satélite mais robusto e que tenha um tempo de vida maior, e outro grupo de *stakeholders*, com a mesma missão, pode considerar que seja melhor ter satélites que tenham um tempo de vida menor, e sejam constantemente substituídos. Assim, pode-se perceber como é essencial que a equipe desenvolvendo o sistema defina as MOEs baseadas nos requisitos do sistema, e em harmonia com os *stakeholders*.

Por fim, deve-se destacar também que alguns requisitos do sistema serão considerados tão essenciais que o seu não cumprimento pode levar à reformulação ou cancelamento do projeto. Um exemplo simples seria o orçamento do projeto. Se a equipe trabalha com um orçamento apertado, o não cumprimento desse requisito faz com que o projeto não possa ser cumprido (ou que ele seja reformulado). Assim, pela definição apresentada no capítulo 2, a MOE gerada por esse tipo de requisito será considerada também um KPP. Em outras palavras, os KPPs são o subconjunto de MOEs que precisam ser cumpridos para dar continuidade ao projeto.

Voltando ao exemplo do manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005), capítulo 3.2.6, o tempo de serviço de 8 anos, além de ser uma MOE é também um KPP, o que significa que os *stakeholders* consideram esse requisito essencial para a continuidade do projeto. Porém, um cenário diferente pode ocorrer. Caso o projeto em questão seja feito com um orçamento apertado, é possível que seja decidido considerar o custo um KPP, e o tempo do ciclo de vida apenas como MOE. Isso significa que para o projeto ter continuidade, é absolutamente necessário que esteja dentro do orçamento estipulado, e que, mesmo havendo o requisito do tempo de vida do satélite ser de oito anos, pode-se continuar o projeto mesmo que essa MOE não seja atingida. Para esse exemplo, podemos imaginar que um projeto dentro do orçamento, mas com tempo de vida de apenas 7 anos pode ter prosseguimento, mas um projeto com tempo de vida de oito anos, como desejado, mas acima do orçamento, não terá prosseguimento.

## 3.2 Definição de MOPs

Novamente, baseado no que foi dito no capítulo anterior, as MOPs estão mais relacionadas à verificação do sistema, ou seja, estão ligadas à pergunta "o sistema funciona corretamente?". Isso significa que essa métrica já tem relação com a solução técnica. Além disso, como mostrado na figura 2.1, as MOPs são derivadas a partir das MOEs, ou dos KPPs, podendo haver mais de uma MOP para MOE.

Como indica o manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005), o grupo de MOPs ligados a uma mesma MOE estão relacionados entre si por gerarem *insights* sobre uma

característica específica do sistema, e aqui já é possível perceber, por exemplo, possibilidades de *trade off* em nível técnico, pois se várias MOPs influenciam uma mesma MOE, há uma abundância de combinações entre as MOPs que podem levar ao sucesso do requisito destacado por essa MOE em particular. Além disso, deve ser clara a relação entre as MOPs com os requisitos, objetivos, riscos e problemas no nível de sistema, e também deve ser clara a relação entre a MOP e a MOE. As MOPs devem também estar associadas aos KPPs de modo a explicitar o sucesso previsto (simulação) ou alcançado (teste) dos objetivos da missão.

Voltando ao exemplo do capítulo 3.2.6 do manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005). A partir dos requisitos de sistema uma das MOE foi definida: ter um tempo de serviço de 8 anos, que, no exemplo, também é um KPP. Então, como as MOPs são derivadas a partir de MOE/KPP, e estão relacionadas a atributos de sistemas de operações, elas são pensadas tentando imaginar o que é necessário que o sistema tenha para que a MOE seja atingida. Para que o satélite dessa ilustração funcione por oito anos, ele deve permanecer na órbita determinada para a missão; como existe o fenômeno do decaimento de órbita, onde os objeto progressivamente saem da órbita inicial, faz-se necessário que o satélite tenha uma capacidade de propulsão para realizar essas correções. Tem-se então uma MOP. Com mais detalhes sobre o tipo de órbita, e sobre o decaimento do satélite, pode-se definir um limite a essa MOP, sendo, no exemplo, que a propulsão do satélite deve ser capaz de gerar 35 correções. Além disso, é necessário que o satélite funcione ao longo do tempo de serviço, levando a uma MOP que trate do ciclo da bateria. Por fim, pelo extenso tempo de serviço do satélite do exemplo, outra MOP definida é o tempo de vida das células solares, já que o uso de baterias recarregáveis por energia solar é mais vantajoso que outras alternativas. As três MOPs definidas a partir da MOE não necessariamente exaurem as possibilidades, mas servem para ilustrar a linha de pensamento que as define.

### 3.3 Definição de TPMs

As TPMs são derivadas a partir das MOPs, como explicado anteriormente, apesar de poderem ser derivadas a partir de MOEs ou KPPs em alguns casos. Deve haver ao menos um TPM para cada MOP. Como o próprio nome indica, as TPMs são indicadores a respeito da performance técnica dos componentes do sistema, ou seja, elas não são a solução em si. Isso indica que é nas TPMs que podemos considerar *tradeoffs* entre as alternativas possíveis, com o objetivo de cumprir os KPPs selecionados.

Como indica o DSMC Teaching Note (LIGHTSEY, 1997), as TPMs também são associadas gerenciamento do programa e dos riscos. As TPMs são selecionadas de modo a rastrear o resultado em áreas de riscos. Então, os parâmetros de baixo nível são medi-



dos pelas TPMs, que são rastreadas até as MOPs, essas sendo ligadas a MOEs e KPPs. Dessa maneira, o trabalho com os valores das TPMs geram um entendimento geral da viabilidade de se atingir os valores previstos para MOEs e KPPs.

Novamente, analisando o exemplo do capítulo 3.2.6 do manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005), tem-se a MOP “Capacidade propulsiva suficiente para gerar 35 correções”, que foi derivada da MOE “Ter um tempo de serviço de 8 anos”. Então, a partir dessa MOP, deriva-se as TPMs. Essas TPMs são os parâmetros técnicos de vários itens do sistema em questão que juntos influenciam a MOP, e, com os valores corretos, atingem o resultado desejado. Então, para definir as TPMs, pensa-se em quais são os fatores que influenciam a MOP em questão. Naturalmente, quanto mais propelente houver, maior será a capacidade propulsiva, então o volume alocado do satélite para o propelente é definido como uma TPM. Além disso, a massa do satélite influencia na MOP, pois um satélite de massa maior precisa gastar uma maior quantidade de propelente para realizar as mesmas correções que um satélite de massa menor, e portanto consegue fazer menos correções, tendo um tempo de vida útil menor. A eficiência do propulsor também influenciará, afinal, um propulsor de eficiência baixa precisa de uma quantidade maior de combustível para gerar o mesmo empuxo que outro com maior eficiência. E, por fim, a razão energia/volume do propelente influencia na MOP em questão, pois quanto maior for essa razão, considerando um mesmo volume, maior é a capacidade de propulsão do satélite.

Com esse exemplo em mente, é facilmente notável como os *tradeoffs* podem ocorrer. Se, por exemplo, decide-se usar um propelente com maior razão energética, então pode-se diminuir a quantidade de volume alocado para o propelente, afinal, uma massa menor é necessário, e assim pode haver mais espaço para outros equipamentos nesse satélite, ou até mesmo pode-se diminuir o tamanho do satélite. Ou pode-se decidir manter o mesmo volume alocado para o propelente e assim aumentar a capacidade propulsiva, tornando possível aumentar o tempo de vida do satélite (lembrando que essa MOE também depende de outras MOPs, como os ciclos das baterias e o tempo de vida das células solares). Naturalmente, muitas vezes um *tradeoff* terá a característica de prejudicar um item para que melhore outro. Seguindo o exemplo acima, se o combustível de maior eficiência energética é mais caro que outro com eficiência energética menor, uma equipe pode decidir que é mais vantajoso ter um volume maior de propelente, mas não aumentar tanto o orçamento. Nesse sentido, cabe a equipe decidir onde cada *tradeoff* deve ocorrer, com o propósito de atingir os objetivos definidos pelos KPPs.

### 3.4 Métricas em simulação

Considerando que as TPMs são as medições relativas a partes técnicas específicas, com as quais podemos calcular as MOPs, essas com as quais podemos verificar as MOEs e os KPPs, pode-se imaginar que, de maneira geral e simplificada, as TPMs representam as entradas de uma simulação, enquanto as MOEs e os KPPs representam as saídas, sendo as MOPs cálculos internos.

Pensando no exemplo do capítulo 3.2.6 do manual da INCOSE (ROEDLER; JONES, 2005), as TPMs destacadas são o volume de propelente, a massa do satélite, a eficiência do propulsor e a eficiência energética do propelente. Esses valores todos fazem parte do cálculo da capacidade propulsiva do satélite, e influenciam o valor final dessa MOP. Por exemplo, um satélite de maior massa precisará de uma capacidade propulsiva maior, enquanto um sistema com um maior volume alocado para o propelente terá uma maior capacidade propulsiva. Então, os valores dessas TPMs influenciam no valor da MOP associada, e as MOPs em conjunto influenciam a MOE (ou o KPP) associado, afinal, uma capacidade propulsiva maior leva a um maior número de correções orbitais, o que pode aumentar o tempo de serviço do satélite. Desse modo, considerando uma simulação, podemos imaginar a relação entre as métricas de sucesso (MOE, MOP, TPM e KPP) como mostra a figura 3.1 a seguir.



FIGURA 3.1 – Relação das métricas de sucesso em uma simulação.

Naturalmente, como qualquer simplificação, está sujeita a exceções. Por exemplo, a massa do satélite, que no exemplo acima é tratado como uma TPM, costuma ser a entrada de uma simulação, pois é usada para o cálculo das forças num sistema. Porém, é fácil imaginar o caso em que a massa do satélite, ou de um sistema em geral, deva ser limitada, por um requisito logístico, por exemplo. Assim, a massa nesse caso pode ser tratada como

uma MOE.

Com as explicações de como se definir as medições técnicas acima, e sua relação com simulações, propõe-se o seguinte fluxograma na figura 3.2, com o propósito de auxiliar a determinação dessas medidas para um sistema.

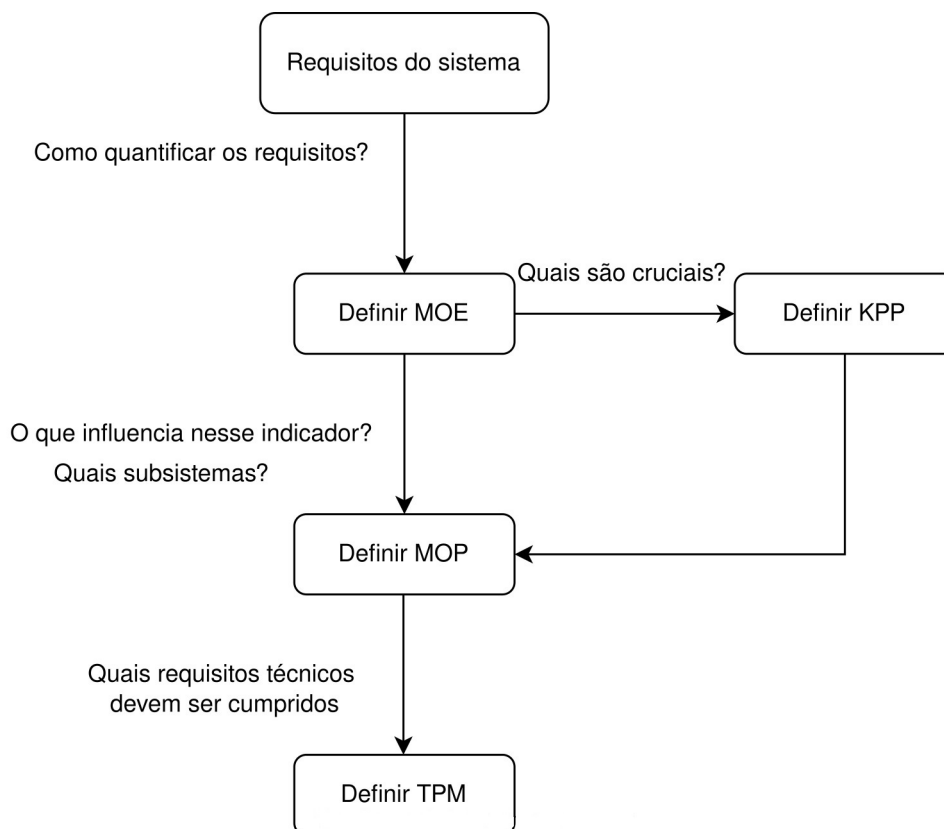


FIGURA 3.2 – Fluxograma para determinação das medições técnicas a partir dos requisitos de sistema.

Agora, o fluxograma apresentado na figura 3.3 a seguir sugere uma linha de pensamento para que se defina as medições técnicas a partir de uma simulação. Note que as linhas pontilhadas são opcionais para verificar se a métrica analisada não é um tipo de exceção como foi exemplificado anteriormente.

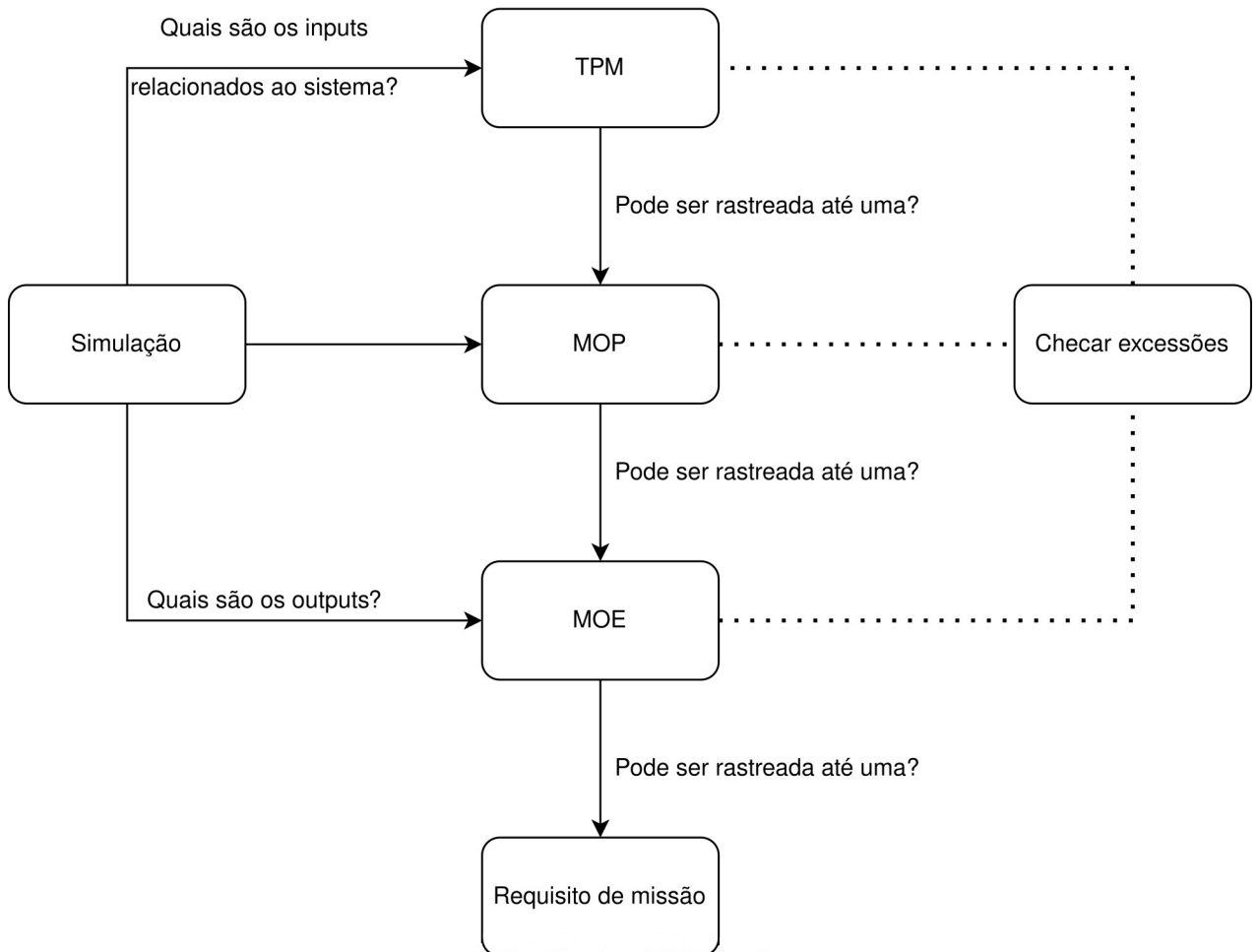


FIGURA 3.3 – Fluxograma para a determinação das medições técnicas a partir de uma simulação.

# 4 Aplicação

Este capítulo visa apresentar uma aplicação dos conceitos explicados nos capítulos anteriores a dois exemplos, o primeiro baseado no ano FireSat, e o segundo baseado em um projeto de míssil genérico.

## 4.1 Exemplo 1: FireSat

### 4.1.1 Sobre o FireSat

A missão FireSat é uma missão de monitoramento de incêndios em florestas. O objetivo dessa missão foi de criar, a baixo custo, um satélite de observação que pudesse monitorar, detectar, identificar e reportar incêndios florestais em determinada região (LIMA *et al.*, 2021). Então, para essa missão, foram definidos alguns requisitos, como mostra (LIMA *et al.*, 2021), e desses requisitos, para esse exemplo, serão utilizados os apresentados na tabela 4.1 a seguir.

TABELA 4.1 – Requisitos dos sistema usados nesse exemplo.

Requisito	Valor desejado
Cobertura	Cobertura do ponto de interesse ao menos 5 vezes ao dia
Tempo de vida da missão	Cinco anos

### 4.1.2 Aplicação na simulação STK

Foi criado um cenário no STK (NADA, a) em que um satélite observa um ponto específico do globo (Tabela 4.2). Esse ponto no globo está sobre o Brasil, e representa o nordeste, área observada na missão FireSat. Vale notar que originalmente, a missão observa uma área, enquanto nesse exemplo simplificado, está sendo considerado a observação de somente um ponto. Os dados sobre a órbita do satélite é apresentados na tabela 4.3 a seguir, sendo a inclinação, a altitude, o tempo local do nó ascendente e o tipo de órbita dados a respeito da órbita, e o coeficiente de arrasto, a massa e a tolerância de decaimento

dados a respeito do tempo de vida do satélite. A tolerância de decaimento é quanto o satélite tem que sair de sua órbita para ser considerado decaído, e apenas para ilustrar, nesse exemplo foi determinado 50 km como esse valor. Com os dados apresentados nas tabelas 4.2 e 4.3, tem-se os resultados apresentados nas figuras 4.1 e 4.2 a seguir.

TABELA 4.2 – Coordenadas do ponto de observação na Terra.

Latitude	-8.57962°
Longitude	-41.6203°

TABELA 4.3 – Dados do satélite em questão. (LIMA *et al.*, 2021)

Parâmetro	Valor
Inclinação	98.82°
Altitude	850 km
LTAN	01:15 HMS
Tipo de órbita	Heliosíncrona
Cd (Coeficiente de Arrasto)	3.13
Massa	29.5 kg
Tolerância de decaimento	50 km

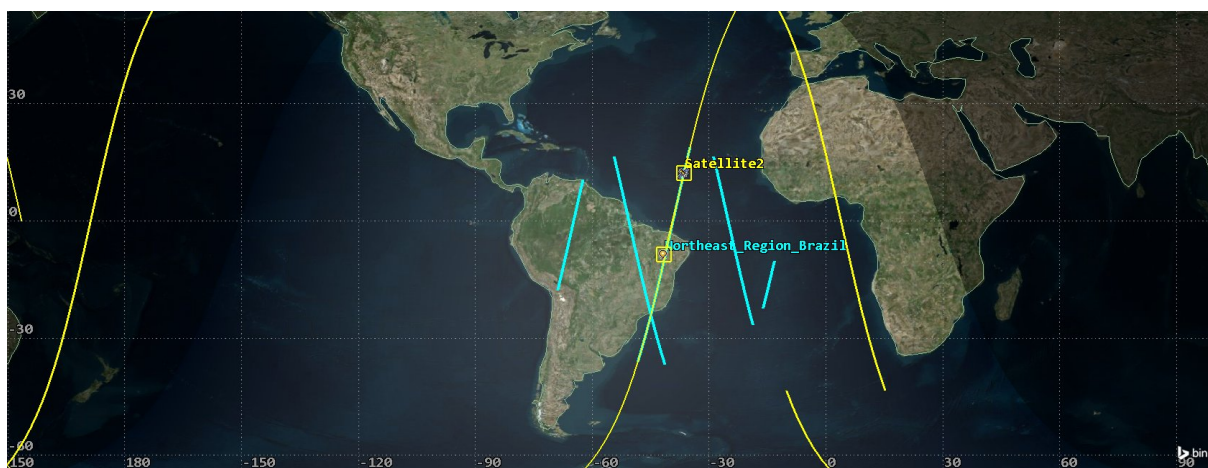


FIGURA 4.1 – Resultado da simulação do FireSat em 2D.(NADA, a)

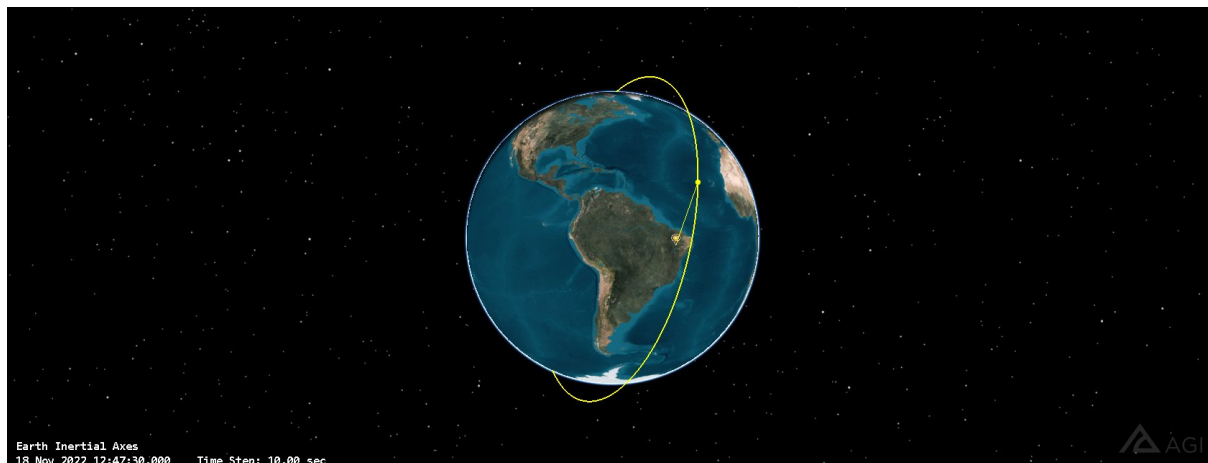


FIGURA 4.2 – Resultado da simulação do FireSat em 3D.(NADA, a)

Então, como mostra a figura 4.1, os dados apresentados nas tabelas geram uma órbita com 5 passagens com visada ao ponto de interesse, e um tempo de vida antes do decaimento de 1,9 anos. Assim, nota-se que, no momento, o primeiro requisito apresentado na tabela 4.1 é cumprido, mas o segundo não. Para cumprir esse segundo requisito, seria necessário fazer correções orbitais, o que leva a uma necessidade de uma capacidade propulsiva no satélite.

Então, seguindo o fluxograma proposto na figura 3.3, nessa simulação, os *inputs* dessa simulação que são relacionados ao sistema são a massa, e possivelmente a tolerância de decaimento (pois isso dependeria de os equipamentos do satélite funcionarem fora da órbita determinada para a missão). Com isso, pode-se entender a massa do satélite como uma TPM. A tolerância de decaimento, porém, mesmo sendo um *input* da simulação, pois não está tratando diretamente de requisitos técnicos da missão, apesar de dar *insights* sobre quais outras TPMs podem haver nesse sistema.

Além disso, como saída da simulação, tem-se o número de passagens com visada ao ponto de interesse e o tempo de vida antes do decaimento. Nesse caso, o número de passagens com visada funciona como uma MOE, por ser relacionado com um dos requisitos, mas o tempo de vida antes do decaimento, mesmo sendo uma saída da simulação, funciona como MOP, por dar *insights* sobre uma outra MOE que pode ser definida a partir dos requisitos, que é o tempo de vida total da missão.

## 4.2 Exemplo 2: Míssil

Para a simulação de um míssil genérico, baseando-se nas notas de aula de PRJ-75 (CARVALHO, 2019), considera-se as seguintes entradas: a massa e o comprimento do míssil, dividido em seções; o empuxo e o tempo de queima do *booster* e do *sustainer*; as

condições de lançamento (*e.g.*, posição, orientação e velocidades iniciais); e as condições externas (*e.g.*, a constante gravitacional e as condições atmosféricas). Nesse exemplo, os dados de entrada relativos ao sistema (massa, comprimento, empuxo e tempo de queima) podem todos serem considerados TPMs, já que indicam dados da solução técnica. Aqui, pode-se notar como diferentes *tradeoffs* podem ser feitos para se atingir os requisitos da missão.

A cada passo dessa simulação, são calculados as forças e os momentos atuando nesse míssil, além da sua matriz de inércia e sua derivada. Fazendo parte dos cálculos internos, essas medidas podem ser consideradas MOPs.

Por fim, a cada passo, a saída da simulação inclui a posição, velocidade e aceleração lineares, a orientação e a velocidade e aceleração angulares. Desses, espera-se que a posição indique uma MOE, pois está relacionada ao alcance do míssil, que é um requisito de missão importante. Além disso, se outro requisito da missão for que o míssil deve perseguir um alvo, então a velocidade pode também ser considerada uma MOE. Os dados de saída que não podem ser rastreados até um requisito não são considerados MOEs.



## 5 Conclusão

Com esse trabalho, pode-se entender o conceito das medições técnicas, suas definições a partir dos requisitos do sistema, ou alternativamente, suas definições a partir de simulações. Além disso, pode-se também exemplificar esse estudo a partir de dois tipos diferentes de simulação, uma baseada na missão FireSat, utilizando o STK, e um referente a um míssil genérico.

# Referências

CARVALHO, Carlos Alberto de Paiva. Available at:  
<https://www.ansys.com/products/missions/ansys-stk>.

CARVALHO, C. A. d. P. **Notas de Aula PRJ-75**. [S.l.: s.n.], 2019.

LIGHTSEY, R. **Technical Performance Measurement**. [S.l.: s.n.], 1997.

LIMA, E. G.; TARIFA, M.; DIAS, R.; CUTOLO, A.; ALBUQUERQUE, P. Kukulka de; SANTOS, W. Gomes dos. Conceptual project of the classic firesat mission for the monitoring of forest fires in the northeast of brazil using the space mission analysis and design (smad) process. *In: . Proceedings [...]*. [S.l.: s.n.], 2021.

ROEDLER, G. J.; JONES, C. **Technical Measurement. A Collaborative Project of PSM, INCOSE, and Industry**. [S.l.]: INCOSE, 2005.

SYSTEMS engineering vision 2035. Available at:  
<https://violin-strawberry-9kms.squarespace.com/>.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">23 de novembro de 2022</p>	3. DOCUMENTO Nº <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-121/2022</p>	4. Nº DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">33</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise de métricas para validação de simulação sistêmica			
6. AUTOR(ES): <b>Rafael Purim de Azevedo</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Sistemas; Métricas; Simulação; Validação			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Sistemas complexos; Métricas (software); Validação de programas; Simulação; Verificação de programas (computadores); Engenharia de sistemas; Computação; Engenharia Aeroespacial.			
10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;">(X) Nacional    ( ) Internacional</span> ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial. Orientador: Prof Dr Christopher Shneider Cerqueira. Publicado em 2022.			
11. RESUMO: No desenvolvimento de sistemas complexos, um dos processos é o de Verificação e Validação. O uso da simulação é um dos métodos para provar que sistemas foram construídos da maneira certa, e para o propósito correto. Uma das dificuldades é descobrir como alinhar as métricas de sucesso do sistema com os resultados da simulação. Este trabalho visa estudar essa associação entre as métricas de sucesso e os resultados de simulações de sistemas complexos.			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;">                     (X) <b>OSTENSIVO</b>                      ( ) <b>RESERVADO</b>                      ( ) <b>SECRETO</b> </p>			