

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Daniel Martins Frageri

**GERAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS FUTUROS
PARA A MINERAÇÃO DE ASTEROIDES COM ALTA
PRESENÇA DE MATERIAIS DO GRUPO DA PLATINA
(PGE'S)**

Trabalho de Graduação
2022

Curso de Engenharia Aeroespacial

Daniel Martins Frageri

**GERAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS FUTUROS
PARA A MINERAÇÃO DE ASTEROIDES COM ALTA
PRESENÇA DE MATERIAIS DO GRUPO DA PLATINA
(PGE'S)**

Orientador

Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

Coorientador

Prof. Dr. Lucas Novelino Abdala (ITA)

ENGENHARIA AEROESPACIAL

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2022

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

Martins Frageri, Daniel

Geração e análise de cenários futuros para a mineração de asteroides com alta presença de materiais do grupo da platina (PGE's) / Daniel Martins Frageri.

São José dos Campos, 2022.

73f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeroespacial– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022. Orientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira. Coorientador: Prof. Dr. Lucas Novelino Abdala.

1. Asteróides. 2. Minerais. 3. Astronomia 4. Cenários. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica
II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARTINS FRAGERI, Daniel. **Geração e análise de cenários futuros para a mineração de asteroides com alta presença de materiais do grupo da platina (PGE's)**. 2022. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Martins Frageri

TÍTULO DO TRABALHO: Geração e análise de cenários futuros para a mineração de asteroides com alta presença de materiais do grupo da platina (PGE's).

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

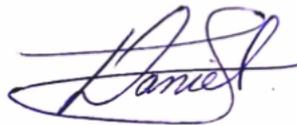
É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida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



Daniel Martins Frageri
Rua do H8B, Ap. 236
12.228-461 – São José dos Campos–SP

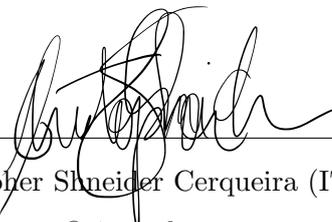
GERAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS FUTUROS PARA A MINERAÇÃO DE ASTEROIDES COM ALTA PRESENÇA DE MATERIAIS DO GRUPO DA PLATINA (PGE'S)

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Daniel Martins Frageri

Autor



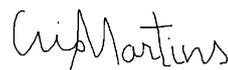
Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

Orientador



Lucas Novelino Abdala (ITA)

Coorientador



Prof. Dr. Cristiane Aparecida Martins
Coordenador do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, 24 de novembro de 2022.

À todos que se dedicam para tornar
abundante a vida na terra.

Agradecimentos

O esforço necessário para concluir um ciclo tão longo e intenso jamais será de uma pessoa só.

Por isso, agradeço primeiramente à minha família que sempre me apoiou e investiu em mim. Nem sempre o investimento foi financeiro, muitas vezes foi um investimento de tempo para ensinar um princípio de vida, ou investimento de paciência para dar tempo para o aprendizado, ou, claro, investimento de amor para tornar a jornada mais proveitosa.

Quando menciono família, não necessariamente é aquela formada por vínculos de sangue, embora esses naturalmente façam parte do grupo. Mas gosto de expandir essa definição pela etimologia da palavra *adoptare* - que significa escolher para amar. Nesse contexto, incluo todos os meus amigos e namorada, que me ajudaram inúmeras vezes na caminhada, me motivando, aproveitando os tempos de descanso, ou dando alguma dica para facilitar a trajetória.

Além da minha família, diversos professores se mostraram parceiros, entendendo minhas peculiaridades e decisões que nem sempre foram as mais ortodoxas - e mesmo assim, me apoiaram.

Sou muito grato a todos eles e sei que, se cheguei até aqui, foi porque eles tiveram muito carinho e cuidado comigo. Obrigado!

Serenidade *para aceitar as coisas que não podem ser mudadas,*
Coragem *para mudar as coisas que podem ser mudadas*
Sabedoria *para distinguir umas das outras*
— REINHOLD NIEBUHR

Resumo

Asteóides são corpos celestes que possuem tamanho e composição variadas. Alguns deles são os M-type, que possuem metais em sua composição, como os metais do grupo da platina - os PGE's (Platinum Group Elements). Dentre esses asteróides, alguns possuem órbitas que em alguns momentos, se aproximam da Terra. A mineração de asteróides consiste na extração desses materiais para fins econômicos. Essa tecnologia ultimamente tem atraído atenção do mercado privado e está cada vez mais próxima de se tornar uma realidade comercial. Para entender quais são as formas possíveis de fazer isso acontecer e qual delas possui maior chance de ser a primeira a ser utilizada foi utilizada a prospecção tecnológica por meio do método de geração de cenários. Cada forma de mineração foi analisada e hipóteses de como ela aconteceria no futuro foram geradas. Após analisar cada uma das hipóteses e cenários, concluiu-se que o modelo de Extração Bruta *in situ* era o modelo mais promissor e que possuía desafios menores, embora ainda consideravelmente grandes. Por fim, os impactos desse cenário futuro foram analisados nos aspectos políticos, econômicos, socioculturais, tecnológicos, ecológicos e legais (PESTEL).

Abstract

Asteroids are celestial bodies that have a variety of composition and sizes. Some of them are the M-type, asteroids that have mainly metals in its composition, as the PGE's (Platinum Group Elements). Between these asteroids, some of them have orbits that, sometimes, get close to the Earth. Asteroid Mining consists in the extraction of these materials with economic purposes. Ultimately, this technology has attracted attention from the private market and it is closer and closer to become a commercial reality. In order to understand which ways are possible to mine asteroid and to find which way have the most chance to be the first to be utilized, the scenarios method of technology forecast was used. Each way of asteroid mining was analysed and hypothesis on how it would happen were generated. After analysing each hypothesis and scenarios, it was concluded that the *In Situ* Raw Exploitation was the most promising model and had easier challenges, although the challenges were still hard to overcome. Lastly, the impacts of this scenario were analysed in the politics, economics, sociocultural, technology, environmental and legal fields (PESTEL).

Lista de Figuras

FIGURA 5.1 – Processos gerais para minerar um asteróide. Fonte: autor.	44
FIGURA 5.2 – Processos gerais para minerar um asteróide por meio de uma exploração bruta <i>in situ</i> . Fonte: autor.	45
FIGURA 5.3 – Processos gerais para minerar um asteróide por meio de uma exploração completa <i>in situ</i> . Fonte: autor.	46
FIGURA 5.4 – Processos gerais para minerar um asteróide por meio de uma transferência de órbita. Fonte: autor.	48

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Justificativa	14
1.4	Organização do trabalho	15
2	MINERAÇÃO DE ASTERÓIDES	16
2.1	Classificações	16
2.2	Asteróides Próximos à Terra	17
2.3	Missões de Estudo de Asteroides	18
2.4	Seleção de Asteróides para Mineração	19
2.4.1	Descoberta	19
2.4.2	Diagnóstico	19
2.4.3	Órbita	21
2.4.4	Tamanho e massa	22
2.4.5	Período Rotacional e Estrutura Interna	23
2.4.6	Análises <i>in situ</i>	24
2.5	Formas de Mineração de Asteróides Possíveis	24
2.5.1	Exploração Bruta <i>in situ</i>	25
2.5.2	Exploração Completa <i>in situ</i>	25
2.5.3	Transporte do asteróide para a órbita terrestre	25
2.5.4	Impacto do asteróide com a terra ou a lua	25
2.6	Análise Geral	26

3	PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA	27
3.1	Categorização de FTA's pela sua Natureza	28
3.2	Categorização de FTA's por sua Abordagem	28
3.3	Categorização de FTA's por sua Família de Métodos	28
3.3.1	Opinião de Especialistas	29
3.3.2	Análise de Tendências	29
3.3.3	Monitoramento e Inteligência	30
3.3.4	Estatísticos	30
3.3.5	Modelagem e Simulação	30
3.3.6	Cenários	31
3.3.7	Valor/Econômicos/Decisões	32
3.3.8	Descritivos e Matrizes	32
3.3.9	Criativos	33
3.4	Análise Geral dos Métodos	33
3.5	Método de Interesse: Análise de Cenários	34
3.5.1	O Modelo Lógico-intuitivo	34
3.5.2	O Modelo de Tendências Influenciadas por Probabilidades	36
3.5.3	O Modelo <i>La Prospective</i>	37
3.5.4	Comparação entre os métodos	38
4	METODOLOGIA	39
4.1	Materiais e Métodos	40
4.1.1	Aprofundamento Teórico	40
4.1.2	Variáveis e Condicionantes	40
4.1.3	Categorização dos Condicionantes	41
4.1.4	Geração das Hipóteses	42
4.1.5	Exploração dos Cenários	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Aprofundamento Teórico nas Formas de Mineração de Asteróide	44
5.1.1	Exploração Bruta <i>in situ</i>	45

5.1.2	Exploração Completa <i>in situ</i>	46
5.1.3	Transporte do Asteróide para a Órbita da Terra ou da Lua	47
5.2	Variáveis Determinantes e Condicionantes para a Mineração de Asteróides	50
5.3	Categorização dos Condicionantes para a Mineração de Asteróides . . .	56
5.4	Geração dos Cenários e Hipóteses	60
5.4.1	Cenário para a Exploração Bruta <i>in situ</i>	60
5.4.2	Cenário para a Exploração Completa <i>in situ</i>	62
5.4.3	Cenário para o Transporte Orbital	64
5.4.4	Análise dos Cenários	66
5.5	Exploração do Cenário de Exploração Bruta <i>in situ</i>	67
6	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS	72

1 Introdução

Os materiais do grupo da Platina (*Platinum Group Elements* - PGE's) consistem em seis elementos próximos na tabela periódica, dos quais três deles são considerados leves (*ruthenium, rhodium e palladium*) e os outros três são considerados pesados (*osmium, iridium e platinum*). Devido à sua alta aplicabilidade na indústria e escassez de minas terrestres (BAUER, 2018), alguns desses materiais são os mais valiosos da terra atualmente e o mercado deste grupo de elementos foi de aproximadamente 37 bilhões de dólares em 2021. (IMARC, 2022)

Além disso, a concentração de PGE's em asteroides tipo M é cerca de 3 vezes maior do que nas minas terrestres de mais alta concentração desses elementos. Por conta desses fatores, a mineração de asteroides tipo M, focada em materiais do grupo da platina é uma área de grande interesse atualmente. (BAUER, 2018)

A mineração de asteroides é um campo tecnológico que possui a capacidade de baratear os processos de produção de muitos bens de consumo inacessíveis à boa parte da população mundial - que hoje possuem preços elevados pelo alto custo de alguns insumos, tais como os PGE's. Essa forma de mineração está cada vez mais próxima de ter aplicações comerciais reais, visto que recentemente observa-se movimentos de mercado no qual startups do setor têm mostrado forte apoio institucional, como a AstroForge que recebeu treze milhões de dólares no primeiro semestre de 2022 para iniciar suas operações em busca de mineração de PGE's em asteroides. (ALAMALHODAEI, 2022) Outras iniciativas também estão ativas, como por exemplo a Asteroid Mining Company. (CORP, 2022)

No entanto, poucas ações concretas já foram tomadas no sentido de tornar essa tecnologia algo prático e que possua fins comerciais. Até 2022, somente 5 missões à asteroides foram realizadas, nenhuma delas com foco em mineração. (BAUER, 2018)

Em paralelo à essa questão, os estudos de futuro (*Future Oriented Technology Analysis* - FTA's) são metodologias utilizadas para prever, analisar e orientar o desenvolvimento humano e tecnológico. Um dos métodos de FTA's mais conhecidos e aplicados é a geração e análise de cenários. (BARBOSA, 2018)

Dessa forma, torna-se relevante estudos que ajudem a ciência e a tecnologia a evoluir no sentido de tornar os PGE's mais acessíveis e em maior quantidade para a população humana. A mineração de asteroides é uma das possibilidades de tornar isso real, e a utilização de métodos de prospecção tecnológica pode ajudar a clarear as principais dificuldades e oportunidades necessárias para atingirmos esse objetivo.

1.1 Objetivo Geral

Gerar cenários tecnológicos relativos à mineração de asteroides com alta concentração de elementos do grupo da platina e analisar as principais barreiras tecnológicas para esse tipo de empreendimento ser bem sucedido.

1.2 Objetivos Específicos

1. Reunir e descrever os avanços mais recentes da mineração espacial com foco em PGE's;
2. Descrever metodologias de prospecção tecnológica (FTA's) disponíveis na literatura atualmente;
3. Identificar os maiores obstáculos para esse tipo de missão se tornar uma realidade com significância comercial;
4. Agregar, correlacionar e analisar dados e informações disponíveis para geração de cenários futuros em relação à mineração de PGE's em asteroides;
5. Avaliar os impactos que cada cenário pode ter em relação à aspectos econômicos, sociais e ambientais futuros.

1.3 Justificativa

Conforme a tecnologia humana avança, insumos específicos são cada vez mais requeridos para que o ritmo de crescimento não diminua. Não é diferente com os materiais do grupo da platina, que possuem características muito boas de resistência à desgaste, ataques químicos e físicos, características excelentes em alta temperatura e ainda propriedade elétricas estáveis. (BAUER, 2018)

Muitas das aplicações desses elementos são relacionados à tratamentos médicos de doenças crônicas como o câncer, além de serem utilizados em peças de alta tecnologia

e em processos de catálise no setor automotivo, químico e industrial de um modo geral. (RAUCH, 2008)

Desde os últimos sessenta anos, o preço e a utilização de PGE's vem aumentando consistentemente, uma vez que hoje eles possuem alta aplicabilidade mas possuem baixa disponibilidade na terra. (BAUER, 2018) (CORP, 2022)

Com o potencial da mineração de asteróides se tornando uma realidade comercial, o impacto disso seria na diminuição do preço de tratamento de câncer, diminuição do custo de ativos para locomoção, maior produção industrial de um modo geral e à menores custos. Assim, a humanidade se aproximaria de uma economia mais potente e capaz de gerar os bens necessários para aumentarmos o bem estar da população mundial.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está estruturado em 6 capítulos. O primeiro capítulo consiste na introdução, que possui os objetivos e a motivação do estudo.

O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica que contém informações essenciais sobre a mineração de asteróides.

O terceiro capítulo possui uma visão geral dos métodos de prospecção tecnológica que são as ferramentas utilizadas para criação de cenários futuros acerca deste tema.

No quarto capítulo, a metodologia utilizada neste trabalho foi apresentada, explicitando o passo a passo e as ferramentas utilizadas.

No capítulo cinco estão todos os resultados obtidos, discussões e análises feitas, compreendendo cada um dos cenários de formas de mineração possíveis e uma análise entre os cenários.

Por fim, no capítulo seis é apresentada a conclusão.

2 Mineração de Asteróides

Os asteróides são corpos celestes formados durante a formação dos sistemas solares a partir do esfriamento e condensação das nuvens de matéria no plano elíptico. A mineração de asteróides consiste na exploração comercial dos materiais que compõem estes corpos. (BAUER, 2018)

2.1 Classificações

Os asteróides podem ser classificados conforme várias características, sendo as mais comuns relativas à sua assinatura espectral (o que corresponde à sua composição aproximada) e às suas características orbitais, conforme a lista a seguir: (BAUER, 2018)

1. **Assinatura Espectral:** nessa classificação, os asteróides são analisados conforme a luz que eles emitem e as frequências identificadas nessa análise. A partir desses dados, é possível entender a composição provável de cada asteróide observado. Nessa classificação encontram-se os asteróides C-Complex, S-complex, X-complex, entre outros grupos mais raros, como os M-type. Para fins deste estudo, os asteróides classificados como M-type possuem alta concentração de minérios do grupo da platina, cerca de 3 vezes mais do que qualquer mina terrestre desses materiais. (BAUER, 2018)
2. **Propriedades Orbitais:** uma outra forma de classificar os asteróides é com relação à como eles orbitam em torno do sol. As principais classificações são: *mean motion resonance*, ressonâncias seculares, o efeito yarkowsky e o efeito YORP. As primeiras duas características descrevem o quanto a órbita de um determinado asteróide possui ressonância com o sol e outros planetas, no sentido de possuir um múltiplo inteiro e pequeno que correlaciona seus períodos orbitais. Já o efeito yarkowsky é o impulso gerado pela reflexão e absorção da luz solar que interage com somente uma das partes do asteróide e gera quantidade de movimento nele ao longo de milhares de anos, alterando assim, sua órbita. Por fim, o efeito YORP é produzido pela mesma lógica

que o efeito yarkowsky, mas gerando um momento de inércia rotacional. No entanto, essas propriedades orbitais levam milhares de anos para influenciar as órbitas de asteróides e, portanto, são irrelevantes para fins de mineração - uma vez que as missões de mineração de asteróides devem durar períodos de tempo pequenos para esses efeitos serem relevantes. (ELVIS J. L. GALACHE; MCLEOD, 2015)

3. **Grupos Especiais:** existem algumas categorizações baseadas em outros critérios, como por exemplo os NEO's, que são agrupados por meio da sua distância orbital ao sol. Dentro desses grupos ainda podem haver outras subcategorizações que distinguem alguns corpos celestes por meio da sua chance de colidir ou ser danoso à terra.

2.2 Asteróides Próximos à Terra

Os NEO's (*Near Earth Objects*) são os objetos que possuem órbitas próximas à da terra, isto é, objetos que possuem distância de periélio inferior à 1.3 UA¹ e afélio superior à 0.983 UA. Os NEA's (*Near Earh Asteroids*) são os asteróides que satisfazem essa mesma condição. (BAUER, 2018)

Para os fins de mineração espacial, esta categoria de asteróides é muito relevante, uma vez que diminuiu o custo de transporte necessário entre o planeta e um objeto de exploração. Isso já não acontece no cinturão de asteróides, já que essa região do sistema solar é consideravelmente mais distante - mais de 1 UA de distância da terra. (BAUER, 2018)

Os NEA's são classificados em 3 grupos de acordo com suas órbitas:

- **Asteróides Aten:** são os asteróides que possuem semi-eixo maior menor que 1 UA e distância de afélio superior à 0.983 UA.
- **Asteróides Apollo:** são os asteróides que possuem semi-eixo maior maior que 1 UA e distância de periélio inferior à 1.017 UA.
- **Asteróides Amor:** são definidos como os NEA's que possuem distância de periélio inferior à 1.3 UA e superior à 1.017 UA. (BAUER, 2018)

Essas três categorias são complementares e dividem totalmente os NEA's. Além disso, duas outras classificações são importantes: os PHO's (*Potentially Hazardous Objects*) e os ECOA (*Earth co-orbit Asteroids*). (BAUER, 2018)

¹UA = unidade astronômica, equivalente à 150 milhões de anos luz

Os PHO's são objetos que, de acordo com várias variáveis de análises, possuem risco de colidir com a terra e causar muitos danos à humanidade. Já os ECOA's são os asteróides que possuem ressonância com a órbita terrestre, conseguindo ficar mais tempo próximo à terra. Por conta dessa característica, esse tipo de asteróide é especialmente relevante para a mineração espacial, uma vez que permite que a comunicação entre terra e asteróide seja feita por mais tempo em uma possível missão de mineração. Além dessa vantagem, também por conta do maior tempo de proximidade com a terra, esses asteróides possuem uma previsibilidade de recebimento de luz solar para ser utilizada como fonte de energia em missões. (BAUER, 2018)

2.3 Missões de Estudo de Asteroides

Até o momento, cinco missões para asteróides foram executadas ou estão em andamento. Cada uma delas possui um objetivo de estudo:(BAUER, 2018)

1. **NEAR Shoemaker:** Foi a primeira missão enviada à um asteróide. Tinha fim de adquirir dados sobre as propriedades físicas, químicas e magnéticas da superfície de um asteróide S-type. Foi lançada pela NASA em 1996 e só chegou no asteróide em 2000.
2. **Hayabusa:** Uma das missões mais conhecidas à asteróides e teve como objetivo trazer uma amostra de volta a terra de um asteróide S-type. Foi lançada pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) em 2003 e chegou no asteróide em 2005, voltando para a terra com algumas amostras de material em 2010.
3. **Hayabusa2:** Com a mesma missão de Hayabusa, o Hayabusa2 trouxe uma amostra de um asteróide C-type. Também desenvolvida pelos Japoneses na JAXA, a missão foi lançada em 2014, chegando ao asteróide em 2018 e retornando à terra ao fim de 2020.
4. **Osiris-Rex:** Também é uma missão de estudo e busca de amostra física de volta para a terra, mas dessa vez de um asteróide B-type e com objetivo de estudar o intemperismo espacial em asteróides. Foi desenvolvida pela NASA e lançada em 2016, sobrevoando o asteróide durante 2018, 2019 e 2020. Para retirar o material, a sonda pousou no asteróide em 2020 e voltará para a terra em 2023.
5. **AIDA:** É uma das missões mais complexas enviadas à asteróides e objetiva o estudo detalhado de como os impactos em asteróides como alterar suas órbitas, estratégia que pode ser necessária no futuro para desviar algum objeto espacial que esteja vindo em direção à terra.

2.4 Seleção de Asteróides para Mineração

Parte essencial do planejamento de mineração de asteróides é a escolha de qual asteróide minerar. Isso é um fator extremamente relevante, uma vez que pode determinar se a missão é viável e possui potencial de ser lucrativa. Embora a primeira coisa que vem à tona ao se tratar disso seja a sua composição e tamanho, que determinam de certa forma o valor total que um asteroide teria, outras características como a velocidade de órbita dele, sua rotação, sua composição de superfície e estrutura, etc, são essenciais para avaliar o custo de uma missão de mineração. (BAUER, 2018) Assim, As principais variáveis para a escolha do asteróide são:

2.4.1 Descoberta

A descoberta consiste em saber quais asteróides existem dispersos no sistema solar e, mais especificamente, próximos da Terra. Essas pesquisas são feitas tanto por telescópios terrestres quanto telescópios em órbita ao redor da Terra. No entanto, quando em órbita, os telescópios possuem pouco tempo disponível para serem utilizados para descoberta de asteróides. Isso acontece devido à alta demanda de várias áreas diferentes de estudo e a relativa escassez desse tipo de equipamento atualmente. Assim, a descoberta de asteróides a partir de telescópios em órbita é relativamente demorada. (BAUER, 2018) Com relação aos telescópios terrestres, outros tipos de dificuldades aparecem. Quando um telescópio terrestre consegue uma aparição de um potencial novo asteróide, existe a possibilidade de essa detecção ser apenas efeito de raios cósmicos que alteram a leitura indevidamente, levando à conclusão incorreta da existência de um asteróide quando na verdade pode não haver. Assim, para a confirmação real de existência, o asteróide tem que ser visto por mais de uma vez consecutiva em sua trajetória. No entanto, por questões de limitação física, os telescópios terrestres só possuem acesso ao céu noturno do hemisfério em que se encontram. Assim, para que duas detecções consecutivas ocorram, em média, são necessários uma década de observação. Outro prejuízo se dá em relação à asteróides que possuem o mesmo plano e período orbital da Terra. Nesse caso, nenhum telescópio terrestre conseguiria fazer duas observações distintas. (BAUER, 2018) Devido à essas limitações, a mineração de asteróides tem mais chance de ocorrer partindo de asteróides já identificados, deixando essa complexidade inicial de descoberta de lado.

2.4.2 Diagnóstico

Um segundo passo na direção da seleção de qual asteróide minerar seria o diagnóstico de sua composição e outras características, para poder restringir o conjunto de interesse aqueles que possuem os elementos de interesse e fornecer outras informações relevantes.

Com esse objetivo, diversos métodos existem, mas sua precisão cresce com o custo para sua aplicação. Assim, como regra geral, quanto mais precisão for necessária, menor será a quantidade de asteróides diagnosticados.(BAUER, 2018)

Os métodos atualmente disponíveis para diagnóstico são os seguintes:

- **Fotometria:** consiste na análise da intensidade luminosa entre duas bandas de frequência, fornecendo aproximadamente o formato de sua amostra espectral. Esse método é o menos preciso e mais barato de ser aplicado, devido à sua simplicidade e aplicabilidade. Ele permite a classificação de asteróides S-, D- e C-type, que já permite a simplificação na análise para mineração, mas não consegue distinguir classes mais similares de asteróides, tais como os E-, P- e M-type. (ELVIS J. L. GALACHE; MCLEOD, 2015) Assim, para uma análise inicial, esse método é interessante, mas ainda não é capaz de filtrar quais asteróides são M-type.
- **Análise Espectral e quase infravermelho:** esse método já analisa de fato como é a pegada espectral da luz emitida pelo asteróide. Porém, existe uma limitação intensa quanto ao fato de que, a depender de diversas variáveis, a pegada espectral de um asteróide muda. Assim, esse método não permite o entendimento confiável da composição do asteróide e portanto, para fins de mineração não é adequado.(BAUER, 2018)
- **Fotometria e espectroscopia na região do infravermelho térmico:** se resume na análise dupla de fotometria e espectroscopia na região do infravermelho térmico de cada um dos asteróides. No entanto, quando se usa telescópios terrestres, a terra cria um background forte que inviabiliza a maior parte das análises. Já para telescópios orbitais, os que são capazes de fazer esse tipo de análise ainda são muito requisitados pra outras funções, tornando esse método muito mais custoso do que os outros métodos. Em contrapartida, esse método é um dos mais precisos e possui a capacidade de diagnosticar com qualidade os asteróides M-type.(ELVIS J. L. GALACHE; MCLEOD, 2015)
- **Radar:** esse método consiste na emissão e captura de ondas, que permitem identificar com precisão as características orbitais, o formato e o eixo de rotação de asteróides. No entanto, esse modelo só consegue ser utilizado em uma parte dos NEO's, uma vez que a energia necessária para a emissão das ondas cresce com uma curva exponencial de quarta ordem em relação à distância entre asteróide e terra. Ou seja, para que a distância máxima desse tipo de método dobre, o custo de energia cresce 16 vezes. Para fins de mineração, pode ser um método bom para entender essas características e ajudar no planejamento e seleção do asteróide que será utilizado em uma eventual missão.(BAUER, 2018)

- **Interferometria na região ótica ou infravermelha:** esse método consiste na distribuição de pequenos satélites suficientemente distantes para que a luz emitida por eles e pelos asteróides interfiram, gerando imagens de baixa resolução. Esse método normalmente é mais utilizado com radares, mas existem aplicações nessas faixas de espectro que são bem mais complexas. Devido à essa complexidade, a resolução ainda é baixa e a aplicabilidade desse método para asteróides é muito incomum. (BAUER, 2018)
- **Astronomia:** a astronomia é a área da astronomia que estuda a posição dos corpos celestes. No entanto, torna-se um método de diagnóstico quando, a partir de duas posições diferentes, divergências entre a posição real observada e a teórica calculada surgem. As explicações pra essas diferenças fornecem informações sobre a intensidade do efeito Yarkowsky, por exemplo. Mas, caso a força resultante para uma alteração de órbita seja muito grande, isto é, acima da magnitude esperada para o efeito Yarkowsky, uma investigação de possível perda de massa ou outras formas de alteração de órbita são necessárias. Em conjunto com os outros métodos, a astronomia pode ser uma fonte importante para se chegar a conclusões acerca de asteróides e portanto deve ser considerada como ferramenta para a essa etapa na mineração de asteróides. Por fim, esse método só é aplicável à uma quantidade muito pequena dos asteróides, uma vez que observações diferentes de suas posições ocorre pouquíssimas vezes. (BAUER, 2018)

2.4.3 Órbita

Essa parte é uma das mais simples. Com um telescópio de 2 metros de diâmetro, medidas sobre a órbita de um asteróide já podem ser definidas. Ou seja, esse procedimento possui relativamente baixo custo e a precisão da previsão futura da posição de um asteróide possui uma incerteza relativamente baixa em um período curto de tempo após sua observação. No entanto, essa incerteza cresce conforme o tempo de previsão futuro aumenta. Ou seja, um determinado asteróide quase sempre é encontrado na posição prevista pra ele em uma janela de um ano para o futuro, mas a medida que esse tempo vai se tornando maior sem uma observação daquele asteróide, sua próxima posição torna-se cada vez mais imprecisa. (BAUER, 2018)

Unindo-se esse fato à realidade em que o investimento na re-observação de asteróides é menor do que o necessário para manter o registro e acompanhamento de todos os asteróides já observados, de forma que alguns deles, após uma quantidade de tempo grande, acabam sendo perdidos e não encontrados novamente. Esse problema é um dos mais relevantes para a mineração de asteróides, dado que nem todos os asteróides já observados continuam com informações orbitais precisas e isso dificulta o planejamento de missões de

mineração.(BAUER, 2018)

2.4.4 Tamanho e massa

O tamanho de um asteroide pode ser estimado com base no seu albedo. O albedo é a razão entre a magnitude da luz emitida por um asteroide em relação à magnitude de luz incidente. Um albedo próximo de 1 tende a refletir 100% da luz que chega à ele, enquanto um albedo que tende 0 a é praticamente um corpo negro que absorve toda a luz incidente. Como a reflexão ou absorção de luz é uma característica que depende do comprimento de onda incidente, o albedo possui uma variação em relação à qual frequência está sendo observada. No entanto, para a região do infravermelho térmico, sua emissão está relacionada somente e diretamente ao tamanho do corpo e portanto, essa é uma forma de determinar essa característica de asteroides. Para essa determinação, para fugir do background térmico terrestre, essas medidas devem ser feitas a partir de telescópios no espaço, e isso torna esse método caro.(BAUER, 2018)

Outra forma de identificar o tamanho de asteroides é analisar o albedo na frequência ótica da luz solar. Nesse caso, o procedimento é menos preciso e não é capaz de, sozinho, determinar se o asteroide é interessante para a mineração.

Um processo que une os benefícios desses dois métodos é restringir os asteroides por meio do método de análise na região ótica e somente para os asteroides mais promissores, determinar de forma mais precisa o seu tamanho a partir de uma análise na região do infravermelho térmico.(BAUER, 2018)

Já a determinação da massa é mais desafiadora. Asteroides possuem densidades que variam bastante conforme seu tamanho devido à porosidades. Essas porosidades são mais significativas em asteroides menores, mas são relevantes mesmo em asteroides com diâmetros da ordem de quilômetros. Como ainda não há formas de determinar a porosidade dos asteroides a partir da terra, as únicas informações obtidas até agora são provenientes de meteoritos que caíram na terra no passado. Além da porosidade, outro fator relevante para a determinação da massa a partir do tamanho é a sua composição, uma vez que a densidade dos diversos possíveis materiais varia bastante. Observa-se que, mesmo inserindo a composição nos cálculos, a porosidade torna essa medida bastante imprecisa.(BAUER, 2018)

Uma forma possível de medir indiretamente a massa é a partir do efeito Yarkowsky, no qual, sabendo-se a força resultante desse efeito e as outras variáveis facilmente calculadas, a massa do asteroide pode ser definida com precisão. No entanto, somente uma quantidade muito pequena de NEO's possuem a mensuração desse efeito feita, de forma que a massa continua sendo uma variável difícil de diagnosticar a partir dessa estratégia. Além dessa

forma, aproximadamente 15% dos asteróides descobertos até hoje possuem um modelo binário de dois corpos que, a partir de seu equilíbrio kepleriano, é possível deduzir a massa desses corpos. Por fim, um último recurso pode ser utilizado, que seria a ida até o asteróide para colher informações necessárias para estimar sua massa, mas esse método seria excessivamente custoso. Ou seja, a análise de tamanho e massa de um asteróide é um dos desafios a serem superadas para um bom planejamento de uma missão de mineração.(BAUER, 2018)

2.4.5 Período Rotacional e Estrutura Interna

A partir de análises fotométricas, a intensidade da luz emitida varia conforme diferentes partes do asteróide possui raios maiores ou menores e conseqüentemente emitem uma luz mais ou forte ou mais fraca. Assim, a partir do albedo de cada parte, é possível deduzir qual o raio e reconstruir de certo modo o formato estrutural do asteróide. Além disso, quando se observa esse tipo de efeito ao longo de um tempo suficientemente grande para que a assinatura de intensidade luminosa se repita, é possível deduzir o período de rotação do asteróide observado.

Os dados existentes mostram que asteróides maiores possuem períodos de rotação maiores, mas de um modo geral, existem períodos que vão de poucos minutos até mais de dez horas. Quanto maior a velocidade de rotação, mais intensa é a força centrífuga e o asteróide perde massa dessa forma. Assim, asteróides maiores que possuem altas rotações tendem a perder mais massa e se tornam menores com o tempo. Por isso, há um consenso de que asteróides maiores tem mais porosidade pela sua rotação mais baixa, permitindo que as partes menos intensamente ligadas permanecessem no corpo do asteróide. Isso já não acontece com os asteróides menores, que tendem a ter estrutura mais próxima de monolitos. Além disso, asteróides menores também são mais facilmente influenciados pelo efeito York, uma vez que seus momentos de inércia não menores. (BAUER, 2018)

Outra característica da estrutura de asteróides consiste em ter ou não um segundo corpo próximo que o torna um sistema binário. A identificação desse tipo de estrutura ocorre a partir de eclipses identificados em suas fotometrias, uma vez que um corpo próximo iria ofuscar parcialmente ou totalmente a luz absorvida pelos sensores. Embora entenda-se que essa configuração só aconteça na minoria dos asteróides, é possível que a precisão dos sensores ainda seja baixa e a quantidade de sistemas binários na verdade seja maior do que o que é calculado atualmente. (BAUER, 2018)

Por fim, são poucas as formas de se obter informações estruturais de asteróides sem ir até o asteróide. As informações obtidas por esses métodos ainda não mais superficiais e esse é outro desafio da mineração de asteróides, uma vez que uma estrutura com muita porosidade pode ser extremamente danosa a missão pois elas aumentam a chance dos

equipamentos de perfuração quebrarem. (BAUER, 2018)

2.4.6 Análises *in situ*

Dadas as limitações dos métodos de diagnóstico a partir da terra, é provável que sejam necessárias análises mais precisas com sondas indo até o asteroide para colher informações que uma missão complexa de mineração de asteroide exija. Os outros métodos são importantes para restringir os NEO's potenciais, mas não são suficientes para garantir que uma exploração será lucrativa ou até mesmo possível. (BAUER, 2018)

Essas análises podem ser consideravelmente mais precisas, dada a quantidade de sensores e experimentos que podem ser feitos para obtenção de informações no próprio asteroide. Os métodos já utilizados em outras missões ou até mesmo alguns que são utilizados aqui na terra se tornam possíveis, como por exemplo uma análise espectroscópica de uma determinada área de análise (da ordem de milímetros quadrados) que geraria informações acerca de sua composição de forma exata. Outras formas de análise também são possíveis, como a utilização de sensores óticos para geração de imagens que permitam calcular a densidade de asteroides. Além disso, o próprio processo de pouso em um asteroide é uma fonte de dados relevantes pra mineração, uma vez que as diferenças de pousar uma pequena sonda ou uma máquina de mineração não são grandes a ponto de não serem correlatas. (BAUER, 2018)

Por fim, naturalmente, esse tipo de análise é o que possui maior custo e, para que a mineração de asteroides se torne comercialmente viável, é necessário que esse processo seja barateado. Isto porque a maioria dos asteroides não possuem composição de material suficiente para viabilizar uma missão de mineração. Estima-se que, para determinação de um asteroide com uma composição ideal para mineração, pelo menos outros dez asteroides devem ser visitados, sendo que isso daria uma precisão de somente 65% de chance de encontrar um asteroide ideal. Para 99% de precisão, o número de asteroides necessários sobe para 44. Atualmente, somente cinco missões foram realizadas à asteroides, o que mostra o quanto essa tecnologia precisa evoluir para que um grande número de expedições consiga ocorrer para fins comerciais. (BAUER, 2018)

2.5 Formas de Mineração de Asteroides Possíveis

Com a seleção do asteroide a ser minerado já feito, as propriedades de massa, estrutura interna, composição, período de rotação, etc, são importantes na determinação de qual método de extração será utilizado. De um modo geral, a parte de mineração de asteroides é um campo científico muito novo e portanto, mais especulativo.

2.5.1 Exploração Bruta *in situ*

Seria a retirada de material bruto dos asteroides na própria órbita em que o asteroide se encontra, e envio deste material para a terra sem processamento, isto é, com os elementos de interesse mas também com outros materiais menos relevantes. Uma das principais dificuldades e custos desse possível método é com o transporte de grandes massas que possuem baixo valor econômico específico (isto é, baixo preço por quilo de material transportado, inviabilizando esse processo). (BAUER, 2018)

2.5.2 Exploração Completa *in situ*

Nesse caso, ainda na órbita do asteroide, a exploração seria feita de forma que somente os elementos de interesse fossem preparados e enviados para a terra. Nesse caso, o custo de transporte deixaria de ser inviabilizante como para o primeiro método exposto, uma vez que somente os elementos de interesse, de alto valor específico, seriam trazidos. Porém, a maior dificuldade desse método seria na construção de uma forma de mineração que fosse resistente à falhas ao longo do período de mineração. Como o processo, até mesmo na terra hoje, é bastante complexo, é muito alta a chance de uma falha grave acontecer, não ter como ser reparado e ser fatal para a missão. (BAUER, 2018)

2.5.3 Transporte do asteroide para a órbita terrestre

Uma outra forma de minerar um asteroide seria trazendo para uma órbita ao redor da terra, permitindo assim, qualquer tipo de manutenção necessária para exploração continuar e ainda, um custo relativamente baixo de transporte de material entre o asteroide e os locais de uso terrestres. A maior dificuldade nesse caso seria o processo de trazer o asteroide para a órbita terrestre, uma vez que esse tipo de manobra é extremamente complexa, exige altíssimas quantidades de energia e ainda possui um risco associado à colisão do asteroide com a terra. (BAUER, 2018)

2.5.4 Impacto do asteroide com a terra ou a lua

Embora seja, de fato, uma possibilidade que viabilizaria a mineração de um asteroide, esse método possui dificuldade similar ao tratado anteriormente, mas aumenta o risco de algum tipo de dano considerável ser causado. Porém, como (BAUER, 2018) pontua, não há nada que regule essa ação como proibida e poderia ser aplicada, a princípio.

2.6 Análise Geral

Observa-se, a partir de todas as informações científicas atuais, que são muitos os desafios para que a mineração de asteróides se torne uma realidade comercial. Pela falta de conhecimento científico nesse campo que possui potencial de afetar tanto a humanidade, torna-se necessária a criação de algumas visões de futuro distintas acerca de como esse objetivo pode vir a ser alcançado.

3 Prospecção Tecnológica

Desde governos até empresas privadas, organizações possuem interesses estratégicos e deveres cívicos que tornam seu planejamento uma atividade de máxima importância. Nesse contexto, estudos relacionados ao futuro auxiliam essas organizações a priorizar seus investimentos em P&D, investimentos estruturais, políticas ativas e criação de novos produtos, entre outras decisões estratégicas. (FIRAT; MADNICK, 2008)

Essa necessidade está relacionada diretamente com a Análise de Tecnologias Orientadas ao Futuro (**Future Oriented Technology Analysis**, FTA), grupo de estudos e ações que objetivam prever e direcionar a evolução da tecnologia e seus impactos sociais, ambientais e de governança. Dentro das FTA's existem uma grande variedade de atividades, incluindo *technology forecasting*, *technology intelligence*, *roadmapping*, *assessment* e *technology foresight*. (LEITE, 2017)

No entanto, ainda há confusões terminológicas nesse campo de estudo, uma vez que aplicações práticas costumam se utilizar simultaneamente de mais de um método de FTA. A principal diferença se dá entre os termos de *foresight* e *forecast*: enquanto *forecast* é mais relacionado à estudos técnicos com caráter preditivo e probabilístico, *foresight* é um processo mais completo das forças que moldam o futuro a longo prazo. Assim, *foresight* tende a buscar processos que envolvam pessoas e inclui suas decisões na investigação de futuro, enquanto *forecast* busca o máximo de precisão em seus resultados, não incluindo questões subjetivas relacionadas às decisões humanas. Ambos os termos, quando traduzidos para português, podem ser definidos como Prospecção Tecnológica. (MADEU, 2019)

Observa-se que *technology foresight* engloba *forecast* como possível forma de análise durante a construção de seus processos e visão ampla - sendo, portanto, uma definição que serve melhor aos fins deste estudo. Assim, definimos Prospecção Tecnológica como um conjunto de técnicas e processos que visam, de forma intencional e sistemática, compreender, antecipar e influenciar as mudanças tecnológicas, incluindo suas potenciais direções, taxas de evolução, características e efeitos, correlacionando essas informações com futuros desejáveis projetados. (LEITE, 2017)

3.1 Categorização de FTA's pela sua Natureza

A maioria dos métodos de *Future Oriented Technology Analysis* podem ser aplicados no formato de *technology foresight*, isto é, com enfoque em processos, ações e visão de longo prazo. Por se tratar de um grupo amplo de métodos, existem diversas formas de categorizar essas ferramentas, sendo algumas delas: categorizações pela sua natureza, por sua abordagem e por sua família de métodos. (BARBOSA, 2018)

Em um primeiro momento, a categorização pela sua Natureza divide os métodos entre qualitativos, quantitativos e semiquantitativos. Métodos qualitativos são aqueles que se apoiam em dados subjetivos de pessoas e organizações envolvidas, enquanto métodos quantitativos utilizam dados e estatísticas de indicadores diversos, tais como indicadores sociais e econômicos. Os métodos semiquantitativos são aqueles que se baseiam em informações subjetivas para quantificar as opiniões, criando pesos e relevância para as informações, para então basear sua visão de futuro.

Um exemplo de processo quantitativo é a análise de correlação feita geralmente entre duas variáveis para entender se elas possuem algum tipo de relacionamento previsível. Já a Análise dos *Stakeholders* pode ser qualitativa, uma vez que consiste em capturar informações de *stakeholders* e entendê-las para projetar o futuro provável. Esse último método também pode ser aplicado de forma semi-quantitativa, uma vez que é possível quantificar aspectos comuns das respostas e colocar pesos distintos para cada tipo de *stakeholder* de forma a melhorar a precisão da análise.

3.2 Categorização de FTA's por sua Abordagem

Divide os métodos entre normativo, que busca chegar em um futuro pré-determinado a partir do presente; e exploratório, que extrapola tendências do presente para possíveis futuros. O *Backcasting*, por exemplo, possui abordagem normativa, uma vez que define um futuro preferível e busca correlacionar, partindo do futuro para o presente, quais são os resultados parciais até lá e quais ações devem ser tomadas para tal futuro se tornar realidade. Já o método de extrapolação de tendências é, por definição, um método exploratório: parte de dados e estatísticas presentes para simular como seria o futuro a partir de tendências identificadas.

3.3 Categorização de FTA's por sua Família de Métodos

A categorização por família de métodos busca identificar padrões de aplicação entre os métodos e categorizá-los entre nove tipos: Opinião de Especialistas, Análise de ten-

dências, Monitoramento e Inteligência, Estatísticos, Modelagem e Simulação, Cenários, Valor/Econômicos/Decisões, Descritivos e Matrizes, e Criatividade. (FIRAT; MADNICK, 2008) Observa-se que, neste caso, diversos métodos podem estar em mais de uma família simultaneamente, além de poderem ser combinados entre si para tornar os resultados mais confiáveis.

3.3.1 Opinião de Especialistas

A família de métodos classificada como "Opinião de Especialistas" consiste no entendimento e no *forecasting* acerca do desenvolvimento tecnológico a partir de consultas intensivas com *experts* sobre os assuntos relevantes a cada estudo. Alguns exemplos de métodos nessa família são:

- **Delphi (pesquisa iterativa):** consiste em um processo de entrevistas com especialistas sobre temas técnicos de forma iterativa até que todos entrem em um consenso sobre um objeto de estudo.
- **Grupos Focais (paineis, *workshops*, etc):** consiste em construir um grupo de pessoas selecionadas para interagirem com algum tipo de contexto comum, como por exemplo assistir um vídeo, ter alguma experiência específica, etc.
- **Entrevistas:** consiste em criar um processo de entrevistas com pessoas selecionadas, com roteiros estruturados ou não, para extrair de suas experiências informações que podem ajudar na compreensão do futuro.

3.3.2 Análise de Tendências

A família de métodos "Análise de Tendências" consiste na continuação temporal de séries históricas de dados por meio da identificação de padrões e tendências. (FIRAT; MADNICK, 2008) Alguns exemplos são:

- **Extrapolação de Tendências:** método no qual uma curva representando dados históricos é analisada e extrapolada por meio de identificação de tendências. (BARBOSA, 2018)
- **Análise de Impacto de Tendências:** é uma extensão do método de extrapolação de tendências no qual possíveis eventos sem precedentes são considerados para análise e inclusos nos estudos.
- **Análise de Precursores:** este método consiste no estudo de tecnologias passadas e como essas podem influenciar tecnologias futuras.
- **Análise de Ondas Longas:** consiste na análise de dados históricos como somatório

de ciclos de diferentes períodos de repetição. Esse método é usualmente encontrado em estudos relacionados à economia.

3.3.3 Monitoramento e Inteligência

Essa família de métodos busca monitorar organizações, ambientes e tecnologias em busca de mudanças no horizonte presente que podem impactar a adoção de tecnologias no mercado. (FIRAT; MADNICK, 2008) Exemplos:

- **Monitoramento de Ambiente Organizacional:** envolve a observação, monitoramento e análise de uma organização por todos os ângulos que forem importantes para o estudo, tais como tecnológico, cultural, social, etc.

- **Bibliometria:** consiste em analisar documentos científicos com métodos quantitativos para encontrar padrões e correlações entre temas de interesse.

3.3.4 Estatísticos

Métodos estatísticos são aqueles que utilizam de conceitos e análises estatísticas para construir suas projeções. Alguns exemplos são:

- **Análise de Correlação:** é quando duas ou mais variáveis focais são estudadas para identificar algum tipo de relacionamento previsível.

- **Análise Demográfica:** quando dados demográficos são utilizados para apoiar estratégias e projeções.

- **Análise de Impacto Cruzado:** é um método que analisa a correlação entre as probabilidades de eventos ocorrerem e se influenciarem.

- **Análise de Risco:** consiste em uma grande quantidade de diferentes formas de entender, prevenir e reduzir o impacto negativo de eventos adversos em um determinado contexto.

3.3.5 Modelagem e Simulação

Corresponde à métodos que se apoiam na construção de modelos que seguem regras simplificadas de partes do "mundo real" e a simulação da evolução desses modelos, com posterior análise para gerar previsões e entender comportamentos presentes e futuros. Exemplos:

- **Modelagem Baseada em Agentes:** é um sistema computacional onde agentes virtuais interagem entre si e com o ambiente baseado em regras de interação.

- **Análise de Ciclo de Vida:** este método consiste em uma análise iterativa sobre os impactos ambientais e sociais de um produto em todo seu ciclo de vida,
- **Modelos Causais:** são modelagens que consideram efeitos de causa efeito em suas regras de simulação.
- **Modelo de Difusão:** é um modelo matemático de adoção de tecnologias, normalmente formando uma curva em formato de S desde o começo da adoção do mercado até sua estagnação.
- **Sistema Adaptativos Complexos:** é um modelo que insere agentes que agem de forma interconectada, gerando comportamentos imprevisíveis e complexos em um sistema de simulação.
- **Substituição Tecnológica:** método que considera dois produtos em fases distintas de difusão tecnológica: um em fase avançada e definhamento enquanto o outro em ascensão na curva de adoção, atendendo a mesma necessidade do primeiro, mas com algum tipo de evolução/vantagem.

3.3.6 Cenários

A família de métodos de "Cenários" consiste no agrupamento dos métodos que criam diferentes conceitos de futuro e estuda essas possibilidades. Geralmente cada cenário possui suas premissas bem estabelecidas para que se torne realidade e suas características diferem em critérios claros de outros cenários possíveis. Exemplos de métodos que fazem parte dessa família são:

- **Análise de Cenários:** esse método busca construir diferentes possibilidades de futuro e correlacionar as ações e eventos que devem acontecer para cada um desses cenários se tornarem realidade.
- **Simulação de Cenários:** consiste na criação de uma simulação que representa o resultado de ações ou valores de entrada, de modo a ser possível testar um certo comportamento ou resposta de um sistema; serve, também, para entender diferentes possíveis cenários de acordo com diferentes possíveis valores de entrada.
- **Field Anomaly Relaxation (FAR):** equivale à uma extensão do método de análise de cenários, mas incluindo explicitamente anomalias nos resultados esperados, de forma a abranger disrupções tecnológicas, por exemplo.

3.3.7 Valor/Econômicos/Decisões

Essa categoria compreende métodos que criam formas de analisar decisões sistematicamente, em diversos aspectos e modelos diferentes de análise. Exemplos são:

- **Árvore de Relevância:** consiste em quebrar um determinado contexto de análise em diversos níveis hierárquicos de análise que se correlacionam, gerando diversas situações distintas.
- **Análise de Opções:** é uma comparação sistemática entre diferentes opções levantadas.
- **Análise de Custo-Benefício:** método que busca correlacionar de forma quantitativa os benefícios e os custos de alternativas diversas para então pautar decisões de quais caminhos são mais eficientes.
- **Modelos de Base Econômica:** são modelos que criam representações de economias locais para entender e projetar o desenvolvimento econômico de delas.

3.3.8 Descritivos e Matrizes

É uma família de métodos que descrevem de forma explícita os passos e informações de problemas ou propostas analisadas. Exemplos:

- **Analogias:** busca formas análogas de entender comportamentos de tecnologia e seus impactos na sociedade.
- **Backcasting:** esse método destina-se a analisar futuros desejáveis, partindo da realidade futura até a presente, e listando e avaliando a viabilidade de ações necessárias para gerar aquele futuro - assim gerando, também, uma noção de viabilidade para aquele futuro desejado.
- **Análise Organizacional:** é um método de análise bem amplo que compreende todas as formas de se analisar uma organização, com intuito de gerar possíveis melhorias que maximizem as chances dos objetivos da organização serem alcançados.
- **Análise de Mitigação:** esse método busca prevenir e mitigar riscos e danos conhecidos sobre o desenvolvimento tecnológico, desenvolvimento de produtos ou outras decisões estratégicas.
- **Análise Morfológica:** consiste na determinação e correlação entre todas as possibilidades de diferentes aspectos de estudo, isto é, trazer o maior número de informações e possibilidades para compreensão em relação a um determinado assunto de interesse.
- **Roadmapping:** equivale a um mapa de passos e conquistas que se relacionam temporalmente, conectados de forma a direcionar organizações e realidades para contextos

desejáveis.

- **Avaliação de Impacto Social:** busca avaliar as consequências sociais, ambientais e de governança de políticas, decisões, ações ou desenvolvimentos tecnológicos aderidos pela sociedade.

- **Avaliação de Múltiplas Perspectivas:** é uma metodologia que analisa problemas e propostas em relação a três perspectivas distintas: técnica, organizacional e pessoal. Constuma levar em consideração várias pessoas para cada uma das perspectivas, porém, a perspectiva técnica deve ser convergente em relação à sua visão única e científica.

3.3.9 Criativos

Essa família de métodos consiste em intensificar e valorizar a criatividade das pessoas na geração de cenários possíveis ou desejáveis. Alguns exemplos são:

- **Brainstorming:** é a organização estruturada da geração de ideias por um grupo. Existem diversas metodologias de conduzir *brainstormings*, tais como *brainwriting*, por exemplo.

- **Workshops Criativos:** são eventos imersivos que fazem grupos específicos e selecionados de pessoas entrarem em contato máximo com um determinado assunto por meio de atividades que aumentam o entendimento do grupo. Em seguida, outras atividades podem ser realizadas para gerar ideias e propostas para aquele tema.

- **TRIZ:** é uma abordagem sistemática e racional para gerar inovação e ideias criativas que solucionem um problema em foco.

- **Geração de Visão:** consiste na criação de um futuro aspiracional que traduz valores de uma pessoa ou de uma organização.

- **Análise de Ficção Científica:** esse método busca analisar trabalhos de ficção científica para gerar ideias e cenários possíveis.

3.4 Análise Geral dos Métodos

Observa-se que existe uma grande variedade de métodos disponíveis e que muitos deles são sinérgicos ou complementares, de forma que boa parte das aplicações de Prospecção Tecnológica utilizam mais de um método. Além disso, existem outros métodos além destes trazidos como exemplos e explicados brevemente neste estudo. Assim, o primeiro passo para trabalhar com Prospecção Tecnológica se torna a escolha de quais métodos se mostram mais interessantes para os fins específicos de cada aplicação.

3.5 Método de Interesse: Análise de Cenários

A mineração de asteróides é um campo muito novo da tecnologia e possui poucos dados históricos e estruturados disponíveis para criação de métodos exploratórios e de característica quantitativa. Nesse contexto, percebe-se a necessidade de aplicação de um método que seja mais amplo e basilar para a estruturação dos estudos de FTA's acerca deste assunto. Assim, o método de análise de cenários torna-se interessante, uma vez que permite uma construção flexível de diferentes futuros para posteriores aprofundamentos.

A origem deste método é militar, mas a partir da década de 60 essa metodologia começou a ser estruturada e aplicada em outras áreas. Os EUA e a França foram os países que se destacaram no desenvolvimento destas técnicas, de modo que os tipos de métodos são caracterizados como pertencentes à escola norte-americana ou à escola francesa.

Os estudos de Bradfield et al. (2005) categorizam as aplicações de cenários em 3 linhas, sendo elas: modelo lógico-intuitivo; modelo de tendências influenciadas por probabilidades; e o modelo *la prospective* - sendo somente esse último da escola francesa em contraste aos dois primeiros que são da escola norte-americana.

3.5.1 O Modelo Lógico-intuitivo

O modelo lógico-intuitivo parte da premissa de que as decisões de negócios e consequentemente o futuro são determinadas a partir de relacionamentos complexos de origem política, econômica, tecnológica, social e ambiental. (AMER; JETTER, 2013) Por conta disso, a estratégia usada para contornar essa complexidade se baseia em processos causais e lógicos bem estabelecidos e trabalhados por pessoas que possuem autoridade no assunto específico discutido. Assim, sua origem torna-se mais interna e sua aplicação costuma-se se concentrar em questões mais específicas, uma vez que parte do material que se usa para determinar as relações causais são imprecisas, qualitativas e difíceis de prever, tais como demanda de produtos, ações de consumidores, política externa, condições econômicas, etc.

Um ponto importante e essencial nesse método é o estudo minucioso dos fatores e hipóteses que levam aos processos causais e lógicos, com objetivo de, iterativamente, evoluir o processo de decisão. Além disso, não há trabalho quantitativo e por isso ele se encontra no grupo de métodos intuitivos. Existem diversas formas de trabalhar com base no modelo lógico-intuitivo - variando de 5 até 15 passos - porém, o mais aceito e utilizado é o modelo proposto por Stanford (Stanford Research Institute International - SRI). (AMER; JETTER, 2013)

De um modo geral, os passos seguem uma direção macro que parte da identificação de eventos emergentes até a combinação de hipóteses e incertezas acerca do futuro, para

então finalizar na criação dos cenários combinados.

3.5.1.1 1° Passo: Aprofundamento Teórico

O primeiro passo consiste em responder a pergunta: "o que está amadurecendo ou evoluindo na realidade atual que pode indicar ou fortalecer uma tendência de futuro?". Para isso, um estudo aprofundado e extensivo acerca da realidade acerca do tema trabalhado deve ser feito, de forma teórica, para dar base para o resto do planejamento de cenários. (BUARQUE, 2003)

3.5.1.2 2° Passo: Variáveis Determinantes e Tendências Visíveis

Após isso, o segundo passo consiste na identificação clara das variáveis centrais do tema, isto é, variáveis que possuem alguma sensibilidade na determinação de aspectos futuros, e em seguida, identificar as tendências visíveis de evolução - essas tendências são chamadas de condicionantes. Ou seja, nesse segundo passo, busca-se responder a pergunta: "quais são os principais fatores que influenciam a realidade e suas relações de causa-efeito?". Isso é feito analisando com detalhe o embasamento teórico construído anteriormente. (BUARQUE, 2003)

3.5.1.3 3° Passo: Categorização dos Condicionantes

O terceiro passo é a análise de cada condicionante em dois fatores: relevância e incerteza. Ou seja, após entender as tendências visíveis, algumas delas possuem um comportamento mais seguro e previsível e, portanto, possuem baixa incerteza, enquanto outras possuem incertezas maiores de como devem se comportar no futuro. De forma análoga, alguns condicionantes possuem maior impacto que outros e portanto, sua relevância é maior. (BUARQUE, 2003)

As condicionantes são divididas em três categorias principais: elementos constantes; mudanças pré-determinadas e; mudanças incertas. Os elementos constantes são características invariantes com o tempo, como o tamanho do planeta terra ou a quantidade de asteróides existentes no sistema solar. Já as mudanças pré-determinadas são aquelas em que há uma grande segurança do comportamento futuro, como por exemplo a tendência de mudança do tamanho da população. Devido à sua segurança de previsibilidade, essas categorias de condicionantes não influenciam a criação de diferentes cenários futuros - isto é, são parte existente em qualquer um dos cenários projetados. Assim, a base para criação de cenários futuros distintos são as mudanças incertas. Nesse terceiro passo, portanto, uma lista de condicionantes mais relevantes de cada um desses três tipos deve ser gerada para contextualizar os futuros que serão gerados em seguida. (BUARQUE, 2003)

3.5.1.4 4° Passo: Construção de Conjunto de Hipóteses Coerentes e Plausíveis

A construção dos cenários propriamente dita acontece no quarto passo, onde são geradas hipóteses que validam ou invalidam as mudanças incertas. Assim, cada cenário consiste em um conjunto de hipóteses coesas e correlacionadas geradas a partir das mudanças incertas listadas no terceiro passo do método. É importante notar que, para que um cenário seja válido, é importante que as hipóteses sejam plausíveis e tenham um caminho lógico que prove que essa realidade descrita é possível e até mesmo provável. Nesse passo, cada cenário deve também ser analisado quanto a sua coerência interna, ou seja, entendendo como as hipóteses se auto-influenciam e como elas dialogam com as outras condicionantes analisadas. Caso haja inconsistência, esse cenário deixa de ser válido e algum tipo de correção ou iteração nas hipóteses ocorre para a atualização do cenário projetado. (BUARQUE, 2003)

3.5.1.5 5° Passo: Exploração de Cada Cenário

Pode-se observar que a metodologia possui dois pontos centrais importantes: a identificação de mudanças incertas e a formulação de hipóteses de cada cenário. Após esses dois passos, um quinto passo pode ser incluído em relação à uma descrição mais analítica de cada cenário proposto, explorando um pouco as características e impactos que essa realidade futura prevista pode ter. Esse passo é equivalente à criação de imagens futuras para aumentar a compreensão do cenário futuro proposto. (AMER; JETTER, 2013)

3.5.2 O Modelo de Tendências Influenciadas por Probabilidades

O modelo de tendências influenciadas por probabilidades é um método quantitativo que se baseia em dois métodos principais para a geração de diferentes cenários: a análise de impacto de tendências e a análise de impacto cruzado. Enquanto o primeiro método foca em entender potenciais eventos que podem disruptar o esperado para determinadas tendências históricas, o segundo foca em entender como um evento pode influenciar o outro e a probabilidade de isso ocorrer. Esses dois métodos são aplicados em conjunto com métodos de extrapolação de tendências, como as análises de séries temporais.

Assim, essa escola de construção de cenários utiliza abordagens predominantemente estatísticas, na qual algumas informações qualitativas podem ser inseridas para aumentar a credibilidade dos cenários gerados. Enquanto métodos tradicionais se baseiam somente nos dados históricos de tendências relevantes para o estudo, esse modelo permite a adaptação desse modelo para algo mais real - que possui discontinuidades que disruptam as tendências.

Por ser um método bastante abrangente, sua aplicação já foi observada em diversas áreas e escopos. Para ajudar na construção desses métodos, diversas técnicas proprietárias foram desenvolvidas, sendo as mais populares a *IFS - Interactive Future Simulations*, desenvolvida pelo *Battelle Memorial Institute*, a *INTERAX - Interactive Cross Impact Simulation*, desenvolvida pela *Enzer* no *Center for Future Research - CFR, University of Southern California*, e o *SMIC - Cross Impact Systems and Matrices* desenvolvido por Duperrin e Gabus. (AMER; JETTER, 2013)

3.5.3 O Modelo *La Prospective*

O modelo *La Prospective* possui como objetivo o entendimento do mundo contemporâneo, tanto em questões de pontenciais positivos quanto negativos (riscos). Em contraste aos dois modelos previamente explicitados, *La Prospective* tem característica normativa, gerando imagens futuras de cenários a serem buscados ou evitados, de forma a guiar políticas e decisões. (AMER; JETTER, 2013)

A metodologia se baseia em 4 conceitos essenciais:

1. **A Base:** consiste no escaneamento e análise profunda da situação presente, de forma específica ao tema de interesse.
2. **O Contexto Externo:** é o estudo de como é o ambiente externo que envolve o tema de interesse, tal como questões sociais, econômicas, ambientais, etc.
3. **As Projeções:** são simulações com base em tendências históricas e outros métodos, que derivam principalmente de contextos externos e da base, com foco quantitativo.
4. **As Imagens Futuras:** consiste na descrição de como o futuro seria em um determinado momento das projeções geradas, de modo a criar algo que dê pra imaginar e compreender as características de cada cenário.

Como pode-se perceber, esse modelo possui tanto análises de origem lógico-intuitivo quanto análises quantitativas de extrapolação de tendências - inclusive, modelos de análise de impacto cruzado ou de análise de impacto de tendências são métodos comuns desse modelo. (BRADFIELD, 2005) descreve esse modelo como um combinado dos dois modelos previamente descritos. Sua característica normativa, no entanto, permite que sua abrangência seja ainda maior e sua aplicação já foi observada em diversos temas públicos como educação, urbanização e outros. (AMER; JETTER, 2013)

3.5.4 Comparação entre os métodos

Observa-se que, para tecnologias novas e potencialmente disruptivas, os dados históricos que rodeiam a tecnologia são imprecisos e pouco difundidos. Assim, para os fins desse trabalho, o modelo de tendências influenciadas por probabilidade e o modelo *La Prospective* não são indicados. Já o modelo lógico-intuitivo parece se encaixar bem na análise profunda de uma nova tecnologia como a de mineração de asteróides. Essa metodologia, portanto, será a utilizada neste trabalho. Ela pressupõe, no entanto, um grande conhecimento interno e de autoridade dos idealizadores dos cenários e, portanto, este trabalho torna-se apenas uma primeira visão em relação à tecnologia em questão e outros trabalhos subsequentes são necessários para tornar essa análise mais precisa.

4 Metodologia

Os modelos *La Prospective* e de tendências influenciadas pelas probabilidades possuem análises quantitativas relevantes e demandam dados históricos estruturados para que seja possível aplicá-los. Quando se trata de mineração de asteróides, a tecnologia está ainda em fase de desenvolvimento. Portanto, dados organizados e acessíveis são difíceis de serem encontrados em abundância e isso faz com que esses primeiros dois modelos não sejam os escolhidos para este trabalho.

Já o modelo lógico-intuitivo não possui essa barreira e pode servir de base para criação de trabalhos futuros, que aprofundem o conhecimento dessa tecnologia. Por isso, esse foi o modelo escolhido. Ele se resume em 5 passos:

1. Aprofundamento da realidade atual da tecnologia de mineração de asteróides, tanto em campos científicos quanto empresariais;
2. Refinamento do estudo teórico nas principais variáveis e tendências identificadas, isto é, fatores e condicionantes do estudo;
3. Categorização dos condicionantes por relevância e incerteza.
4. Geração de hipóteses correlacionadas e análise de coerência para criação de cenários de futuro;
5. Extrapolação dos cenários para aumentar a clareza em relação ao que cada cenário está causando na sociedade.

Por meio deste método, objetiva-se entender quais são os possíveis cenários nos quais a tecnologia de mineração de asteróides terá se tornado uma realidade comercial.

4.1 Materiais e Métodos

Para a execução desse modelo, cada passo será adaptado à uma estrutura específica que dialogue com o contexto de uma tecnologia ainda nas primeiras fases de desenvolvimento.

4.1.1 Aprofundamento Teórico

A mineração de asteróides é uma tecnologia bastante ampla e com diversas etapas essenciais: descoberta; diagnóstico e seleção; e a missão de fato. Dentre essas três grandes etapas, a construção de cenários será direcionada para uma parte específica da missão: qual das formas de mineração é mais promissora.

Neste contexto, existem três possibilidades que serão consideradas: exploração bruta *in situ*; exploração completa *in situ*; e transporte do asteróide para a órbita terrestre. A quarta possibilidade de fazer o asteróide colidir com a Terra ou a Lua foi desconsiderada, uma vez que o risco de dano à vida na Terra desse tipo de manobra seria demasiadamente alto para sequer ser considerado.

Assim, o aprofundamento teórico focará em destrinchar tudo que for relevante para cada uma dessas três formas de mineração, trazendo desde seus processos mais relevantes até as tecnologias necessárias e dificuldades principais envolvidas em cada contexto. Dessa forma, a base para a execução dos passos seguintes terá sido feita.

4.1.2 Variáveis e Condicionantes

Com uma visão mais precisa de como cada uma das três formas de mineração funcionam e onde a tecnologia possui mais barreiras ou mais avanços recentes, será possível analisar quais são as variáveis determinantes e em seguida, construir as condicionantes.

Definindo de forma mais clara, as variáveis consistem em métricas capazes de alterar o estado da tecnologia. Ou seja, características técnicas ou econômicas que, se alteradas, possuem influência significativa no que está sendo analisado. Essas variáveis determinantes são somente as métricas, sem uma correlação direta de causalidade - já a condicionante é a junção dessa métrica com algum tipo de contexto de causalidade. Por exemplo: uma métrica para o processo de encher um copo de água é o volume de água que existe no copo. Já a condicionante poderia ser "caso o volume de água ultrapasse 300 ml, a água transbordará". Assim, a variável determinante do acontecimento é uma métrica. Já a frase inteira, é uma condição imposta à métrica e, portanto, uma condicionante.

Em um primeiro momento, todas as variáveis determinantes serão listadas em um quadro com quatro colunas, conforme o exemplo do quadro 4.1. A primeira coluna será

composta de todas as variáveis identificadas. As colunas dois, três e quatro serão preenchidas com um X caso a variável em questão possua relevância para aquela forma de mineração.

QUADRO 4.1 – Modelo de quadro para variáveis determinantes

Variáveis Determinantes	Exploração Bruta in situ	Exploração Completa in situ	Trazer para a Órbita Terrestre
Variável Determinante 1	X		
Variável Determinante 2		X	X
Variável Determinante 3	X		X

Fonte: Autor.

Após listar essas variáveis determinantes, cada X no quadro será transformado em uma condicionante a partir da conexão dessa variável com o contexto no qual ela possui influência determinante. Assim, uma lista de condicionantes para cada modelo será construída e dará a base necessária para o passo seguinte.

4.1.3 Categorização dos Condicionantes

Nesse momento, cada uma das formas de mineração de asteróides possuirá uma lista de condicionantes para serem analisadas. Cada lista será transformada em um quadro no formato do quadro 4.2, então serão três quadros desse tipo. A primeira coluna possuirá as condicionantes identificadas de cada formato de mineração. A segunda coluna terá seu grau de relevância em uma nota de um a cinco, no sentido de que uma relevância cinco significa uma condicionante altamente impactante, enquanto uma relevância nota um seria pouquíssimo impactante para a forma de mineração em análise.

QUADRO 4.2 – Modelo de quadro para cada formato de mineração

Condicionantes	Relevância	Incerteza	Selecionada?
Condicionante 1	5	Incerta	Sim
Condicionante 2	4	Incerta	Sim
Condicionante 3	3	Pré-determinada	Não
Condicionante 4	2	Incerta	Não
Condicionante 5	5	Constante	Não

Fonte: Autor.

Na terceira coluna será feita a análise de incerteza na qual cada condicionante receberá uma das três categorias: constante, mudança pré-determinada, mudança incerta.

Conforme (BUARQUE, 2003), as condicionantes constantes são variáveis que influenciam a realidade mas raramente são alteradas na janela de tempo em análise. Assim, são elementos constantes em qualquer tipo de análise feita. Já as mudanças pré-determinadas são aquelas que há uma alta previsibilidade de como será o futuro daquela condicionante, tal como a população mundial, por exemplo. Por fim, as condicionantes incertas serão aquelas que não há como ter uma previsibilidade alta em relação à como ou quando ela se concretizará.

Na última coluna, uma ponderação entre relevância e incerteza será feita. Para construção de cenários, o ideal é trabalhar com altas relevâncias e incertezas - isto é, trabalharemos com relevâncias de nota três ou superior, e excluiremos as condicionantes constantes ou as mudanças pré-determinadas. Assim, teremos a lista final de condicionantes incertas e relevantes para construção dos cenários.

4.1.4 Geração das Hipóteses

Em posse de todas as condicionantes relevantes para cada formato de mineração, um cenário otimista será gerado no qual as hipóteses serão construídas de forma que garanta que cada uma das condicionantes favoreça a realização daquele formato de mineração. Esse conjunto de hipóteses, então, será analisado em uma matriz de sinergia/conflicto, conforme o quadro 4.3.

QUADRO 4.3 – Modelo de Matriz de Sinergias para Análise das Hipóteses de Cada Cenário Otimista

Concretização das Condicionantes	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Hip. 4	Hip. 5
Hip. 1	Black				
Hip. 2	Green	Black			
Hip. 3	Red		Black		
Hip. 4	Green	Green		Black	
Hip. 5		Red		Green	Black

Fonte: Autor.

Essa ferramenta correlacionará os efeitos de sinergia ou conflito entre uma hipótese e outra. No exemplo do quadro 4.3, a hipótese dois, ao se concretizar, aumenta a facilidade para que a hipótese um se concretize também, isto é, elas são sinérgicas e portanto, possuem a cor verde na célula que as une. Já as hipóteses dois e cinco possuem a cor vermelha, significando que a concretização de uma delas implica aumentar a dificuldade da concretização da outra, isto é, elas possuem conflito entre si. Por fim, as hipóteses que

não possuem relacionamento de sinergia ou conflito permanecem em branco.

Após essa primeira análise de sinergia para os cenários otimistas, uma revisão será feita, em duas partes: a primeira parte consistirá na análise da dificuldade de concretização de cada hipótese; a segunda parte focará nos principais conflitos entre hipóteses, elencando quais são as possíveis soluções desses conflitos e o nível de relevância de cada conflito.

Ao fim dessa revisão, cenários intermediários e mais conservadores serão gerados, levando em conta as condicionantes mais difíceis e os conflitos mais intensos. Assim, cada uma das formas de mineração possuirá também seu cenário conservador e as principais dificuldades de evolução dele, que será considerado como o cenário final.

4.1.5 Exploração dos Cenários

No último passo, cada cenário será analisado no quesito de dificuldade geral a partir da quantidade de hipóteses difíceis e conflitos encontrados, de forma que será ranqueado qual das formas de mineração possui indícios mais promissores.

A partir desse ponto, utilizaremos as hipóteses desse cenário final pra gerar imagens da realidade em uma análise PESTEL. Isto é, o cenário mais provável implicará em influências na sociedade global e utilizaremos uma matriz que explanará possíveis realidades Políticas, Econômicas, Socioculturais, Tecnológicas, Ecológicas (ambientais) e Legais, conforme o exemplo do quadro 4.4.

QUADRO 4.4 – Exemplo de análise PESTEL para tornar mais claro o potencial do cenário envolvido

Político	Econômico	Sociocultural	Tecnológico	Ecológico	Legal
Possível	Possível	Possível	Possível	Possível	Possível
Impacto 1	Impacto 1	Impacto 1	Impacto 1	Impacto 1	Impacto 1
Possível	Possível	Possível	Possível	Possível	Possível
Impacto 2	Impacto 2	Impacto 2	Impacto 2	Impacto 2	Impacto 2
Possível	Possível		Possível	Possível	
Impacto 3	Impacto 3		Impacto 3	Impacto 3	
Possível	Possível		Possível	Possível	
Impacto 4	Impacto 4		Impacto 4	Impacto 4	
Possível				Possível	
Impacto 5				Impacto 5	

Fonte: Autor.

5 Resultados e Discussões

Conforme mencionado no capítulo 4, a metodologia deste trabalho focará na explicação das principais dificuldades de cada forma possível de mineração, e não em outras dificuldades gerais que essa tecnologia também enfrentará.

Além disso, é importante realçar o fato de que, no modelo de prospecção de cenários lógico-intuitivo, muitas das análises são previsões lógicas que provavelmente terão que ser superadas, mesmo que ainda existam poucos ou nenhum estudo científico por trás. Assim, é importante entender que o trabalho visa criar um primeiro direcionamento acerca dessa tecnologia e portanto possui característica especulativa, apenas.

5.1 Aprofundamento Teórico nas Formas de Mineração de Asteróide

Inicialmente, para situar de forma mais precisa o ponto de aprofundamento e geração das hipóteses para construção dos cenários, o fluxograma da figura 5.1 foi criado. Somente o terceiro passo macro do processo será detalhado.

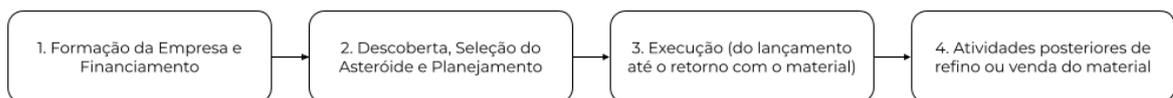


FIGURA 5.1 – Processos gerais para minerar um asteróide. Fonte: autor.

Os passos um, dois e quatro, que não serão abordados nesse trabalho, são tão relevantes para o sucesso comercial da mineração espacial quanto o passo em análise. No entanto, analisar com profundidade todos os passos simultaneamente tornaria esse trabalho demasiadamente complexo e fugiria de seu escopo.

5.1.1 Exploração Bruta *in situ*

A exploração bruta na própria órbita do asteroide é uma das formas mais simples para imaginar como uma mineração poderia ocorrer. Suas principais etapas estão resumidas no fluxograma da figura 5.2.

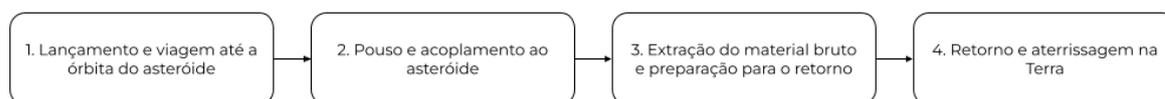


FIGURA 5.2 – Processos gerais para minerar um asteroide por meio de uma exploração bruta *in situ*. Fonte: autor.

Esse formato consiste em ir até o asteroide em sua própria órbita, minerá-lo sem fazer nenhum tipo de tratamento do material retirado, e trazer esse material de volta para a terra.

Nesse contexto, a primeira parte de lançamento e viagem até a órbita do asteroide é a menos complexa. Isso porque, em cinco outras missões descritas na seção 2.3, essa barreira já foi superada com sucesso. No entanto, todas essas missões possuíam objetivos distintos do objetivo de mineração. Assim, uma particularidade surge ao se tratar de uma missão com objetivo de mineração bruta: o tamanho do foguete e do payload. Isso porque, quando se trata de mineração, tamanhos e volumes importam para a lucratividade da missão. Essas características, portanto, podem tornar-se desafios por elevarem o custo e a complexidade de construção desse tipo de equipamento.

Em seguida, o pouso e acoplamento do sistema de mineração ao asteroide possui uma alta complexidade. A depender do asteroide a ser minerado, o método de acoplamento irá variar, uma vez que as características como tamanho, densidade e composição do asteroide são relevantes. (BAUER, 2018) Para asteroides M-type, que possuem altas concentrações de materiais do grupo da platina, uma possibilidade seria usar arpões que penetrem o asteroide e permitam o sistema de mineração se aproximar com precisão do local de interesse de mineração. Isso não seria possível, por exemplo, em asteroides compostos de materiais menos rígidos como alguns C-type (ROSS, 2001). Essa complexidade também aumenta na medida em que cada asteroide terá ou não uma gravidade significativa, aumentando a quantidade de formas possíveis de aproximação e a incerteza acerca de como esse processo seria conduzido.

O terceiro passo é ainda mais complexo do que o segundo. Existem algumas formas de se extrair o material bruto, mas no caso de asteroides do tipo M, o mais provável seria a utilização de ferramentas de corte. Esse processo envolveria o dimensionamento do tamanho e profundidade dos cortes, além de características especiais tais como a mecânica

da máquina de cortes em um ambiente de pouca gravidade. Além disso, a retenção do material cortado também é relevante, uma vez que a velocidade de escape de asteróides costuma ser da ordem de centímetros. Isso demandará formas de impedir que o material cortado escape do alcance dos equipamentos (ROSS, 2001). Por fim, a organização desse material cortado e retido também é relevante, uma vez que ele irá ser preparado para ser trazido de volta à terra.

Em paralelo à esses desafios, todo o processo de mineração também possui uma complexidade atrelada à quando algum equipamento sofrer algum dano e precisar de manutenção. Isso consiste em um risco considerável uma vez que, caso o problema seja específico ou complexo de ser resolvido, pode acabar impedindo completamente o sucesso da missão.

Por fim, o último passo é similar ao primeiro. Algumas missões conseguiram retornar amostras de asteróides à Terra, mas a complexidade surge na medida em que o tamanho do material que retorna é significativamente maior, para que a missão seja lucrativa.

5.1.2 Exploração Completa *in situ*

Para essa forma de mineração, o fluxograma da figura 5.2 precisa ser alterado em uma única etapa extra, conforme a figura 5.3.

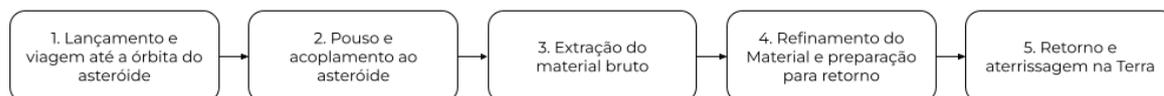


FIGURA 5.3 – Processos gerais para minerar um asteróide por meio de uma exploração completa *in situ*. Fonte: autor.

No primeiro passo da exploração completa, o problema de peso de payload pode ser acentuado ou aliviado. Por ser necessário máquinas mais complexas para o passo de refinamento do material minerado, isso tem potencial de aumentar o peso e conseqüentemente o custo de lançamento e viagem do equipamento até o asteróide. Porém, o material final a ser trazido também será reduzido, o que pode tornar certas necessidades de combustível, por exemplo, menores, o que tornaria o peso total menor.

Já na segunda parte, uma complexidade extra é gerada pela estabilização da estação de refinamento, necessário para que o processo de refinamento ocorra com a menor chance de necessidade de manutenção. O terceiro passo também possui algumas alterações, já que nesse caso, o material bruto extraído será dimensionado de forma a maximizar a eficiência do refinamento, e não do transporte.

No quarto passo é que entra um dos maiores riscos. Por se tratar de uma tecnologia avançada e complexa até mesmo na Terra, é alta a chance de ocorrência de problemas graves que exigirão manutenção avançada. Essa é uma das principais desvantagens desse método (BAUER, 2018). Em (JAMES, 2018), o autor considera que esse tipo de manutenção complexa pode ser feita de três principais formas: humanos indo junto do equipamento de mineração; humanos na terra operando robôs por meio de comunicação direta; e totalmente automatizada pelos próprios robôs enviados na missão. A primeira alternativa possui muitas barreiras - tais como a exposição excessiva da equipe à campos magnéticos espaciais durante tempos longos - e ainda o aumento considerável do custo da missão. A segunda forma, via comunicação direta com o robô sendo operado por alguém da Terra, uma barreira de comunicação de alguns minutos a cada sinal torna quase impraticável esse formato. Isso porque para cada manutenção, diversos inputs/outputs de comunicação serão necessários, tornando o tempo de manutenção de várias horas, dias ou até mesmo semanas. Por fim, embora tecnologicamente mais desafiadora, a terceira opção parece ser a mais eficiente.

O último passo, enfim, possui um benefício claro, uma vez que não será gasto combustível para trazer material de baixo valor para a Terra, isto é, somente materiais de interesse serão transportados de volta - diminuindo o custo total da missão nessa etapa.

5.1.3 Transporte do Asteróide para a Órbita da Terra ou da Lua

Nesse formato de mineração, tanto uma exploração bruta ou completa é possível, mas isso somente aconteceria após o asteróide ter sido transferido para uma órbita ao redor da Terra ou da Lua. Além disso, por estar em uma órbita próxima e de custo menor e acessível por mais tempo, a mineração do asteróide poderia ser feita ao longo de várias missões secundárias durante algum período de tempo que otimize o custo ou o lucro da atividade. Para representar essas possibilidades, o fluxograma da figura 5.4 foi construído.

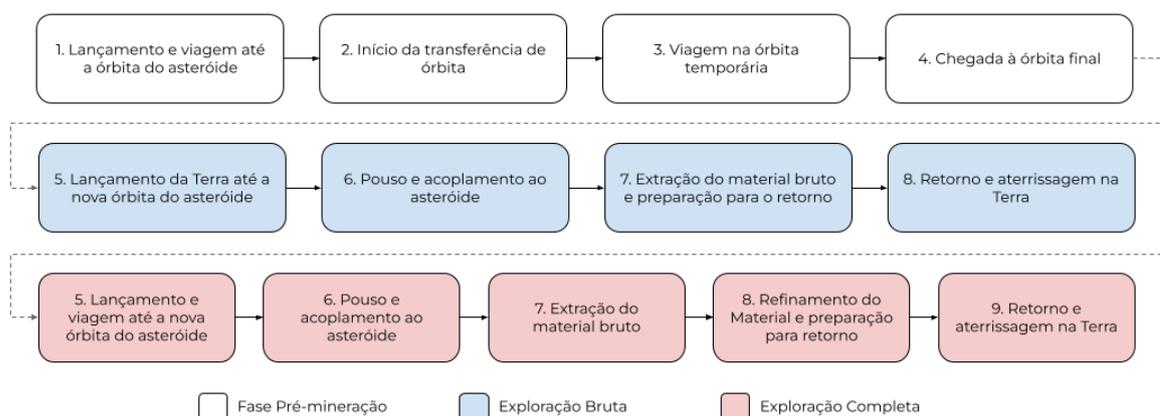


FIGURA 5.4 – Processos gerais para minerar um asteroide por meio de uma transferência de órbita. Fonte: autor.

Esse fluxograma possui uma fase pré-mineração e, após ela, quantas fases de mineração forem necessárias. Nesse ponto, uma das duas possibilidades de exploração entraria em ação e poderia ter várias repetições.

O primeiro passo possui uma pequena vantagem em relação às outras formas tratadas nas subseções 5.1.1 e 5.1.2. Por não ser necessário levar material complexo de mineração, o custo da viagem pode ser reduzido por isso. Porém, o custo de combustível para a transferência de órbita do asteroide provavelmente será a parte mais expressiva da estrutura de custos, e isso pode tornar a missão mais cara do que em outros métodos que desloquem somente parte do asteroide de volta à Terra.

No entanto, o passo dois, três e quatro dessa estratégia para mineração possui uma complexidade de planejamento considerável. A missão AIDA será fundamental para dar as primeiras bases de planejamento desse tipo de controle sobre a órbita de asteroides. Porém, somente as informações teóricas e as informações que essa missão dará provavelmente não serão suficientes para garantir o sucesso da transferência de órbita. Além disso, esse tipo de missão, além do risco financeiro caso a missão falhe, ainda possui um risco à vida na Terra, uma vez que um erro de transferência de órbita poderia ocasionar a colisão do asteroide com a Terra ou com a Lua, o que seria danoso em ambos os casos. Assim, esse tipo de missão deve ser realizado somente com um grau muito alto de segurança e confiabilidade do sucesso da transferência de órbita.

Para que o asteroide permaneça em órbita durante todo o período de mineração, é provável que seja necessário que essas órbitas sejam perto dos pontos de Lagrange L4 ou L5, por conta de suas propriedades gravitacionais de equilíbrio (BAUER, 2018). Além disso, a transferência de órbita possui uma estimativa de duração da ordem de dez anos, o que pode tornar inviável ou muito longo para fins comerciais. Alguns tipos de transferência orbitais são possíveis:

- **Transferência de Hohmann:** é considerada o tipo de transferência orbital mais simples de ser aplicada. Ela considera órbitas circulares em que a força centrífuga da órbita é equilibrada com a força gravitacional de atração, e pra transferência ocorrer, uma força propulsora altera instantaneamente a velocidade orbital, alterando, assim, a órbita de equilíbrio para uma órbita de transferência. Assim que o objeto chegasse na posição espacial de sua órbita final, novamente um impulso seria dado de forma a corrigir a velocidade para a qual a órbita final se tornaria a de equilíbrio (BAUER, 2018).
- **Transferência Bi-elíptica:** para NEO's que possuem órbitas elípticas, esse tipo de transferência é indicado. Nele, de forma similar à transferência de Hohmann, a velocidade do objeto é alterada de forma a ele entrar em órbitas intermediárias. Mas nesse caso, são duas órbitas de transferência até a chegada na órbita final e, portanto, são necessárias três correções de velocidade (BAUER, 2018).
- **Estilíngues Gravitacionais:** outra ferramenta que pode ser utilizada para a mudança de órbita do asteroide são os estilíngues gravitacionais. Eles consistem em combinar a trajetória do asteroide de forma que ele troque quantidade de movimento com algum outro corpo, como um planeta, e assim sua velocidade e trajetória sejam alteradas. Isso já foi utilizado em missões e pode ser uma estratégia para economizar combustível nas transferências de órbitas (BAUER, 2018).

Como pode-se observar, a complexidade de uma missão que envolve a transferência de órbita de um asteroide inteiro é consideravelmente maior. Porém, alguns ganhos são consideráveis e claros após esses primeiros quatro passos serem executados com sucesso. Por estar em uma órbita próxima à Terra, o custo de transporte para o asteroide e do asteroide para a Terra seria consideravelmente menor. Além disso, a tecnologia de mineração tanto bruta quanto completa poderiam ser menos avançadas, dado que, na ocorrência de um problema que exija manutenção complexa, tanto a ida de um especialista quanto uma operação remota seriam resoluções simples, ao contrário da situação em que o asteroide ainda estivesse em sua órbita original. Por fim, a mineração bruta pode ser a mais indicada nesse caso, dado que o custo de trazer o material para a Terra deixará de ser um fator tão relevante.

5.2 Variáveis Determinantes e Condicionantes para a Mineração de Asteróides

A partir de uma análise de todos os fatores que influenciam a chance de sucesso de uma missão de mineração de asteróides, o quadro 5.1 foi construída. Nela, há uma lista das variáveis determinantes identificadas e uma breve definição do que essa variável significa.

Em seguida, a análise de quais formas de mineração possuem correlação com as variáveis foi feita, gerando o quadro 5.2. Nela, é importante observar que, por conta da transferência de órbita ser uma possibilidade complementar às explorações bruta e completa, as variáveis determinantes foram consideradas em relação à parte da transferência de órbita em si e de potenciais ganhos/perdas por ter feito a transferência, e não em relação a aspectos específicos das minerações que se sucederiam após a transferência.

Com as variáveis determinantes em mãos, as listas de condicionantes foram construídas a partir da conexão dessas variáveis com o contexto de cada uma. Essas listas estão representadas nos quadros 5.3, 5.4 e 5.5.

Essas condicionantes foram construídas a partir da base teórica de quais são os níveis de requisitos que cada variável determinante deve satisfazer para que aquela forma de mineração seja provável de se tornar comercial. Por exemplo, a condicionante acerca do nível de tecnologia do sistema de manutenção quando se trata de uma exploração completa *in situ* é maior do que a mesma variável aplicada à exploração bruta *in situ*.

Por fim, também foi considerado que o investimento em uma missão de mineração de asteróides é de altíssimo valor e que, portanto, os stakeholders da missão querem garantir a maior taxa de sucesso possível para garantir um retorno sobre seus investimentos. Assim, a maioria das condicionantes foi levada ao extremo de modo a quase garantir o sucesso da missão.

QUADRO 5.1 – Variáveis determinantes encontradas e suas definições

Variáveis Determinantes	Descrição
Massa total de viagem de ida	A soma da massa de todos os componentes necessários para a missão ocorrer no momento do lançamento
Custo total de viagem de ida	A estimativa do quanto custará o lançamento e a viagem até o asteróide
Massa total de viagem de volta	A soma da massa de todos os componentes e materiais que voltarão para a terra após a mineração ser finalizado
Custo total de viagem de volta	A estimativa do quanto custará a viagem de volta e aterrissagem na Terra
Tamanho do Sistema de Mineração	As dimensões dos equipamentos de mineração
Confiabilidade do Sistema de Mineração	O complementar da taxa de erros do sistema de mineração
Confiabilidade do Acoplamento	O complementar da taxa de erros do sistema de acoplamento
Gravidade do Asteróide	Qual a gravidade líquida do asteróide
Tamanho do Asteróide	As dimensões do asteróide
Massa do Asteróide	A massa total do asteróide antes da mineração
Confiabilidade do Sistema de Refinamento	O complementar da taxa de erros do sistema de refinamento
Velocidade de Escape do Asteróide	A velocidade para a qual um objeto escapa da gravidade do asteróide
Nível de Tecnologia do Sistema de Manutenção	O quão avançada é a tecnologia do sistema de manutenção
A Distância Terra-Asteróide para Comunicação	A distância em minutos-luz ou segundos-luz entre o asteróide e a Terra para fins de comunicação
O Tempo Total de Missão	O tempo desde o lançamento do sistema completo até o retorno dele à Terra
Risco à Vida na Terra	A existência ou não de um risco de dano à vida na Terra
Nível de Controle de Mecânica Orbital	O quão avançado precisa ser o controle de mecânica orbital da missão inteira

Fonte: Autor.

QUADRO 5.2 – Variáveis Determinantes Correlacionadas às Formas de Mineração

Variáveis Determinantes	Exploração Bruta in situ	Exploração Completa in situ	Transferência de Órbita
Massa total de viagem de ida	X	X	X
Custo total de viagem de ida	X	X	X
Massa total de viagem de volta	X	X	
Custo total de viagem de volta	X	X	X
Tamanho do Sistema de Mineração	X	X	
Confiabilidade do Sistema de Mineração	X	X	
Confiabilidade do Acoplamento	X	X	X
Gravidade do Asteróide	X	X	X
Tamanho do Asteróide	X	X	X
Massa do Asteróide	X	X	X
Confiabilidade do Sistema de Refinamento		X	
Velocidade de Escape do Asteróide	X	X	X
Nível de Tecnologia do Sistema de Manutenção	X	X	
A Distância Terra-Asteróide para Comunicação	X	X	X
O Tempo Total de Missão			X
Risco à Vida na Terra			X
Nível de Controle de Mecânica Orbital			X

Fonte: Autor.

QUADRO 5.3 – Condicionantes para a Exploração Bruta *in situ*

Cód	Condicionantes para a Exploração Bruta <i>in situ</i>
C. 1	Massa total de viagem de ida deve ser reduzida ao mínimo possível para aumentar a capacidade de trazer material no retorno
C. 2	Custo total de viagem de ida deve ser o menor possível para maximizar a margem de lucro
C. 3	Massa total de viagem de volta deve ser grande o suficiente para que haja uma quantidade considerável de metal valioso após refinamento na terra
C. 4	Custo total de viagem de volta deve ser otimizado em relação ao lucro gerado
C. 5	Tamanho do Sistema de Mineração deve ser o menor que ainda consiga cumprir com o objetivo de material minerado
C. 6	Confiabilidade do Sistema de Mineração deve ser alta o suficiente para que a chance de sucesso seja de mais de 99.9%.
C. 7	Confiabilidade do Acoplamento deve ser superior à 99.9%
C. 8	Gravidade do Asteróide deve ser conhecida previamente
C. 9	Tamanho do Asteróide deve ser grande o suficiente para permitir melhores condições de acoplamento e mineração
C. 10	Massa do Asteróide deve ser grande o suficiente para ter a quantidade de metal objetivado
C. 11	Velocidade de Escape do Asteróide deve ser a que uma facilidade de retenção de material minerado e não aumente o custo de retorno
C. 12	Nível de Tecnologia do Sistema de Manutenção deve ser alto para garantir que os erros encontrados sejam resolvidos
C. 13	A Distância Terra-Asteróide para Comunicação deve ser o suficiente para receber alguns reports por dia para acompanhar o andamento da missão

Fonte:

Autor.

QUADRO 5.4 – Condicionantes para a Exploração Completa *in situ*

Cód	Condicionantes para a Exploração Completa <i>in situ</i>
C. 1	Massa total de viagem de ida deve ser o ideal pra garantir uma operação de sucesso, dada a alta tecnologia requerida para o refinamento
C. 2	Custo total de viagem de ida deve ser o menor possível para maximizar a margem de lucro
C. 3	Massa total de viagem de volta deve ser dimensionada de forma a garantir um bom lucro, mas também reduzir riscos de perda de material
C. 4	Custo total de viagem de volta deve ser otimizado em relação ao lucro gerado
C. 5	Tamanho do Sistema de Mineração deve ser o menor que ainda consiga cumprir com o objetivo de material minerado
C. 6	Confiabilidade do Sistema de Mineração deve ser alta o suficiente para que a chance de sucesso seja de mais de 99.9%.
C. 7	Confiabilidade do Acoplamento deve ser superior à 99.9%
C. 8	Gravidade do Asteróide deve ser conhecida previamente
C. 9	Tamanho do Asteróide deve ser grande o suficiente para permitir melhores condições de acoplamento, mineração e refinamento
C. 10	Massa do Asteróide deve ser grande o suficiente para ter a quantidade de metal objetivado
C. 11	Confiabilidade do Sistema de Refinamento deve ser maior que 99.9% de sucesso
C. 12	Velocidade de Escape do Asteróide deve ser a que una facilidade de retenção de material minerado e não aumente o custo de retorno
C. 13	Nível de Tecnologia do Sistema de Manutenção deve ser muito alto para garantir que os erros encontrados tanto no sistema de mineração quanto no de refinamento sejam resolvidos
C. 14	A Distância Terra-Asteróide para Comunicação deve ser o suficiente para receber alguns reports por dia para acompanhar o andamento da missão

Fonte: Autor.

QUADRO 5.5 – Condicionantes para a Transferência de Órbita

Cód	Condicionantes para a Transferência de Órbita
C. 1	Massa total de viagem de ida deve ser otimizada de forma a garantir o sucesso da transferência de órbita, mesmo perdendo eficiência por meio de redundâncias
C. 2	Custo total de viagem de ida deve ser minimizado, desde que não interfira na garantia máxima de sucesso da transferência
C. 3	Custo total de viagem de volta deve ser dimensionado a ter boa chance de recuperação do equipamento utilizado para a missão
C. 4	Confiabilidade do Acoplamento deve ser superior à 99.9%
C. 5	Gravidade do Asteróide deve ser conhecida previamente
C. 6	Tamanho do Asteróide deve ser dimensionado de forma a minimizar riscos à Terra mas ainda conseguir ser lucrativo
C. 7	Massa do Asteróide deve ser dimensionado de forma a minimizar riscos à Terra mas ainda conseguir ser lucrativo
C. 8	Velocidade de Escape do Asteróide deve ser baixa para minimizar sua influência na transferência de órbita e assim manter a complexidade reduzida
C. 9	A Distância Terra-Asteróide para Comunicação deve ser pequena o bastante para que diversas atualizações sejam possíveis por dia
C. 10	O Tempo Total de Missão deve ser pequeno o suficiente para que haja financiamento para o período da missão
C. 11	Risco à Vida na Terra deve ser minimizado ao extremo, de forma que a chance seja inferior à 0.01% de qualquer tipo de dano
C. 12	Nível de Controle de Mecânica Orbital deve ser muito alto de forma a garantir que a missão concluirá a transferência minimizando riscos à população humana

Fonte: Autor.

5.3 Categorização dos Condicionantes para a Mineração de Asteróides

Após a criação das condicionantes, elas foram categorizadas em níveis de relevância e incerteza, sendo que as mais relevantes e incertas foram selecionadas para construção das hipóteses. Os resultados dessas categorizações e escolhas para a exploração bruta *in situ* estão representados nos quadros 5.6 e 5.7.

QUADRO 5.6 – Condicionantes categorizadas para a Exploração Bruta *in situ*

Exploração Bruta <i>in situ</i>			
Cód	Relevância	Incerteza	Selecionada?
C. 1	3	Pré-determinada	Não
C. 2	3	Pré-determinada	Não
C. 3	4	Incerta	Sim
C. 4	5	Incerta	Sim
C. 5	2	Incerta	Não
C. 6	5	Incerta	Sim
C. 7	5	Incerta	Sim
C. 8	3	Pré-determinada	Não
C. 9	3	Pré-determinada	Não
C. 10	4	Pré-determinada	Não
C. 11	2	Pré-determinada	Não
C. 12	5	Incerta	Sim
C. 13	3	Pré-determinada	Não

Fonte: Autor.

QUADRO 5.7 – Condicionantes selecionadas para a Exploração Bruta *in situ*

Condicionantes Selecionadas para a Exploração Bruta <i>in situ</i>	
Cód	Descrição
C. 3	Massa total de viagem de volta deve ser grande o suficiente para que haja uma quantidade considerável de metal valioso após refinamento na terra
C. 4	Custo total de viagem de volta deve ser otimizado em relação ao lucro gerado
C. 6	Confiabilidade do Sistema de Mineração deve ser alta o suficiente para que a chance de sucesso seja de mais de 99.9%.
C. 7	Confiabilidade do Acoplamento deve ser superior à 99.9%
C. 12	Nível de Tecnologia do Sistema de Manutenção deve ser alto para garantir que os erros encontrados sejam resolvidos

Fonte: Autor.

De forma análoga, os quadros 5.8 e 5.9 são referentes às condicionantes da exploração completa *in situ* e os quadros 5.10 e 5.11 são as condicionantes da transferência de órbita.

QUADRO 5.8 – Condicionantes categorizadas para a Exploração Completa *in situ*

Exploração Completa <i>in situ</i>			
Cód	Relevância	Incerteza	Selecionada?
C. 1	1	Incerta	Não
C. 2	2	Incerta	Não
C. 3	3	Incerta	Sim
C. 4	4	Incerta	Sim
C. 5	2	Incerta	Não
C. 6	5	Incerta	Sim
C. 7	5	Incerta	Sim
C. 8	4	Pré-determinada	Não
C. 9	4	Pré-determinada	Não
C. 10	4	Pré-determinada	Não
C. 11	5	Incerta	Sim
C. 12	3	Pré-determinada	Não
C. 13	5	Incerta	Sim
C. 14	3	Pré-determinada	Não

Fonte: Autor.

QUADRO 5.9 – Condicionantes selecionadas para a Exploração Completa *in situ*

Condicionantes Selecionadas para a Exploração Completa <i>in situ</i>	
Cód	Descrição
C. 3	Massa total de viagem de volta deve ser dimensionada de forma a garantir um bom lucro, mas também reduzir riscos de perda de material
C. 4	Custo total de viagem de volta deve ser otimizado em relação ao lucro gerado
C. 6	Confiabilidade do Sistema de Mineração deve ser alta o suficiente para que a chance de sucesso seja de mais de 99.9%.
C. 7	Confiabilidade do Acoplamento deve ser superior à 99.9%
C. 11	Confiabilidade do Sistema de Refinamento deve ser maior que 99.9% de sucesso Nível de Tecnologia do Sistema de Manutenção deve ser muito alto para garantir
C. 13	que os erros encontrados tanto no sistema de mineração quanto no de refinamento sejam resolvidos

Fonte: Autor.

QUADRO 5.10 – Condicionantes categorizadas para a Transferência de Órbita

Transferência de Órbita			
Cód	Relevância	Incerteza	Selecionada?
C. 1	2	Pré-determinada	Não
C. 2	2	Incerta	Não
C. 3	2	Incerta	Não
C. 4	5	Incerta	Sim
C. 5	4	Pré-determinada	Não
C. 6	5	Pré-determinada	Não
C. 7	5	Pré-determinada	Não
C. 8	2	Pré-determinada	Não
C. 9	3	Pré-determinada	Não
C. 10	4	Incerta	Sim
C. 11	5	Incerta	Sim
C. 12	5	Incerta	Sim

Fonte: Autor.

QUADRO 5.11 – Condicionantes selecionadas para a Transferência de Órbita

Transferência de Órbita	
Cód	Descrição
C. 4	Confiabilidade do Acoplamento deve ser superior à 99.9%
C. 10	O Tempo Total de Missão deve ser pequeno o suficiente para que haja financiamento para o período da missão
C. 11	Risco à Vida na Terra deve ser minimizado ao extremo, de forma que a chance seja inferior à 0.01% de qualquer tipo de dano
C. 12	Nível de Controle de Mecânica Orbital deve ser muito alto de forma a garantir que a missão concluirá a transferência minimizando riscos à população humana

Fonte: Autor.

5.4 Geração dos Cenários e Hipóteses

A partir das condicionantes escolhidas nos quadros 5.7, 5.9 e 5.11, podemos construir cada um dos cenários.

5.4.1 Cenário para a Exploração Bruta *in situ*

Inicialmente, as hipóteses otimistas geradas foram:

1. A massa total de viagem de volta é grande consegue trazer uma quantidade grande de metal valioso final, após refinamento na terra, e isso faz com que a missão seja muito lucrativa e permita novas missões;
2. Além disso, o custo total da viagem de volta está com um nível de otimização alto, viabilizando até mesmo que materiais não tão raros ou puros sejam trazidos;
3. O sistema de mineração já é confiável e robusto o suficiente para não gerar riscos à missão, com confiabilidade superior à 99.9%;
4. O acoplamento já foi testado em todas as formas necessárias e sua confiabilidade é superior a 99.9%;
5. A tecnologia de manutenção é robusta e consegue resolver 999 a cada 1000 problemas que podem ocorrer.

Analisando essas hipóteses em relação à sua coerência interna, temos a matriz representada no quadro 5.12.

QUADRO 5.12 – Matriz de Sinergia para as Hipóteses Otimistas da Exploração Bruta *in situ*

Cód	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Hip. 4	Hip. 5
Hip. 1	■				
Hip. 2	■	■			
Hip. 3			■		
Hip. 4				■	
Hip. 5			■		■

Fonte: Autor.

Analisando hipótese à hipótese, dado o contexto de exploração bruta *in situ*, observa-se:

- A hipótese dois possui uma dificuldade altíssima de ser atingida
- As hipóteses três e cinco são sinérgicas, pois caso o sistema de mineração é robusto e confiável, a necessidade de manutenção diminui, assim como o inverso também é válido. Assim, essa sinergia permite que os níveis dos requisitos dessas hipóteses sejam aliviados. Essa redução pode ser feita nos critérios de uma hipótese específica, mantendo a outra, ou ao mesmo tempo nas duas hipóteses, mas com intensidade menor. Devido ao fato de que fazer dois sistemas chegarem em níveis bons de confiabilidade costuma ser mais razoável do que um desses sistemas ser ótimo enquanto o outro mediano, iremos remodelar ambas as hipóteses;
- A hipótese quatro, embora não possua grandes desafios específicos ou conflitos com outras hipóteses, ainda é uma tecnologia muito nova e confiabilidades tão altas não devem ser conseguidas em um primeiro momento imaturo da tecnologia. Assim, ela também deve ser corrigida mas de forma menos severa que as outras;
- O conflito entre as hipóteses um e dois ocorre pois, quanto mais material for trazido, mais difícil e caro será essa viagem de volta. Assim, isso torna ainda mais complexa a análise dessas duas hipóteses e a severidade de adaptação delas deve ser alto.

Por meio dessas análises, podemos gerar o seguinte conjunto de hipóteses mais conversadoras, que constituem o cenário final para essa forma de mineração:

1. A massa total de viagem de volta é grande consegue trazer uma quantidade de metal valioso final, que após refinamento na Terra, causa um prejuízo pequeno que não inviabilize futuras missões que consiga resultados melhores;
2. Além disso, o custo total da viagem de volta está com um nível de otimização que não impede as primeiras viagens de acontecer, mesmo que as primeiras ainda não sejam lucrativas, há uma boa chance de elas começarem a se tornar;
3. O sistema de mineração já é confiável e robusto o suficiente para não gerar riscos grandes à missão, com confiabilidade superior à 90%;
4. O acoplamento já foi testado em todas as formas necessárias e sua confiabilidade é superior a 98%;
5. A tecnologia de manutenção é robusta e consegue resolver 95 a cada 100 problemas que podem ocorrer.

Observa-se que, nesse cenário conservador, as primeiras missões de mineração não são lucrativas mas fornecem dados e aprendizado que gera esperança de que futuras missões

atinja lucratividade. Além disso, o risco da missão falhar e não trazer quantidade significativa de material espacial ocorre em dois principais momentos: no acoplamento ao satélite e na mineração em si. No caso do acoplamento, essa chance de insucesso é de apenas 2%, algo considerável para as primeiras missões. Já para o caso de falhas durante a mineração, isso significa que os 10% de chance de falha foi realizado e ainda, que o problema está dentro da classe de problemas com 5% de chance, o que dá uma chance composta de 0,5% desse tipo de situação ocorrer e impedir o sucesso da missão. Nesse cenário, portanto, o risco total da missão seria de 2,5%, dos quais o ponto crítico ainda seria o acoplamento. Isso significa que a missão teria sucesso a cada 40 tentativas, o que parece ser uma boa aposta para o desenvolvimento de uma tecnologia tão disruptiva.

5.4.2 Cenário para a Exploração Completa *in situ*

Para esse formato de mineração, de forma análoga à anterior, foram geradas algumas hipóteses otimistas:

1. A massa total de viagem é grande e gera muito lucro a missão, com um risco abaixo de 0.1% de perda de qualquer material na aterrissagem;
2. O custo da viagem ainda é relativamente alto, mas como a concentração de valor do material trazido é alta, o valor de venda/kg no mercado da Terra é alto o suficiente para tornar a missão muito lucrativa;
3. O sistema de mineração já é confiável e robusto o suficiente para não gerar riscos à missão, com confiabilidade superior à 99.9%;
4. O sistema de refinamento é confiável e possui taxa de erro inferior à 1%;
5. O acoplamento já foi testado em todas as formas necessárias e sua confiabilidade é superior a 99.9%;
6. A tecnologia de manutenção é robusta e consegue resolver 999 a cada 1000 problemas que podem ocorrer.

A matriz de sinergias e conflitos para esse conjunto de hipóteses está representada no quadro 5.13.

QUADRO 5.13 – Matriz de sinergia para as hipóteses otimistas do cenário de Exploração Completa *in situ*

Cód	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Hip. 4	Hip. 5	Hip. 6
Hip. 1	■					
Hip. 2		■				
Hip. 3			■			
Hip. 4	■	■	■	■		
Hip. 5				■	■	
Hip. 6			■	■		■

Fonte: Autor.

Analisando cada hipótese, sinergia e conflito com o contexto da exploração completa *in situ*, temos:

- As hipóteses um e dois não parecem ser a dificuldade nessa forma de mineração, uma vez que a hipótese quatro é sinérgia à essas duas hipóteses por ser capaz de trazer à Terra somente material útil;
- A hipótese três possui um conflito com a quatro, uma vez que o sistema de mineração deve ser capaz de dar entrada no sistema de refinamento e isso causa uma dificuldade extra no sistema de mineração. Assim, essa hipótese deve ser corrigida para níveis iniciais mais factíveis. No entanto, ela possui uma sinergia com o sistema de manutenção, uma vez que caso esse sistema seja consideravelmente bom, o sistema de mineração pode ser menos robusto;
- Observa-se que a hipótese quatro, além de ser naturalmente um grande desafio por conta do contexto, ainda possui dois conflitos com as hipóteses cinco e seis. No caso do conflito com o sistema de acoplamento, isso acontecerá porque o equipamento de refino adiciona uma complexidade extra, dado que ele é um componente extra potencialmente sensível e precisará estar em uma posição otimizada para operar corretamente. Já o conflito com o sistema de manutenção ocorre na medida em que mais um subsistema terá chance de algum tipo de problema, aumentando a complexidade do sistema de manutenção significativamente. Assim, essa hipótese é a mais complexa e corresponde a uma das maiores dificuldades dessa forma de mineração;
- A hipótese cinco continua sendo um desafio, e com o conflito com a maior complexidade de envolver um sistema de refinamento também, sua correção para uma hipótese mais conservadora é necessária;

- Já a hipótese seis é de altíssima complexidade e ainda possui conflito com o sistema de refinamento, exigindo que sua correção também seja intensa.

Assim, após essas análises, as hipóteses finais para esse cenários são:

1. A massa total de viagem é grande e gera muito lucro a missão, com um risco abaixo de 0.1% de perda de qualquer material na aterrissagem;
2. O custo da viagem ainda é relativamente alto, mas como a concentração de valor do material trazido é alta, o valor de venda/kg no mercado da Terra é alto o suficiente para tornar a missão lucrativa;
3. O sistema de mineração é minimamente confiável e robusto o suficiente para não gerar riscos grandes à missão, com confiabilidade superior à 90%;
4. O sistema de refinamento é minimamente confiável e possui taxa de erro inferior à 90%;
5. O acoplamento foi intensamente testado e trabalhado e sua confiabilidade é superior a 97%;
6. A tecnologia de manutenção é robusta e consegue resolver 80 a cada 100 problemas que podem ocorrer.

Observa-se, pois, que este cenário possui uma chance menor de sucesso, dado que tanto no acoplamento quanto na mineração em si os riscos são grandes. Para o caso do acoplamento, uma chance de erro de 3% já inviabilizaria completamente a missão, enquanto na mineração em si o risco de ocorrer um problema no sistema de mineração ou no sistema de refinamento é de $(10\%+10\% = 20\%)$, mas isso ainda teria a chance de não ser capaz de ser corrigido em 20% dos casos, dando uma chance de falha completa da missão de 4%. Assim, a chance da missão falhar por algum desses problemas ficaria em 7%, falhando aproximadamente uma vez a cada 14 tentativas em um cenário inicial. No entanto, essa forma de mineração possuiria uma chance boa de ser lucrativa desde a primeira missão que conseguisse retornar a Terra com parte significativa de material espacial planejado.

5.4.3 Cenário para o Transporte Orbital

As hipóteses otimistas pra esse cenário seriam:

1. O sistema de acoplamento e impulso nos pontos críticos de alteração de velocidade do asteróide possua confiabilidade superior à 99.9%;

2. O tempo total de missão conseguisse ser inferior à três anos, um prazo razoável para minimizar riscos de mudanças econômicas drásticas que inviabilizem a continuação da missão;
3. O risco à vida terrestre deve ser inferior à 0.01%, para que as autoridades globais não sejam contra a missão e efetivamente essa missão não seja um risco de perda de vidas humanas;
4. O nível de controle da mecânica orbital ser alto o suficiente para que, mesmo em casos de alteração inesperada, ainda haja uma chance de mais de 99.9% de algum tipo de mecanismo que desvie o asteroide de uma trajetória que arrisque a vida humana.

A matriz de sinergia e conflitos para essas hipóteses está representada no quadro 5.14.

QUADRO 5.14 – Matriz de Sinergias e Conflitos para a Transferência de Órbita

Cód	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Hip. 4
Hip. 1				
Hip. 2				
Hip. 3				
Hip. 4				

Fonte: Autor.

Pode-se observar que:

- A hipótese um possui um nível de conhecimento um pouco mais avançado do que outras tecnologias, uma vez que a missão AIDA está adquirindo dados de uma deflexão orbital em um satélite. Além disso, com um sistema de correção que a hipótese quatro forneceria, essa hipótese possui uma sinergia que a permitiria ser bem desenvolvida e atingir patamares bons de controle. Em um cenário um pouco mais conservador, seria possível diminuir um pouco a precisão de alteração de velocidades, visando fazer as correções necessárias conforme a manobra é executada;
- Já a hipótese dois possui um conflito tanto com a hipótese um quanto com a três, uma vez que uma missão mais rápida implicaria em uma dificuldade extra de ser preciso nas manobras e portanto também aumentaria o risco de colisão com a Terra. Assim, essa hipótese deve ser severamente corrigida, para manter o risco baixo e a missão viável;
- Como é uma questão inviabilizante e inegociável, a hipótese três precisa ser realmente muito bem trabalhada e possuir um nível de precisão muito alto para que esse tipo de missão seja viável;

- Para a hipótese quatro, a sinergia com a necessidade de garantir baixo risco de colisão com a Terra potencializa o desenvolvimento desse sistema. O sistema propulsor do mecanismo de correção também é análogo e pode reaproveitar boa parte dos componentes utilizados para o sistema que irá fazer as alterações principais de velocidade, o que torna essa hipótese quatro também sinérgica à hipótese um. Por fim, para uma primeira missão, é interessante que o nível de confiança desse sistema seja o menor que ainda garanta risco baixo, de forma que essa hipótese pode ser levemente aliviada.

Assim, o conjunto final de hipóteses para esse cenário seria:

1. O sistema de acoplamento e impulso nos pontos críticos de alteração de velocidade do asteróide possua confiabilidade superior à 99%;
2. O tempo total de missão conseguisse ser inferior à seis anos, um prazo ainda aceitável, mas que não minimiza completamente os riscos de mudanças econômicas que inviabilizem a continuação da missão;
3. O risco à vida terrestre deve ser inferior à 0.01%, para que as autoridades globais não sejam contra a missão e efetivamente essa missão não seja um risco de perda de vidas humanas;
4. O nível de controle da mecânica orbital ser alto o suficiente para que, mesmo em casos de alteração inesperada, ainda haja uma chance de mais de 99% de algum tipo de mecanismo que desvie o asteróide de uma trajetória que arrisque a vida humana.

Além dessa parte de manobra orbital, ainda seriam necessárias missões de exploração após o asteróide ter se estabilizado em sua órbita nova, o que agrega ainda mais complexidade a esse tipo de estratégia. Observa-se, no entanto, que esse cenário é um cenário possível, dado que nas hipóteses construídas, o risco de uma trajetória alternativa é de 0.01%(1% · 1%), e que essa trajetória errada não necessariamente colidiria com a Terra - diminuindo ainda mais o risco.

5.4.4 Análise dos Cenários

Observa-se que a complexidade e dificuldade dos cenários construídos foi bastante alta. Em termos de complexidade tecnológica, percebe-se que a exploração bruta *in situ* parece a mais provável ser resolvida, mas sem garantir lucro para a missão. Em contraste, embora possua desafios tecnológicos mais avançados, a exploração completa *in situ* seria uma forma de ter maior chance de lucro, mas também maior risco pra missão.

Por fim, nenhum desses dois cenários possui um risco significativo para a vida na Terra - ao contrário do que acontece com o cenário de transferência de órbita. Nesse último cenário, o fato desse risco existir torna muito alta a precisão necessária para viabilizar esse tipo de missão.

Assim, pode-se chegar ao fato de que o cenário de exploração bruta *in situ* é o cenário mais promissor.

5.5 Exploração do Cenário de Exploração Bruta *in situ*

Partindo da conclusão de que o cenário mais promissor é o de exploração bruta *in situ*, também a partir de seu contexto e hipóteses utilizadas para construção desse cenário, uma exploração de como seriam alguns aspectos do mundo nesse momento torna-se interessante. Essa análise foi feita nos quadros 5.15 e 5.16.

QUADRO 5.15 – Análise Pestel do Cenário de Exploração Bruta *in situ* - Parte 1

Político	Econômico	Sócio-cultural
Maiores investimentos governamentais no setor aeroespacial	Geração de maior oferta desses metais para o mercado	Aumento do acesso a alguns bens e medicamentos
Potenciais parcerias para acelerar tecnologia de mineração próprias	Queda significativa do preço desses metais	Maior consciência do potencial que o setor aeroespacial possui
Possíveis disputas sobre decisão de propriedade espacial	Queda consequente de preços de insumos que vão esses elementos, como remédios e automóveis	
	Maior número de fábricas de refinamento de metais, com consequente aumento de oferta de empregos nessa área	
	Maior interesse privado nesse tipo de atividade, aumentando a oferta de empregos no setor aeroespacial	

Fonte: Autor.

QUADRO 5.16 – Análise Pestel do Cenário de Exploração Bruta *in situ* - Parte 2

Tecnológico	Ecológico	Legal
Tecnologia aeroespacial com muito mais controle e potencial para impulsionar outros tipos de missão	Criação de sistemas mais eficientes para diminuição de poluição	Avanço na legislação de propriedade espacial
Aumento da utilização das propriedades boas desses metais em áreas que possuíam preços que antes inviabilizavam sua utilização	Aumento da massa total do planeta, com possíveis problemas ainda não dimensionados ou compreendidos	Novas definições de limites territórios ou equivalente
Atração de mais pessoas para produzir conhecimento científico e tecnológico nessa área	Alteração da composição da biosfera terrestre	

Fonte: Autor.

No contexto político, o cenário projetado impulsiona decisões complexas como a maior investimento público no setor aeroespacial, podendo gerar corridas como a que os EUA e a União Soviética disputaram para levar o homem à Lua. No entanto, também pode gerar parcerias para que os países se unam para trazer os bens espaciais para a Terra mais rapidamente. Por fim, esse tipo de momento político também abre margem para conflitos, o que é um risco considerável mas que deve-se ser minimizado com a maior cooperação possível. Assim, nesse campo, o cenário é equilibrado - nem necessariamente positivo, nem necessariamente negativo, mas pode tender para ambos os lados em um momento futuro.

Para questões econômicas, os impactos são claramente positivos. A maior oferta de recursos terá diversos impactos positivos que aceleram a economia e aumentam o bem estar geral da população.

No campo sociocultural há uma mudança significativa de acesso a determinados bens e remédios, mas também há uma mudança intensa de percepção e consciência acerca do espaço, semelhante à quando tivemos o primeiro homem a pisar na Lua - ambas mudanças positivas para a sociedade.

Em questões tecnológicas também são impactos explicitamente positivos que ajudarão a humanidade no avanço de tecnologias aeroespaciais e diversos outros campos, uma vez que esses recursos possuem propriedades úteis que hoje, devido à sua escassez e custo,

não são utilizadas em mais áreas e produtos.

Em contraste, o campo ecológico possui um viés um pouco negativo que precisará ser cautelosamente trabalhado para minimizar os impactos e riscos. Sistemas de controle de poluição, danos ao ambiente e outros podem ser trabalhados a partir da maior abundância desses elementos ou até mesmo a partir de uma economia mais potente. No entanto, o aumento da massa do planeta e a alteração de sua composição são eventos que nunca foram relevantes devido sua baixa intensidade e frequência. Caso a mineração espacial torne-se comercial, deverá haver preocupação com estes aspectos.

Por fim, em termos legais, também deverá haver avanços e atualizações das leis. A principal alteração será em incluir a privatização do espaço e como isso se dará. Por definição, essas alterações possuirão fins práticos de harmonização e organização da sociedade, sendo, portanto, um campo indiferente no quesito de impactos positivos ou negativos.

De um modo geral, a mineração espacial possui diversos benefícios e impactos positivos claríssimos que justificam sua busca e desenvolvimento, desde que observados e minimizados os riscos dessa atividade.

6 Conclusões

A mineração de asteróides é um campo bastante novo, mas também muito promissor. As barreiras tecnológicas que existem são, de um modo geral, desafiadoras, mas também possuem bases em outras áreas de conhecimento humano que podem ajudar essa nova tecnologia se tornar uma realidade nos próximos anos.

Por ser um campo que integra diversas etapas amplas e com conhecimento interdisciplinar, um empreendimento desse porte precisará de altíssimo interesse governamental ou privado, para ser capaz de conectar um grande número de pessoas capacitadas por um período longo de tempo, além de fornecer todos os recursos de alta tecnologia necessários.

Aprofundando em direção às formas possíveis de mineração, percebe-se que a forma mais promissora, de acordo com os cenários gerados neste trabalho, é a de Exploração Bruta *in situ* - na qual, após a descoberta, diagnóstico e seleção do asteróide, o sistema de mineração seria enviado para a órbita do asteróide, faria a operação de extração bruta do material e depois retornaria para a Terra. As dificuldades encontradas nas outras formas de mineração são maiores e provavelmente serão superadas posteriormente à essa.

Além disso, esse formato de mineração provavelmente começará com missões com chance de prejuízo, mas que pode gerar o conhecimento necessário para aprimorar a tecnologia até que as missões se tornem cada vez mais lucrativas. Esse mecanismo, possível nesse formato de mineração mas provavelmente não nos outros, costuma ser bastante utilizado em desenvolvimentos tecnológicos ou empresariais.

Por fim, os impactos desse tipo de atividade na sociedade humana são majoritariamente positivos. Porém, esse tipo de ação humana precisa ser feita com cautela, pois estaríamos mudando a ordem de grandeza de impacto humano na natureza e isso pode gerar efeitos catastróficos.

Após o início da mineração espacial, o modo como olhamos para o universo mudará. Enquanto hoje vemos o universo como algo distante e, apesar dos diversos experimentos, ainda muito misterioso, esse tipo de ação começa a utilizar os recursos espaciais ao nosso favor de forma mais intensa, dando mais proximidade para ideias e desbloqueio de ações

ainda mais ousadas para a humanidade.

Referências

ALAMALHODAEI, A. Astroforge raises \$13m seed round for asteroid mining ambitions. **Techcrunch**, maio 2022. Disponível em: <[https://techcrunch.com/2022/05/26-astroforge-raises-13m-seed-round-for-asteroid-mining-ambitions](https://techcrunch.com/2022/05/26/astroforge-raises-13m-seed-round-for-asteroid-mining-ambitions)>. Acesso em: 21 jul. 2022.

AMER, T. U. D. M.; JETTER, A. A review of scenario planning. **Elsevier online**, p. 23–40, ago. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016328712001978?via%3Dihub>>. Acesso em: 23 jul. 2022.

BARBOSA, C. E. **TIAMAT: um framework para apoiar a integração de métodos de prospecção tecnológica**. 2018. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BAUER, V. M. **Asteroid Mining**. 2018. 136 f. Dissertação (Mestrado em Astronomia) — Wien University, Vienna, 2018.

BRADFIELD, G. W. G. B. G. C. K. V. D. H. R. The origins and evolution of scenario techniques in long range business plannin. **Futures**, p. 795–812, jan. 2005.

BUARQUE, S. C. Metodologia e técnicas de construção de cenários globais e regionais. **ipea**, fev. 2003.

CORP, N. Asteroid mining corporation’s walking robots take first steps towards resource independence. **Nasdaq**, maio 2022. Disponível em: <<https://www.nasdaq.com/press-release/asteroid-mining-corporations-walking-robots-take-first-steps-towards-resource>>. Acesso em: 21 jul. 2022.

ELVIS J. L. GALACHE, C. L. B. K. M.; MCLEOD, K. The need for speed in near-earth asteroid characterization. **Planetary and Space Science**,, p. 155–166, fev. 2015.

FIRAT, W. L. W. A. K.; MADNICK, S. Technological forecasting – a review. **Massachusetts Institute of Technology**, p. 20, set. 2008. Disponível em: <web.mit.edu/smadnick/www/wp/2008-15.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2022.

IMARC. Platinum group metals market: Global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2022-2027. **imarc**, jan. 2022. Disponível em: <<https://www.imarcgroup.com/platinum-group-metals-market>>. Acesso em: 10 oct. 2022.

JAMES, T. **Deep Space Commodities**. 1st. ed. Gewerbestrasse: Palgrave, 2018.

LEITE, B. R. de A. **Mapeamento Tecnológico de Elementos Terras Raras com Aplicações Aeroespaciais**. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

MADEU, F. C. B. **Prospecção Tecnológica Utilizando a Análise Multicritério e Técnicas Bibliométricas: Estudos de Caso para o Setor de Defesa**. 2019. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Defesa) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

RAUCH, G. M. M. S. Environmental relevance of the platinum-group elements. **ELEMENTS**, v. 10, p. 259–263, ago. 2008. Disponível em: <elementsmagazine.org/>. Acesso em: 10 out. 2022.

ROSS, S. D. Near-earth asteroid mining. **Control and Dynamical Systems**, p. 81–107, dez. 2001.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

^{1.} CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	^{2.} DATA <p style="text-align: center;">24 de novembro de 2022</p>	^{3.} REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-106/2022</p>	^{4.} N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">73</p>
^{5.} TÍTULO E SUBTÍTULO: <p>Geração e análise de cenários futuros para a mineração de asteroides com alta presença de materiais do grupo da platina (PGE's)</p>			
^{6.} AUTOR(ES): <p>Daniel Martins Frageri</p>			
^{7.} INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): <p>Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA</p>			
^{8.} PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p>Asteróides, Mineração, Cenários</p>			
^{9.} PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p>1. Asteróides 2. Minerais 3. Mineração 4. Cenários 5. Astronomia 6. Metalurgia</p>			
^{10.} APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional <p>ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial. Orientador: Prof Dr. Christopher Shneider Cerqueira; co-orientador: Prof. Dr. Lucas Novelino Abdala. Publicado em: 2022.</p>			
^{11.} RESUMO: <p>Asteróides são corpos celestes que possuem tamanho e composição variadas. Alguns deles são os M-type, que possuem metais em sua composição, como os metais do grupo da platina - os PGE's (Platinum Group Elements). Dentre esses asteróides, alguns possuem órbitas que em alguns momentos, se aproximam da Terra. A mineração de asteróides consiste na extração desses materiais para fins econômicos. Essa tecnologia ultimamente tem atraído atenção do mercado privado e está cada vez mais próxima de se tornar uma realidade comercial. Para entender quais são as formas possíveis de fazer isso acontecer e qual delas possui maior chance de ser a primeira a ser utilizada foi utilizada a prospecção tecnológica por meio do método de geração de cenários. Cada forma de mineração foi analisada e hipóteses de como ela aconteceria no futuro foram geradas. Após analisar cada uma das hipóteses e cenários, concluiu-se que o modelo de Extração Bruta $\{in situ\}$ era o modelo mais promissor e que possuía desafios menores, embora ainda consideravelmente grandes. Por fim, os impactos desse cenário futuro foram analisados nos aspectos políticos, econômicos, socioculturais, tecnológicos, ecológicos e legais (PESTEL).</p>			
^{12.} GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;">(X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO</p>			