



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ
LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ENTRE PASSADO E FUTURO: UM ESTUDO SOBRE OS
TELESCÓPIOS ESPACIAIS HUBBLE E JAMES WEBB**

Edwardo Hernandys Fontenele Freitas

PIRIPIRI

- 2025 -

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ
LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ENTRE PASSADO E FUTURO: UM ESTUDO SOBRE OS
TELESCÓPIOS ESPACIAIS HUBBLE E JAMES WEBB**

Edwardo Hernandys Fontenele Freitas

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Licenciatura em Física do Campus Professor Antônio Giovanne Alves de Sousa da Universidade Estadual do Piauí, como requisito parcial à obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Anilton de Brito Vieira Filho.

PIRIPIRI

- 2025 -

F849e Freitas, Edwardo Hernandys Fontenele.

Entre passado e futuro: um estudo sobre os telescópios
espaciais Hubble e James Webb / Edwardo Hernandys Fontenele
Freitas. - 2025.

55f.: il.

Monografia (graduação) - Curso de Licenciatura em Física,
Universidade Estadual do Piauí, 2025.

"Orientador: Profº. Dr. Anilton de Brito Vieira Filho".

1. Telescópios Espaciais. 2. Hubble. 3. James Webb. I. Vieira
Filho, Anilton de Brito . II. Título.

CDD 530



GOVERNO DO ESTADO DO PIAUÍ
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ – UESPI
CONSELHO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO



ANEXO A RESOLUÇÃO CEPEX 003/2021 (TCC)
ATA DE APRESENTAÇÃO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e cinco dias do mês de novembro de 2025, às quatorze horas, no laboratório de Matemática, localizado no campus Professor Antônio Geovane Alves de Sousa, em Piripiri-PI da UESPI, na presença da banca examinadora, presidida pelo professor Dr. **Anilton de Brito Vieira Filho** e composta pelos seguintes membros: 1) professora Dra. **Eloise Cristina de Souza Rodrigues Garcia** e o 2) professor Dr. **Agmael Mendonça Silva**, o aluno **Edwardo Hernandys Fontenele Freitas** apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Licenciatura em Física como elemento curricular indispensável à Colação de Grau, tendo como título: **“ENTRE PASSADO E FUTURO: UM ESTUDO SOBRE OS TELESCÓPIOS ESPACIAIS HUBBLE E JAMES WEBB”**.

A Banca Examinadora reunida em sessão reservada deliberou e decidiu pelo resultado **APROVADO**, obtendo a nota final **10,0** ora formalmente divulgado ao aluno e aos demais participantes, e eu professor Dr. **Otávio de Brito Silva**, na qualidade de professor titular da disciplina de TCC II lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos membros da Banca Examinadora e pelo aluno apresentador do trabalho.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br OTAVIO DE BRITO SILVA
Data: 27/11/2025 15:25:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1 – Professor titular da disciplina de TCC

Documento assinado digitalmente
gov.br ANILTON DE BRITO VIEIRA FILHO
Data: 08/01/2026 10:31:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2 – Presidente da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br ELOISE CRISTINA DE SOUZA RODRIGUES GARCIA
Data: 19/01/2026 20:08:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3 – Membro da Banca

Documento assinado digitalmente
gov.br AGMAEL MENDONCA SILVA
Data: 08/01/2026 12:11:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

4 – Membro da Banca

Documento assinado digitalmente
gov.br EDUARDO HERNANDYS FONTENELE FREITAS
Data: 07/01/2026 14:30:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

5 – Aluno

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança em cada etapa desta caminhada. Sem Sua presença e cuidado, nenhum esforço teria sido alcançado.

À minha família, base sólida da minha vida, pelo amor incondicional, pelo incentivo diário e por acreditarem em mim nos momentos em que duvidei de mim. Cada palavra de apoio foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos e irmãos de caminhada (Fontenele, Gabriel e Rafael) pela amizade sincera, pelas conversas e pelas risadas que renovaram minhas energias e que aliviaram o peso da jornada. E à minha namorada, por todo carinho, compreensão e paciência, especialmente nos momentos de maior pressão, sendo apoio, motivação e companhia constante ao longo de todo esse processo. A presença de vocês tornou tudo mais leve.

*“Não tenho certeza de nada, mas a visão
das estrelas me faz sonhar”
(Vincent Van Gogh)*

RESUMO

O desenvolvimento de telescópios espaciais representou um marco revolucionário na astronomia moderna ao superar as limitações impostas pela atmosfera terrestre, tendo como propósito analisar, de forma comparativa, a evolução tecnológica e as contribuições científicas dos telescópios espaciais Hubble e James Webb, bem como contextualizar seu desenvolvimento histórico e seu impacto na astrofísica contemporânea. Para tanto, realizou-se uma revisão bibliográfica abrangente de artigos científicos, relatórios técnicos e documentação oficial das agências espaciais, com foco nas características técnicas, inovações tecnológicas e descobertas científicas de ambos os telescópios, utilizando uma análise comparativa que considerou parâmetros como capacidades espectrais, resolução óptica e contribuições para diferentes campos da astronomia. Como resultados, verificou-se que o Hubble, lançado em 1990, estabeleceu novos paradigmas na observação do universo visível e ultravioleta, com contribuições fundamentais para a determinação da constante de Hubble ($73, \text{km}, \text{s}^{-1}, \text{Mpc}^{-1}$) e da idade do universo (13,8 bilhões de anos), além de revolucionar o estudo de exoplanetas por meio da espectroscopia de trânsito, enquanto o James Webb, operando desde 2022 no infravermelho, ampliou significativamente essas fronteiras ao permitir a observação de galáxias primordiais com redshift ($z > 10$) e a caracterização detalhada de atmosferas exoplanetárias. Conclui-se que ambos os telescópios apresentam complementaridade tecnológica e científica, com o Hubble se destacando nas observações no visível e ultravioleta e o JWST sendo otimizado para o infravermelho, redefinindo conjuntamente a compreensão do cosmos desde a formação das primeiras galáxias até a busca por mundos potencialmente habitáveis e consolidando a astronomia espacial como ferramenta indispensável para a exploração do universo.

Palavras-chave: telescópios espaciais; Hubble; James Webb; astronomia observacional; astrofísica moderna.

ABSTRACT

The development of space telescopes has represented a major milestone in modern astronomy by overcoming the observational limitations imposed by Earth's atmosphere. This study aims to comparatively analyze the technological evolution and scientific contributions of the Hubble Space Telescope and the James Webb Space Telescope, placing their development within a historical context and assessing their impact on contemporary astrophysics. A comprehensive literature review was conducted, including scientific articles, technical reports, and official documentation from space agencies, with emphasis on technical characteristics, technological innovations, and key scientific discoveries associated with both observatories. The comparative analysis considered parameters such as spectral coverage, optical resolution, and contributions to different fields of astronomy. The results indicate that Hubble, launched in 1990, established new paradigms in visible and ultraviolet observations, providing fundamental contributions to the determination of the Hubble constant and the age of the Universe, as well as advancing exoplanet studies through transit spectroscopy. In contrast, JWST, operating since 2022 in the infrared, has significantly expanded observational frontiers by enabling the detection of primordial galaxies at high redshifts ($z > 10$) and the detailed characterization of exoplanetary atmospheres. It is concluded that HST and JWST are technologically and scientifically complementary, with Hubble excelling in visible and ultraviolet observations and JWST optimized for infrared studies, jointly redefining our understanding of the Universe from the formation of the first galaxies to the search for potentially habitable worlds.

Keywords: space telescopes; Hubble; James Webb; observational astronomy; modern astrophysics.

Sumário

Lista de Siglas	10
1 Introdução	12
2 A Astronomia Espacial	13
2.1 Limitações dos telescópios terrestres devido à atmosfera	13
2.2 Vantagens da observação astronômica a partir do espaço	14
2.3 Breve histórico dos primeiros projetos de telescópios espaciais	16
3 Telescópio Espacial Hubble (HST)	17
3.1 Contexto Histórico e Desenvolvimento	17
3.1.1 Propostas iniciais e o papel de Lyman Spitzer	17
3.1.2 Parcerias entre NASA e ESA	18
3.1.3 Lançamento em 1990 e primeiros desafios	19
3.2 Características Técnicas	20
3.2.1 Óptica e instrumentos científicos	20
3.2.2 Órbita e operações de manutenção	27
3.3 Contribuições Científicas	29
3.3.1 Determinação da idade do universo	29
3.3.2 Observações de galáxias distantes e exoplanetas	31
3.3.3 Impacto na cosmologia e astrofísica	32
4 Telescópio Espacial James Webb (JWST)	33
4.1 Planejamento e Desenvolvimento	33
4.1.1 Conceito inicial e objetivos científicos	33
4.1.2 Desafios tecnológicos e orçamentários	35
4.1.3 Lançamento em 2021 e posicionamento no ponto de Lagrange L_2	36
4.2 Inovações Tecnológicas	38
4.2.1 Espelho segmentado de 6,5 metros	38
4.2.2 Instrumentos infravermelhos avançados	40
4.2.3 Sistema de resfriamento e escudo solar	41
4.3 Primeiras Descobertas e Impacto Científico	42
4.3.1 Observações do universo primordial	42
4.3.2 Estudo de atmosferas de exoplanetas	43
4.3.3 Contribuições para a compreensão da formação estelar	44
5 Comparação entre Hubble e James Webb	46
5.1 Diferenças nas faixas de observação (visível vs. infravermelho)	46
5.2 Complementaridade nas pesquisas astronômicas	47

5.3	Expectativas futuras e possíveis colaborações entre os telescópios	48
6	Conclusão	49

Lista de Figuras

1	Ilustração demonstrando a distorção causada pelo seeing atmosférico.	13
2	Comparação da visualização de uma estrela antes e depois da correção óptica realizada pela missão STS-61 em 1993.	20
3	Esquema representativo da configuração óptica do Hubble, mostrando a trajetória da luz desde o espelho primário até o ponto focal, onde se localizam os instrumentos científicos.	21
4	Arquitetura interna do Telescópio Espacial Hubble, mostrando a disposição dos principais sistemas de suporte.	26
5	Diagrama dos pontos de Lagrange no sistema Terra-Sol, mostrando a posição estratégica do JWST no ponto L2.	37
6	Esquema óptico do James Webb Space Telescope mostrando o caminho da luz através do sistema de espelhos.	40
7	Contraste entre a visão tradicional no visível (esquerda) e a visão penetrante no infravermelho (direita) dos Pilares da Criação.	45
8	Comparação das faixas espectrais de observação dos telescópios Hubble e James Webb.	47

Lista de Abrevaturas

AAS Anomalia do Atlântico Sul

ACS *Advanced Camera for Surveys*

CCD *Charge-Coupled Device*

CDM *Cold Dark Matter*

COSTAR *Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement*

CSA *Canadian Space Agency*

ESA *European Space Agency*

HST *Hubble Space Telescope*

IR Infravermelho

JWST *James Webb Space Telescope*

Λ CDM *Lambda Cold Dark Matter*

LEO *Low Earth Orbit*

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NICMOS *Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer*

SM *Servicing Mission*

STIS *Space Telescope Imaging Spectrograph*

STS *Space Transportation System*

STScI *Space Telescope Science Institute*

UV Ultravioleta

WFC3 *Wide Field Camera 3*

WFPC2 *Wide Field and Planetary Camera 2*

Lista de Tabelas

1	Componentes estruturais do Telescópio Espacial Hubble	26
---	---	----

1 Introdução

A observação astronômica, fundamental para a compreensão do cosmos, enfrentou durante séculos as limitações impostas pela atmosfera terrestre, com fenômenos como turbulência atmosférica (*seeing*), absorção seletiva de radiação eletromagnética e interferências climáticas comprometendo significativamente a qualidade e o escopo das observações (ARCHIBALD et al., 2002). A superação dessas barreiras começou a se concretizar com o advento da era espacial, que possibilitou o posicionamento de instrumentos astronômicos além da atmosfera, materializando propostas visionárias como as de Lyman Spitzer, que já em 1946 defendia as vantagens de observatórios extraterrestres (SPITZER, 1990). Foi neste contexto que se desenvolveu o Telescópio Espacial Hubble (HST), lançado em 1990 após décadas de planejamento, cuja trajetória foi marcada por desafios técnicos como a aberração esférica do espelho primário e subsequentes missões de reparo bem-sucedidas, transformando-o em um dos instrumentos científicos mais produtivos da história (SMITH, 2016).

O êxito do Hubble estabeleceu as bases para empreendimentos ainda mais ambiciosos, culminando no Telescópio Espacial James Webb (JWST), concebido como sucessor com capacidades expandidas na faixa do infravermelho (NASA, 2025g). Seu desenvolvimento, fruto de parcerias internacionais entre NASA (National Aeronautics and Space Administration), ESA (European Space Agency) e CSA (Canadian Space Agency), representou um dos mais complexos empreendimentos tecnológicos já realizados, incorporando inovações revolucionárias como espelho segmentado de berílio, escudo solar multicamadas e sistemas criogênicos avançados (NASA, 2025e). Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar comparativamente a evolução tecnológica e o impacto científico desses dois ícones da astronomia espacial, examinando como suas capacidades complementares têm expandido as fronteiras do conhecimento cosmológico.

A investigação proposta abrange desde os fundamentos históricos e técnicos de cada telescópio até suas contribuições mais significativas para a astrofísica moderna, incluindo a determinação de parâmetros cosmológicos, estudo de galáxias primordiais, caracterização de exoplanetas e compreensão dos processos de formação estelar. Metodologicamente, o estudo baseia-se em revisão bibliográfica abrangente de artigos científicos, relatórios técnicos e documentação oficial das agências espaciais, utilizando análise comparativa que considera parâmetros como capacidades espectrais, resolução óptica e contribuições para diferentes campos da astronomia.

A relevância desta análise reside na compreensão de como investimentos em infraestrutura científica de grande porte podem gerar retornos transformadores para o conhecimento humano (LAUNIUS; BRANDT, 1990), além de fornecer insights sobre futuras direções para a astronomia observacional. Através deste estudo, espera-se demonstrar não apenas as conquistas técnicas e científicas já alcançadas, mas também o potencial des-

ses observatórios para desvendar mistérios cósmicos ainda não resolvidos, consolidando a astronomia espacial como ferramenta indispensável para a exploração do universo.

2 A Astronomia Espacial

2.1 Limitações dos telescópios terrestres devido à atmosfera

A observação astronômica a partir da superfície terrestre enfrenta diversas limitações impostas pela presença da atmosfera. Apesar dos avanços tecnológicos em óptica e instrumentação, os telescópios instalados no solo ainda estão sujeitos a efeitos físicos e ambientais que comprometem a qualidade das imagens e restringem o espectro observável (ARCHIBALD et al., 2002).

Uma das principais limitações é causada pela turbulência atmosférica, também conhecida como *seeing* astronômico. A atmosfera terrestre é composta por camadas de ar com diferentes temperaturas, pressões e índices de refração. A movimentação dessas camadas provoca alterações no caminho da luz proveniente dos corpos celestes, fazendo com que as imagens captadas pelos telescópios pareçam tremidas ou borradas. Esse efeito reduz a resolução angular dos instrumentos, mesmo nos telescópios mais avançados, sendo mais ou menos acentuado dependendo da localização geográfica e das condições climáticas do local (PROQUEST, 2023).

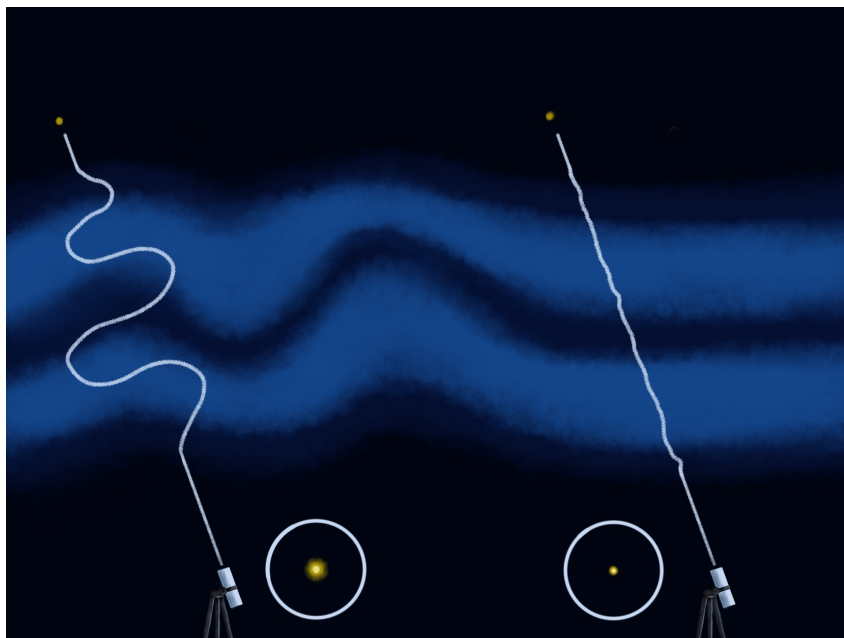


Figura 1: Ilustração demonstrando a distorção causada pelo seeing atmosférico.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Outro fator limitante é a absorção atmosférica, uma vez que a atmosfera não é totalmente transparente à radiação eletromagnética oriunda do espaço. Diversos gases pre-

sentes no ar, como o vapor d'água, o oxigênio e o dióxido de carbono, absorvem seletivamente determinados comprimentos de onda (ARCHIBALD et al., 2002). Dessa forma, telescópios terrestres conseguem operar de forma eficaz apenas em janelas específicas do espectro eletromagnético, como a faixa da luz visível, partes do infravermelho próximo e algumas bandas da radiação de rádio. A maior parte das radiações ultravioleta, infravermelha distante, raios X e raios gama é completamente bloqueada, sendo necessária a utilização de telescópios espaciais para a sua observação.

Além disso, as condições meteorológicas exercem forte influência sobre a eficiência dos telescópios. Nuvens, neblina, chuva, neve ou partículas em suspensão na atmosfera podem obstruir parcial ou totalmente a passagem da luz até os instrumentos ópticos, impossibilitando observações em grande parte do tempo (PROQUEST, 2023). Como resultado, a operação de observatórios terrestres é restrita a noites com céu limpo e estável, reduzindo o tempo útil de observação anual.

A poluição luminosa representa outra barreira significativa, especialmente em regiões próximas a centros urbanos. A iluminação artificial interfere na visibilidade do céu noturno, aumentando o brilho de fundo e dificultando a detecção de objetos astronômicos pouco brilhantes. Mesmo em locais mais afastados, a presença de luz difusa pode comprometer a qualidade das observações. Por esse motivo, os observatórios são comumente instalados em locais remotos, de alta altitude e com políticas rigorosas de controle da iluminação.

Por fim, destaca-se a extinção atmosférica, que se refere à atenuação da luz dos corpos celestes ao atravessar a atmosfera terrestre. Essa atenuação ocorre pela dispersão e absorção da radiação por moléculas e partículas presentes no ar, reduzindo a intensidade da luz e podendo modificar sua coloração aparente. O efeito é mais pronunciado quando os objetos estão próximos ao horizonte, onde o caminho óptico na atmosfera é mais longo.

Em síntese, a atmosfera terrestre impõe limitações significativas à astronomia observacional a partir do solo, tanto no aspecto óptico quanto operacional (ARCHIBALD et al., 2002; PROQUEST, 2023). Essas restrições explicam a escolha criteriosa dos locais onde são instalados observatórios e justificam os investimentos em tecnologias como a óptica adaptativa e os telescópios espaciais, que buscam contornar ou eliminar os efeitos atmosféricos.

2.2 Vantagens da observação astronômica a partir do espaço

A instalação de telescópios no espaço representa um dos maiores avanços da astronomia moderna. Ao posicionar instrumentos de observação fora da atmosfera terrestre, é possível superar uma série de limitações impostas pelas condições atmosféricas e ambientais enfrentadas pelos telescópios terrestres. Os benefícios dessa abordagem são diversos e têm permitido descobertas que seriam inviáveis a partir da superfície do planeta (SPIT-

ZER, 1990; NASA, 2025a).

A principal vantagem da observação espacial é a eliminação completa dos efeitos da atmosfera terrestre. Sem a interferência de turbulência atmosférica, as imagens obtidas por telescópios espaciais apresentam resolução muito superior, com nitidez e detalhamento dificilmente alcançáveis em instrumentos em solo, mesmo com a utilização de óptica adaptativa (SPITZER, 1990). Isso é especialmente importante na observação de objetos distantes ou de pequenas estruturas, como discos protoplanetários ou galáxias em estágios iniciais de formação.

Além disso, a observação a partir do espaço permite o acesso a faixas do espectro eletromagnético que são bloqueadas pela atmosfera, como os raios X, ultravioleta extremo, infravermelho médio e distante, e radiação gama (SPITZER, 1990). Isso amplia significativamente o campo de estudo da astronomia, permitindo a investigação de fenômenos de alta energia (como buracos negros, supernovas e núcleos galácticos ativos), bem como de processos de formação estelar e evolução planetária que emitem predominantemente em faixas não visíveis.

Outro benefício importante é a constância e previsibilidade das condições de observação. No espaço, não há variações climáticas, interferências meteorológicas ou poluição luminosa, permitindo operações contínuas e regulares (NASA, 2025a). Isso torna as missões espaciais ideais para levantamentos de longo prazo, monitoramento de variabilidade em estrelas, exoplanetas e eventos transitórios, como explosões de raios gama ou microlentes gravitacionais.

Adicionalmente, a ausência de gravidade e atmosfera permite o desenho de instrumentos mais sensíveis e precisos, com menor interferência ambiental e maior controle térmico. Isso tem permitido, por exemplo, o desenvolvimento de telescópios criogênicos para observações infravermelhas, como o Telescópio Espacial James Webb, e detectores de alta energia para observações em raios X e gama, como o observatório Chandra e o telescópio Fermi (SPITZER, 1990).

Embora missões espaciais envolvam altos custos de construção, lançamento e manutenção, seus benefícios científicos têm justificado os investimentos. Telescópios espaciais como o Hubble Space Telescope, o James Webb Space Telescope, o Spitzer, o Kepler e muitos outros contribuíram decisivamente para avanços no entendimento da origem, estrutura e evolução do universo (NASA, 2025a).

Em suma, a observação astronômica à partir do espaço oferece condições ideais e incomparáveis para a exploração do cosmos, possibilitando estudos em alta resolução e em faixas espectrais inacessíveis a partir do solo, além de permitir a coleta contínua de dados sem as restrições impostas pelo ambiente terrestre (SPITZER, 1990; ESA, 2025)..

2.3 Breve histórico dos primeiros projetos de telescópios espaciais

A ideia de posicionar instrumentos astronômicos fora da atmosfera terrestre surgiu no contexto da corrida espacial e dos avanços da tecnologia aeroespacial no século XX. Desde os primórdios da era espacial, cientistas e engenheiros identificaram que a observação astronômica poderia se beneficiar enormemente da eliminação dos efeitos atmosféricos, especialmente no que diz respeito à distorção da luz e à limitação do espectro eletromagnético observável (SPITZER, 1990; SMITH, 2016).

Um dos primeiros marcos nesse processo foi o lançamento de detectores de radiação em foguetes suborbitais ainda na década de 1940. Esses experimentos pioneiros permitiram a detecção da radiação ultravioleta e de raios X vindos do espaço, demonstrando que esses comprimentos de onda não alcançavam a superfície da Terra e, portanto, exigiam observações acima da atmosfera.

A década de 1960 marcou o início dos primeiros projetos formais de telescópios espaciais. Um exemplo notável foi o Observatório Astronômico de Raios-X Uhuru, lançado em 1970 pela NASA. Considerado o primeiro satélite dedicado exclusivamente à astronomia de raios X, o Uhuru detectou diversas fontes dessa radiação, como buracos negros e pulsares, abrindo uma nova era para a astrofísica de alta energia.

Outro projeto importante foi o OAO (Orbiting Astronomical Observatory), desenvolvido nos Estados Unidos. A missão OAO-2, lançada em 1968, foi o primeiro observatório espacial a realizar com sucesso observações contínuas em ultravioleta, demonstrando o enorme potencial científico da astronomia fora da Terra. Essa missão abriu caminho para projetos mais ambiciosos e sofisticados (LAUNIUS; BRANDT, 1990).

A proposta de um grande telescópio espacial com capacidade de observação no espectro visível surgiu no final da década de 1960, culminando no desenvolvimento do Telescópio Espacial Hubble (SPITZER, 1990; SMITH, 2016). Esse projeto foi liderado pela NASA, com colaboração da Agência Espacial Europeia (ESA), e resultou no lançamento do Hubble em 1990 (NASA, 2025b). Com um espelho de 2,4 metros de diâmetro e instrumentos de alta precisão, o Hubble transformou a astronomia moderna, permitindo observações em altíssima resolução e contribuindo significativamente para o entendimento da expansão do universo, da formação de galáxias e da existência de exoplanetas (LIVIO, 2003; NASA, 2025c).

Além do Hubble, outras iniciativas nos anos 1970 e 1980 consolidaram o campo da astronomia espacial, como os satélites IRAS (Infrared Astronomical Satellite), pioneiro na observação em infravermelho, e os observatórios Copernicus e Einstein, voltados para o ultravioleta e os raios X, respectivamente (ROTTNER, 2020).

Esses primeiros projetos estabeleceram as bases tecnológicas e científicas para os modernos telescópios espaciais do século XXI. A experiência acumulada com essas missões

foi fundamental para o desenvolvimento de instrumentos mais complexos e precisos, como o James Webb Space Telescope, lançado em 2021, e futuros observatórios planejados para as próximas décadas (LAUNIUS; DEVORKIN, 2015; NASA, 2025d).

3 Telescópio Espacial Hubble (HST)

3.1 Contexto Histórico e Desenvolvimento

A concepção de instalar um telescópio fora da Terra surgiu a partir da constatação das limitações impostas pela atmosfera terrestre à observação astronômica (ARCHIBALD et al., 2002). A atmosfera, embora vital para a manutenção da vida, interfere significativamente na captação da luz e de outras radiações provenientes do espaço, provocando distorções ópticas e bloqueando importantes faixas do espectro eletromagnético, como a radiação ultravioleta e o infravermelho distante.

Durante o início do século XX, pensadores como Hermann Oberth, Robert Goddard e Konstantin Tsiolkovsky começaram a explorar teoricamente os princípios da propulsão espacial, estabelecendo as bases para futuras missões orbitais. Em 1923, a publicação da obra *Die Rakete zu den Planetenräumen* (“O Foguete no Espaço Planetário”), de Oberth (1929), marcou um importante ponto de inflexão ao considerar o uso de foguetes para alcançar o espaço. Essas ideias, ainda embrionárias no que diz respeito à observação astronômica, seriam retomadas nas décadas seguintes sob uma nova perspectiva, mais voltada à aplicação científica.

Foi nesse cenário de amadurecimento tecnológico e teórico que surgiu a proposta de se posicionar um observatório no espaço. A viabilidade crescente da exploração espacial, impulsionada, em grande parte, pelo contexto da Segunda Guerra Mundial e da subsequente corrida espacial, ofereceu os primeiros indícios de que a astronomia poderia romper as barreiras impostas pela superfície terrestre. Esse período preparou o terreno para a atuação de cientistas como Lyman Spitzer, que seria uma das figuras centrais na transformação dessa ideia em projeto científico concreto (SMITH, 2016).

3.1.1 Propostas iniciais e o papel de Lyman Spitzer

Com o avanço da tecnologia aeroespacial e a intensificação do interesse pela exploração do espaço no pós-guerra, as propostas para a criação de telescópios orbitais ganharam maior densidade e respaldo científico. Entre os nomes que se destacaram nesse processo, o do astrofísico norte-americano Lyman Spitzer foi, sem dúvida, o mais influente (ESA, 2025).

Em 1946, Spitzer publicou o relatório *Astronomical Advantages of an Extra-Terrestrial Observatory* (“Vantagens Astronômicas de um Observatório Extraterrestre”) (SPITZER, 1990), no qual apresentou uma argumentação sistemática e técnica a favor da instalação

de um observatório astronômico no espaço. Suas ideias iam além da simples superação das limitações atmosféricas: ele evidenciava as possibilidades de realizar observações com alta resolução angular, de acessar comprimentos de onda bloqueados pela atmosfera, e de operar instrumentos de forma contínua, sem as interrupções causadas pela rotação terrestre ou pelas condições climáticas.

Mais do que um teórico, Spitzer foi também um articulador científico e político. Ele atuou em comitês da NASA e foi uma das principais vozes a defender, institucionalmente, a construção de um telescópio espacial. Seu envolvimento direto no planejamento de missões orbitais e na defesa de investimentos em astronomia espacial foi fundamental para a consolidação do projeto que, décadas depois, daria origem ao Telescópio Espacial Hubble (LAUNIUS; BRANDT, 1990).

A importância de Lyman Spitzer transcende sua contribuição conceitual, ele foi o elo entre a visão científica e a concretização tecnológica, consolidando-se como o principal responsável pela transição da astronomia terrestre para a astronomia espacial moderna.

3.1.2 Parcerias entre NASA e ESA

O desenvolvimento e o sucesso da missão do Telescópio Espacial Hubble não podem ser compreendidos plenamente sem considerar o papel crucial da cooperação internacional, especialmente entre a NASA e a ESA. Essa colaboração institucional representou não apenas uma divisão estratégica de responsabilidades técnicas e financeiras, mas também uma convergência de interesses científicos que fortaleceu o papel da astronomia como campo de pesquisa global (LAUNIUS; DEVORKIN, 2015).

O acordo de cooperação entre as duas agências foi firmado oficialmente em 1975, após uma série de reuniões técnicas e diplomáticas. A motivação da ESA em participar de um projeto liderado pelos Estados Unidos estava ancorada no desejo de integrar-se mais ativamente à comunidade astronômica internacional, bem como de garantir aos cientistas europeus acesso a uma infraestrutura científica de ponta. Para a NASA, a parceria representava uma forma de reduzir custos e ampliar a legitimidade internacional do projeto (NASA, 2025b).

No âmbito do acordo, a ESA ficou responsável por fornecer dois elementos essenciais: o *Faint Object Camera* (FOC), um dos instrumentos científicos mais sensíveis do Hubble, e um dos conjuntos de painéis solares utilizados para alimentar o telescópio em órbita. Além disso, a ESA contribuiu com pessoal técnico e apoio logístico para a fase de integração e testes do sistema. Em contrapartida, a ESA obteve como benefício o direito a 15% do tempo total de observação científica do Hubble, assegurando a participação contínua de pesquisadores europeus nas descobertas realizadas com o telescópio.

A aliança entre NASA e ESA no projeto Hubble serviu de modelo para colaborações futuras em missões de grande porte, como o Telescópio Espacial James Webb. Demonstrou-se, assim, que empreendimentos científicos de alta complexidade e custo elevado podem

ser viabilizados por meio de compromissos multilaterais bem estruturados, promovendo avanços significativos não apenas no conhecimento científico, mas também na diplomacia internacional voltada à ciência e tecnologia.

3.1.3 Lançamento em 1990 e primeiros desafios

Após mais de uma década de planejamento minucioso, avanços tecnológicos e testes rigorosos, o Telescópio Espacial Hubble foi finalmente lançado em 24 de abril de 1990 (NASA, 2025b), a bordo da nave *Discovery*, durante a missão STS-31 da NASA. Esse lançamento representou um marco histórico não apenas para a astronomia, mas também para a engenharia aeroespacial, uma vez que o Hubble foi o primeiro observatório de grande porte a ser colocado em órbita terrestre baixa, aproximadamente 547 km de altitude, fora da influência direta das distorções causadas pela atmosfera.

Contudo, os primeiros meses de operação foram marcados por uma frustração significativa. Logo após o início das atividades científicas, os técnicos da NASA constataram que as imagens transmitidas apresentavam baixa nitidez e distorções ópticas graves. Após uma investigação detalhada, foi identificado um erro no polimento do espelho primário, cuja curvatura possuía uma diferença de apenas 2,2 micrômetros em relação ao valor ideal, suficiente, entretanto, para provocar aberrações esféricas e comprometer substancialmente a qualidade das observações (SMITH, 2016).

Esse defeito, originado na etapa de fabricação conduzida pela empresa Perkin-Elmer, passou despercebido durante os testes em solo devido à falha nos equipamentos de calibração utilizados. O incidente teve ampla repercussão na mídia internacional e gerou críticas severas à gestão do projeto, ameaçando a credibilidade da NASA e colocando em dúvida o futuro da missão (GAINOR, 2020).

Como resposta à crise, a NASA coordenou uma missão de reparo altamente complexa e inédita, que envolveu o envio de astronautas para a realização de ajustes técnicos diretamente em órbita. A missão STS-61, lançada em dezembro de 1993, teve como objetivos principais a instalação do módulo *COSTAR* (*Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement*), responsável por corrigir o problema óptico, e a substituição da *Faint Object Camera* por instrumentos recalibrados. A missão exigiu cinco caminhadas espaciais e foi considerada um sucesso técnico e operacional sem precedentes.

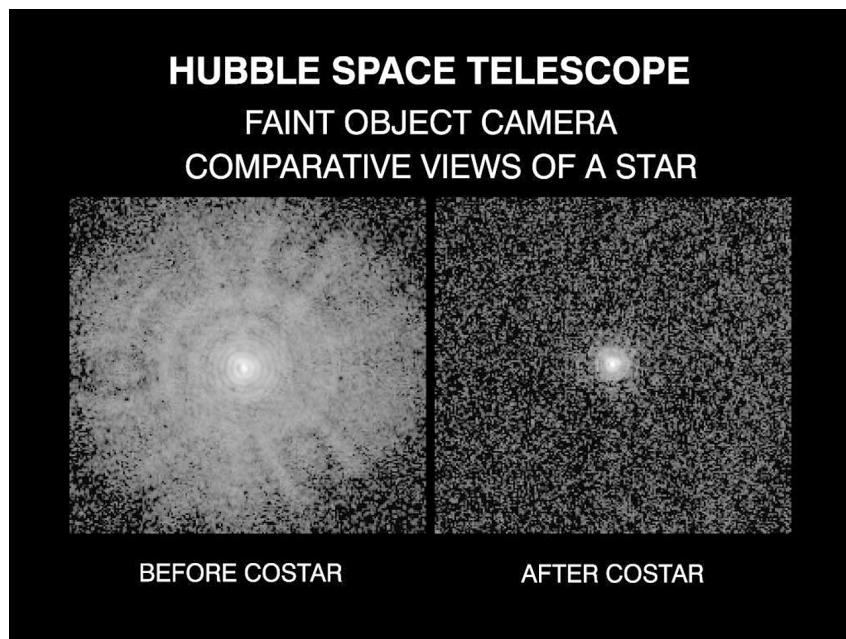


Figura 2: Comparação da visualização de uma estrela antes e depois da correção óptica realizada pela missão STS-61 em 1993.

Fonte: GAINOR (2020).

Após a correção, o Hubble passou a registrar imagens com altíssima resolução e relevância científica, inaugurando uma nova era na observação do universo (LIVIO, 2003). Entre suas inúmeras contribuições destacam-se a estimativa precisa da idade do universo, a observação de galáxias em estágios iniciais de formação, o mapeamento da matéria escura e a descoberta da aceleração da expansão cósmica. O êxito da missão de reparo não apenas restaurou a credibilidade do projeto, como também consolidou o Hubble como um dos instrumentos mais influentes e duradouros da história da ciência moderna.

3.2 Características Técnicas

3.2.1 Óptica e instrumentos científicos

O Telescópio Espacial Hubble (HST) emprega um design óptico do tipo Ritchey-Chrétien, uma variante avançada da família de sistemas Cassegrain, desenvolvido no início do século XX pelos astrônomos George Willis Ritchey e Henri Chrétien (NASA, 2025c). Este sistema utiliza dois espelhos curvos, sendo um primário côncavo e um secundário convexo, ambos com superfície hiperbólica. Essa característica o diferencia de outros sistemas Cassegrain, que normalmente utilizam espelho primário parabólico. Trata-se de uma configuração otimizada, considerada uma das mais avançadas, cujo principal objetivo é minimizar aberrações ópticas como coma e astigmatismo, garantindo alta qualidade de imagem em um amplo campo de visão. A Figura 3 ilustra a disposição do sistema de espelhos no interior do telescópio.

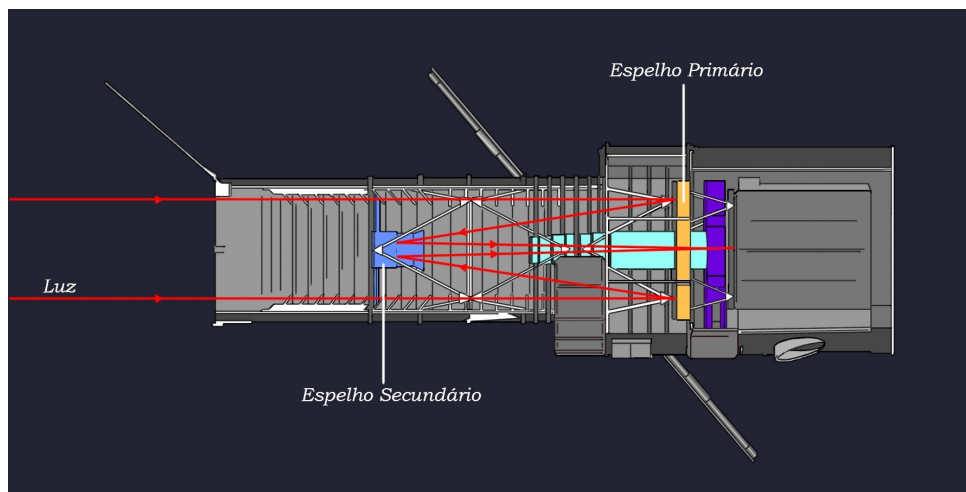


Figura 3: Esquema representativo da configuração óptica do Hubble, mostrando a trajetória da luz desde o espelho primário até o ponto focal, onde se localizam os instrumentos científicos.

Fonte: Elaboração própria (2025).

O espelho primário, com 2,4 m de diâmetro, é fabricado em vidro de ultrabaixa expansão (ULE), assegurando estabilidade dimensional mesmo sob variações térmicas (SMITH, 2016). Com uma razão focal curta (aproximadamente $f/2,3$), contribui para a compacidade do tubo óptico. Quando combinado com o espelho secundário hiperbólico, o sistema atinge um foco efetivo em torno de $f/24$. Este valor representa a razão entre a distância focal total do telescópio (cerca de 57,6 m) e o diâmetro de seu espelho primário (2,4 m). Esse alto número f caracteriza um sistema óptico "lento", otimizado para fornecer imagens de altíssima resolução e amplo campo de visão, embora com menor concentração de luz por área. Dessa forma, o Hubble alcança uma resolução angular típica de $\approx 0,05''$ no visível (NASA, 2025d). Este valor extraordinário significa que o telescópio é capaz de distinguir dois pontos no céu separados por apenas 0,05 segundos de arco, uma medida angular equivalente a enxergar duas moedas separadas por 280 km de distância. Tal precisão, limitada apenas pela difração, é possibilitada pela estabilidade do ambiente extra-atmosférico.

Complementando a arquitetura óptico-estrutural, o Hubble conta com Sensores de Guiagem Fina (FGS), que funcionam como interferômetros de alta precisão (GAINOR, 2020). Esses dispositivos monitoram estrelas-guia e fornecem dados essenciais para o sistema de controle de atitude, assegurando que o telescópio mantenha um apontamento e rastreo estáveis, com precisão da ordem de milissegundos de arco. Esta estabilidade de apontamento foi fundamental para o funcionamento eficaz de toda uma geração de instrumentos científicos que equiparam o observatório.

Ao longo de sua vida operacional, o HST recebeu diferentes gerações de instrumentos científicos (câmeras e espectrógrafos), muitos instalados ou atualizados durante missões de serviço (GAINOR, 2020). Entre os principais, destacam-se:

- **WFC3 (Wide Field Camera 3)** : Desenvolvida como parte da última missão de

manutenção do Hubble (SM4, 2009), esta câmera representa o estado da arte em imageamento astronômico (NASA, 2025d). Seu projeto foi liberado pelo Goddard Space Flight Center (NASA) em colaboração com a Ball Aerospace & Technologies Corp., que atuou como contratante principal no design e integração. O desenvolvimento também envolveu instituições científicas, especialmente a Space Telescope Science Institute (STScI), que forneceu requisitos científicos. A câmera de grande campo possui dois canais:

- **UVIS**: utiliza detectores CCDs sensíveis ao ultravioleta e visível, com alta resolução espacial. Projetado para estudos de formação estelar, populações estelares em galáxias próximas e calibração precisa da distância cósmica por Cefeidas.
- **IR** : imageamento no infravermelho próximo, baseado em detectores de arseneto de gálio e mercúrio (HgCdTe), refrigerados para reduzir ruído térmico. Inclui espectroscopia por *grism*, que permite obter espectros de objetos sem necessidade de fenda. Foi pensado para complementar o NICMOS e preparar metodologias que seriam levadas ao JWST.

Assim, permitindo estudos de exoplanetas via espectroscopia de trânsito, calibração precisa da constante de Hubble, além de observações profundas no visível e infravermelho próximo.

- **ACS (Advanced Camera for Surveys)** : Instalada durante a missão de serviço em 2002, foi concebida pelo Space Telescope Science Institute (STScI) em colaboração com a Ball Aerospace & Technologies Corp. (LIVIO, 2003). Seu desenvolvimento visava expandir significativamente a capacidade do observatório em realizar levantamentos de larga escala e observações profundas, superando as limitações da câmera anterior, a WFPC2. Para isso, a ACS foi projetada como um instrumento versátil, composto por três canais independentes, cada um otimizado para finalidades científicas específicas:

- **WFC (Wide Field Channel)** : constituiu o canal principal da ACS e foi responsável por grande parte das observações profundas que marcaram a história do Hubble. Esse canal utiliza dois detectores CCD de 4096×2048 pixels, fornecendo um campo de visão total de aproximadamente 202 por 202 segundos de arco, quase o dobro da área coberta pela WFPC2. Operando na faixa espectral de 350 a 1050 nm, que abrange desde o azul visível até o infravermelho próximo, o WFC foi essencial para projetos de grande escala, como o Hubble Ultra Deep Field, além de possibilitar estudos de lentes gravitacionais fracas, permitindo o mapeamento indireto da distribuição de matéria escura em aglomerados de galáxias.

- **HRC (High Resolution Channel)** : foi projetado para imageamento de objetos compactos com elevada definição espacial. Seu CCD de 1024×1024 pixels oferecia um campo de visão reduzido, de aproximadamente 29 por 26 segundos de arco, mas com escala angular mais refinada, da ordem de $0,025''$ por pixel, o que favorecia a observação de detalhes estruturais em núcleos galácticos, aglomerados estelares densos e até discos circumestelares. Além disso, o HRC dispunha de um modo coronográfico que permitia bloquear a emissão de estrelas muito brilhantes, possibilitando a detecção de objetos tênues em sua vizinhança imediata, como exoplanetas ou discos protoplanetários. Entretanto, em 2007, uma falha eletrônica irreversível comprometeu a operação do HRC, restringindo as atividades posteriores da ACS apenas ao WFC e ao canal ultravioleta.
- **SBC (Solar Blind Channel)** : foi desenvolvido para estudos especializados no ultravioleta próximo e extremo, em uma faixa espectral que cobre aproximadamente de 115 a 170 nm. Para operar nesse regime, o canal emprega detectores do tipo MAMA (Multi-Anode Microchannel Array), altamente sensíveis à detecção de fótons individuais e imunes à saturação causada pela radiação solar em comprimentos de onda visíveis. Essa característica conferiu ao SBC a capacidade de estudar atmosferas planetárias, halos de galáxias, gás ionizado em meios interestelar e intergaláctico e emissões específicas de linhas no ultravioleta, contribuindo de forma única para investigações que não seriam possíveis em outras faixas do espectro.

Em conjunto, esses três canais conferiram à ACS uma arquitetura versátil e poderosa, capaz de atender desde levantamentos profundos em grande escala, passando por observações de altíssima resolução espacial, até estudos especializados no ultravioleta extremo. A contribuição da ACS ao legado científico do Hubble foi notável, uma vez que ela protagonizou algumas das imagens mais icônicas e descobertas mais relevantes das últimas duas décadas, consolidando-se como um dos instrumentos mais produtivos e impactantes já instalados no telescópio.

- **STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph)** : Desenvolvido pela Ball Aerospace em colaboração com o NASA Goddard e o STScI, foi instalado no Hubble em 1997 durante a missão de serviço SM2 (NASA, 2025d). Seu objetivo era oferecer versatilidade espectroscópica em múltiplas faixas, cobrindo comprimentos de onda de 115 a 1000 nm. O STIS incorporava modos de fenda longa e de espectroscopia sem fenda (*slitless*), além de espectroscopia de alta resolução utilizando grades echelle, alcançando resoluções da ordem de $R \approx 100.000$. Essa capacidade permitia medir velocidades estelares e galácticas com precisão de poucos quilômetros por segundo, fornecendo dados cruciais para o estudo da dinâmica de estrelas e núcleos ativos

de galáxias. Além disso, o instrumento contava com modos coronográficos, possibilitando o bloqueio da luz estelar para detectar estruturas tênues em seu entorno, como discos protoplanetários e atmosferas de exoplanetas em trânsito. O impacto científico do STIS foi notável, especialmente na confirmação da presença de buracos negros supermassivos, ao medir o movimento do gás em núcleos galácticos e consolidar a relação entre a massa do buraco negro central e a dispersão de velocidades estelares (relação $M-\sigma$).

- **COS (Cosmic Origins Spectrograph)** : Instalado em 2009 na missão SM4, foi o último grande instrumento adicionado ao Hubble (GAINOR, 2020). Desenvolvido pela University of Colorado Boulder sob a liderança do astrofísico James Green, em parceria com a NASA, o COS foi projetado para maximizar a sensibilidade em espectroscopia ultravioleta, em especial no far-UV (115–205 nm). Utilizando detectores de microcanais com eficiência significativamente superior às gerações anteriores, o COS ampliou a capacidade do telescópio em mais de uma ordem de grandeza em termos de sensibilidade, permitindo observar fontes extremamente tênues. Seu principal objetivo científico foi o mapeamento da rede cósmica de hidrogênio intergaláctico, bem como o estudo de halos de galáxias, dos processos de feedback galáctico e da composição química do meio interestelar. O impacto do COS foi determinante para a cosmologia observacional, ao permitir a detecção de absorções fracas em espectros de quasares, revelando a estrutura filamentar do universo em larga escala.
- **NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer)** : Foi desenvolvido pela University of Arizona em parceria com a Ball Aerospace e instalado em 1997 (SM2) (ROTTNER, 2020). Representou o primeiro instrumento do Hubble dedicado ao infravermelho próximo, operando na faixa de 0,8 a 2,5 μm . O NICMOS dispunha de três câmeras com diferentes campos de visão e modos de espectroscopia, e utilizava detectores infravermelhos refrigerados criogenicamente. Em 1999, sofreu uma falha no sistema de criogenia, interrompendo suas operações, mas foi reativado em 2002 com a instalação de um criocooler mecânico. Cientificamente, o NICMOS foi essencial para sondar o universo jovem, com observações de galáxias em alto desvio para o vermelho, além de fornecer dados detalhados sobre discos protoplanetários e processos de formação estelar. Suas contribuições também serviram como precursoras das metodologias que seriam posteriormente expandidas pelo James Webb Space Telescope, consolidando a importância da observação em infravermelho próximo para a astrofísica moderna.
- **WFPC2 (Wide Field and Planetary Camera 2)** : Construída pelo Jet Propulsion Laboratory (JPL/NASA), foi instalada em 1993 durante a primeira missão de serviço (SM1) (SMITH, 2016). Sua relevância foi dupla, atuando não apenas como

instrumento científico de imageamento, mas também como solução para o problema crítico da aberração esférica do espelho primário do Hubble. Incorporando um sistema de óticas corretivas, a WFPC2 compensou as distorções do espelho, restaurando a qualidade das imagens e salvando o futuro científico do observatório. A câmera possuía quatro detectores CCD, três dedicados a observações de campo largo e um voltado para imagens planetárias de alta resolução. Com ela, o Hubble produziu algumas de suas imagens mais emblemáticas, incluindo os Pilares da Criação na Nebulosa da Águia, além dos programas Hubble Deep Field, que revelaram milhares de galáxias em regiões aparentemente vazias do céu. A WFPC2 consolidou-se como um verdadeiro ícone, funcionando tanto como ferramenta científica de ponta quanto como embaixadora do HST perante o público e a comunidade científica internacional.

Esses instrumentos abrangem fotometria de alta precisão, espectroscopia de baixa a altíssima resolução, coronografia e imageamento profundo em faixas ultravioleta, visível e infravermelha próxima, habilitando o HST a atuar desde estudos de atmosferas exoplanetárias até cosmologia observacional (LIVIO, 2003).

Além dos instrumentos científicos, o desempenho do Telescópio Espacial Hubble depende fundamentalmente de sistemas de suporte integrados que garantem estabilidade operacional e preservação da qualidade óptica (GAINOR, 2020). Os painéis solares, evoluídos através de três gerações desde 1990, representam um componente crítico nesta infraestrutura. Os modelos iniciais de silício, que causavam vibrações prejudiciais ao apontamento preciso, foram substituídos por versões mais compactas de arseneto de gálio, com maior eficiência energética e capacidade de dissipação térmica. Complementando a proteção do observatório, o sistema de tampa solar (aperture door) atua como uma barreira mecânica essencial, fechando-se automaticamente durante exposição solar direta, impactos de micrometeoritos ou operações críticas, prevenindo assim danos irreparáveis aos espelhos primário e secundário.

A estabilidade térmica é mantida através de um revestimento multilayered (MLI) composto por camadas de alumínio, ouro e teflon, que proporciona isolamento térmico essencial para enfrentar variações extremas entre $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ encontradas em órbita (NASA, 2025c). Este sistema assegura a estabilidade dimensional da estrutura óptica e protege componentes eletrônicos sensíveis contra flutuações térmicas destrutivas. Paralelamente, a precisão do apontamento é garantida por um sistema integrado de giroscópios, rodas de reação e sensores estelares, que em conjunto permitem ajustes de orientação com precisão subarcosegundo. Estratégias operacionais desenvolvidas pela NASA permitem que o Hubble funcione com apenas um giroscópio quando necessário, demonstrando a robustez do projeto original. As comunicações são realizadas através da rede TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System), otimizada para transmitir o grande volume de dados científicos gerados pelos instrumentos (GAINOR, 2020). A Figura 4 ilustra a

disposição integrada desses sistemas críticos no observatório espacial, mostrando a arquitetura interna do Telescópio Espacial Hubble com a localização dos principais sistemas de suporte: painéis solares, sistema de proteção térmica, módulo de instrumentos científicos e sistemas de controle de orientação.

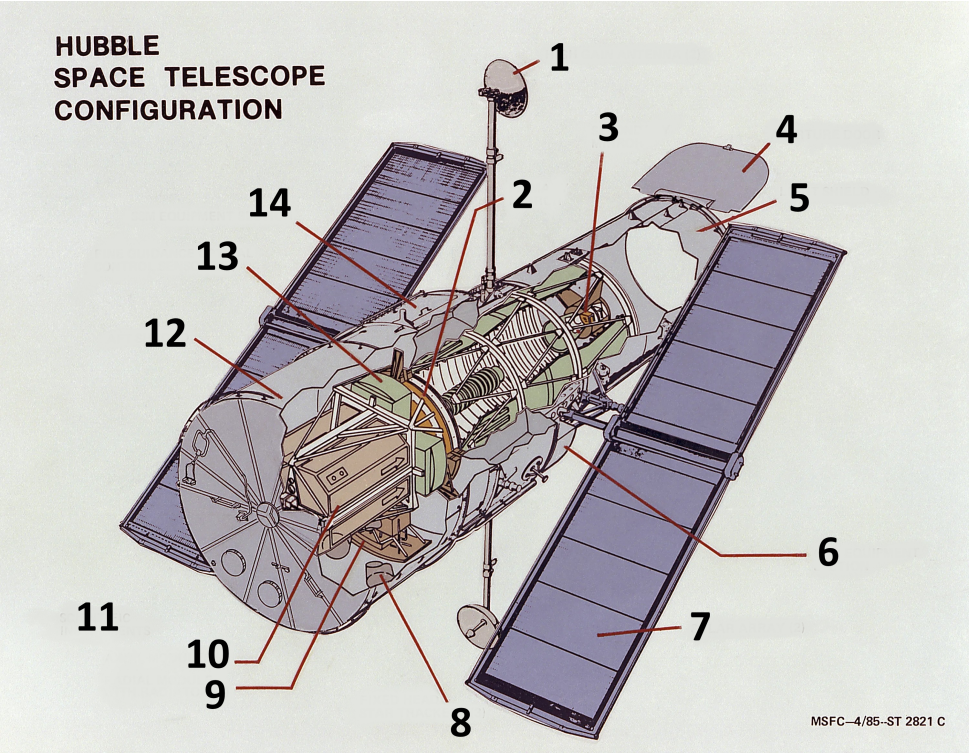


Figura 4: Arquitetura interna do Telescópio Espacial Hubble, mostrando a disposição dos principais sistemas de suporte.

Fonte: Adaptado de (GAINOR, 2020).

Tabela 1: Componentes estruturais do Telescópio Espacial Hubble

Nº	Componente
1	Antena de alto ganho
2	Espelho primário
3	Espelho secundário
4	Porta de abertura
5	Escudo de luz
6	Seção de equipamentos do OTA
7	Painéis solares
8	Rastreadores estelares de cabeça fixa
9	Módulo radial com radiador
10	Módulos axiais
11	Instrumentos científicos
12	Cobertura traseira
13	Sensores ópticos de guiagem fina
14	Seção de equipamentos do SSM

Coletivamente, esses sistemas formam a infraestrutura vital que possibilita as operações científicas do Hubble, demonstrando que seu sucesso depende não apenas da ótica avançada, mas também da integração de sistemas de suporte que mantêm sua operação estável há mais de três décadas (SMITH, 2016).

3.2.2 Órbita e operações de manutenção

O Telescópio Espacial Hubble opera em uma órbita terrestre baixa (LEO), com altitude média entre 540 e 570 km, inclinação de aproximadamente $28,5^\circ$ em relação ao equador e período orbital de cerca de 96 minutos (NASA, 2025b). Essa configuração foi escolhida como compromisso entre acessibilidade para missões de manutenção com o Ônibus Espacial e a necessidade de evitar os efeitos atmosféricos que limitam observações a partir da superfície terrestre (ARCHIBALD et al., 2002). A ausência de turbulência atmosférica permite que o Hubble atinja sua resolução difração-limitada, próxima de 0,05 segundos de arco no visível, um patamar inatingível por telescópios ópticos baseados em solo até o advento da ótica adaptativa. Além disso, a posição acima da atmosfera terrestre elimina a absorção causada por moléculas como o ozônio e o vapor d'água, tornando possível observar em faixas do ultravioleta e do infravermelho próximo que são inacessíveis a observatórios de superfície.

Por outro lado, a órbita baixa impõe desafios significativos. A cada 96 minutos, o Hubble passa por ciclos de iluminação e sombra, alternando entre aquecimento solar e resfriamento no eclipse da Terra. Essas variações, que podem atingir quase 200°C entre extremos, exigem um sistema de controle térmico altamente eficiente, baseado em revestimento de múltiplas camadas (MLI) e radiadores para dissipação de calor (NASA, 2025c). Além disso, a órbita o leva a atravessar periodicamente a Anomalia do Atlântico Sul (AAS), uma região de fraqueza no campo magnético terrestre onde partículas carregadas ficam aprisionadas em altitudes mais baixas. Nesses trechos, instrumentos sensíveis do Hubble precisam ser desligados temporariamente para evitar danos eletrônicos causados pelo bombardeio de prótons de alta energia.

O suprimento de energia é garantido por painéis solares fotovoltaicos, substituídos e modernizados em várias missões de serviço (GAINOR, 2020). As primeiras gerações eram compostas por células de silício, mas foram posteriormente trocadas por painéis mais compactos de arseneto de gálio, que oferecem maior eficiência e menor suscetibilidade a vibrações. Esses painéis alimentam baterias de níquel-hidrogênio, também substituídas ao longo das missões, que garantem o funcionamento contínuo durante os períodos de eclipse orbital.

A atitude e a estabilidade de apontamento são asseguradas por rodas de reação, que permitem ajustes finos de orientação sem consumo de propelente, sendo recalibradas periodicamente com auxílio dos giroscópios e dos sensores de estrelas. O Hubble foi projetado para operar nominalmente com três giroscópios ativos, mas estratégias de economia de-

envolvidas pela NASA permitem operações em modo de dois ou até mesmo de apenas um giroscópio, garantindo sua longevidade. Complementando esse sistema, o Fine Guidance Sensor (FGS) funciona como um interferômetro de precisão, rastreando estrelas-guia e corrigindo variações de apontamento com acurácia de milissegundos de arco, o que é crucial para exposições de longa duração sem degradação de imagem.

Um diferencial notável do Hubble em relação a outros observatórios espaciais é ter sido projetado desde o início para manutenção em órbita por astronautas utilizando o Ônibus Espacial (SMITH, 2016). Essa decisão arquitetônica, embora custosa, revelou-se fundamental para a longevidade do telescópio, permitindo não apenas a correção de falhas críticas, mas também a substituição e atualização de instrumentos ao longo de quase duas décadas.

A primeira missão de serviço, **SM1** (1993), ficou marcada pela correção da aberração esférica do espelho primário, causada por um erro de polimento de apenas 2 micrômetros. Essa falha resultava em imagens desfocadas e comprometeu os primeiros anos da missão (GAINOR, 2020). Para solucionar o problema, foi instalado o sistema COSTAR, composto por pequenos espelhos corretivos que compensavam a distorção óptica. Além disso, a câmera WF/PC original foi substituída pela WFPC2, que já incorporava ótica corretiva, garantindo a produção de imagens científicas de alta qualidade. A missão também substituiu painéis solares vibrantes por versões mais estáveis e trocou giroscópios que apresentavam falhas recorrentes.

A segunda missão, **SM2** (1997), ampliou consideravelmente a capacidade científica do Hubble ao instalar dois novos instrumentos: o STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph), que expandiu o potencial de espectroscopia em múltiplas faixas, e o NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer), que possibilitou observações pioneiras no infravermelho próximo (LIVIO, 2003). Além disso, a missão substituiu componentes do sistema Fine Guidance Sensor (FGS) e modernizou subsistemas eletrônicos, garantindo maior estabilidade e precisão no rastreamento de alvos astronômicos.

A missão **SM3A** (1999) foi conduzida após falhas críticas nos giroscópios do Hubble, que haviam levado o telescópio a entrar em modo de segurança. Durante essa operação, todos os seis giroscópios foram substituídos por novos modelos mais confiáveis (GAINOR, 2020). Além disso, foram instalados computadores de bordo atualizados, que reduziram o consumo energético e facilitaram as operações de comando. Também foram substituídos componentes de telecomando e telemetria, garantindo maior robustez na comunicação entre o telescópio e a Terra.

A missão **SM3B** (2002) trouxe uma das atualizações mais significativas ao instalar a ACS (Advanced Camera for Surveys), instrumento que revolucionou os levantamentos de grandes campos cósmicos e tornou-se responsável por algumas das imagens mais icônicas do Hubble (NASA, 2025d). Nessa missão, também foram instalados novos painéis solares de arseneto de gálio, mais compactos e eficientes, que reduziram o arrasto atmosférico

e aumentaram a produção de energia. Além disso, o NICMOS foi reativado com um criocooler mecânico, o que restaurou sua capacidade de observar no infravermelho após o esgotamento de seu refrigerante sólido original.

A última grande missão de serviço, **SM4** (2009), consolidou a fase final de aprimoramentos do Hubble (GAINOR, 2020). Durante essa operação, foram instalados dois instrumentos de ponta: a WFC3 (Wide Field Camera 3), que expandiu o alcance do telescópio do ultravioleta ao infravermelho próximo, e o COS (Cosmic Origins Spectrograph), que se tornou o mais sensível espectrógrafo ultravioleta já enviado ao espaço. Além disso, a missão incluiu reparos complexos na ACS e no STIS, ambos anteriormente inoperantes, substituição de baterias e giroscópios, aplicação de novos isolantes térmicos para proteger a estrutura contra ciclos térmicos intensos e a instalação do Soft Capture Mechanism, um dispositivo que permitirá no futuro o desorbitamento controlado do telescópio.

Esse ciclo de manutenção periódica foi decisivo não apenas para sanar problemas técnicos críticos, mas também para elevar progressivamente o patamar instrumental do HST em diferentes épocas (SMITH, 2016). Graças a essas atualizações, o telescópio permaneceu competitivo por mais de três décadas, mantendo sua relevância científica e atuando de forma altamente complementar a outros grandes observatórios espaciais, como o Chandra (em raios X), o Spitzer (no infravermelho) e, mais recentemente, o James Webb Space Telescope, que opera em comprimentos de onda mais longos. Assim, o Hubble consolidou-se não apenas como um marco da astronomia moderna, mas também como exemplo de engenharia espacial sustentável e adaptável.

3.3 Contribuições Científicas

3.3.1 Determinação da idade do universo

Desde 1990, quando foi colocado em órbita pelo Ônibus Espacial Discovery, o Telescópio Espacial Hubble (HST) transformou a astronomia moderna ao fornecer imagens de altíssima resolução e dados espectroscópicos decisivos para questões centrais da cosmologia e da astrofísica (LIVIO, 2003). Ao longo de sua operação, o HST não apenas consolidou parâmetros fundamentais do modelo cosmológico padrão, como também revelou novos enigmas, ampliando a fronteira do conhecimento sobre a origem, evolução e destino do Universo.

Um dos avanços mais decisivos proporcionados pelo Hubble foi a determinação refinada da *constante de Hubble* (H_0), parâmetro que descreve a taxa de expansão do Universo (NASA, 2025d). Antes da sua operação, as estimativas para H_0 variavam entre 50 e 100 km/s/Mpc, o que resultava em incertezas superiores a 50% na idade do cosmos e impossibilitava um consenso teórico. O HST reduziu drasticamente essa margem ao observar com altíssima precisão *Cefeidas variáveis* em galáxias próximas. As cefeidas são estrelas pulsantes cuja variação periódica de brilho ocorre devido a instabilidades físicas em suas

camadas externas, apresentando uma relação bem definida entre o período de pulsação e a luminosidade intrínseca. Por essa razão, funcionam como calibradores luminosos confiáveis para a determinação de distâncias astronômicas. A ausência de turbulência atmosférica, a elevada resolução angular e a capacidade de observação no visível e no infravermelho próximo permitiram ao HST medir Cefeidas mesmo em regiões obscurecidas por poeira interestelar, estabelecendo assim a base sólida da escada de distâncias cósmicas.

Complementando essa abordagem, o Hubble foi essencial na observação de supernovas do tipo Ia em galáxias distantes (LIVIO, 2003). Esses eventos term nucleares, resultantes da explosão de anãs brancas em sistemas binários ao atingirem o limite de Chandrasekhar ($\approx 1,4$ massas solares), apresentam brilho intrínseco padronizado. Isso possibilita utilizá-los como indicadores luminosos de longo alcance, estendendo a escada de distâncias a redshifts significativamente maiores. A combinação das medições de Cefeidas locais e supernovas distantes viabilizou um encadeamento confiável entre distâncias próximas e cosmológicas, reduzindo drasticamente as incertezas históricas. Como resultado, o valor de H_0 foi estabelecido na faixa entre 67 e $74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, com refinamentos contínuos de diferentes equipes de pesquisa. A partir desse parâmetro, a idade do Universo foi estimada em aproximadamente 13,8 bilhões de anos, em notável concordância com as determinações independentes obtidas por observações da radiação cósmica de fundo realizadas pelos satélites WMAP e Planck.

Entretanto, os resultados obtidos pelo HST também inauguraram um dos maiores debates da cosmologia contemporânea: a chamada *tensão de Hubble* (NASA, 2025d). As medições locais baseadas em Cefeidas e supernovas do tipo Ia, conduzidas com os instrumentos do HST, apontam para valores de H_0 em torno de $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Riess et al.), enquanto os dados da radiação cósmica de fundo obtidos pelo Planck, ancorados no modelo cosmológico padrão Λ CDM (*Lambda Cold Dark Matter*), indicam cerca de $67 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Essa discrepância, já superior a 5σ , não pode ser atribuída apenas a erros sistemáticos, levantando a possibilidade de uma nova física além do modelo vigente, como a presença de neutrinos estéreis, variações na energia escura ou modificações na gravidade em escalas cosmológicas. Dessa forma, o Hubble não apenas solucionou incertezas históricas sobre a idade e expansão do Universo, mas também abriu caminho para uma das mais intrigantes questões científicas do século XXI.

O modelo Λ CDM, que serve de referência para tais comparações, é a formulação mais aceita do chamado “modelo cosmológico padrão”. Nele, Λ representa a constante cosmológica associada à energia escura, responsável pela expansão acelerada do Universo, enquanto CDM (*Cold Dark Matter*) designa a matéria escura fria, composta por partículas não relativísticas que dominam a formação de estruturas em larga escala. Com apenas seis parâmetros fundamentais, esse modelo consegue explicar com notável sucesso observações como a radiação cósmica de fundo, a nucleossíntese primordial, a distribuição em larga

escala de galáxias e a aceleração cósmica. A tensão de Hubble, portanto, pode estar revelando os limites desse paradigma e apontando para a necessidade de revisões ou extensões teóricas.

3.3.2 Observações de galáxias distantes e exoplanetas

Outro marco científico do Hubble está em suas observações de galáxias no Universo primordial (LIVIO, 2003). Através dos programas *Hubble Deep Field* (HDF), *Hubble Ultra Deep Field* (HUDF) e seus sucessores, o telescópio acumulou exposições de até 1 milhão de segundos em regiões aparentemente desprovidas de objetos brilhantes, revelando milhares de galáxias até então invisíveis. Esses levantamentos permitiram traçar um panorama estatístico da evolução cósmica, reconstruindo a chamada “história da formação estelar” (*cosmic star formation history*). Os dados mostraram que a taxa de formação de estrelas aumentou progressivamente desde os primeiros bilhões de anos após o Big Bang, atingindo seu máximo há cerca de 10 bilhões de anos, em um período conhecido como “meio-dia cósmico”. Esse termo refere-se a uma fase em que o Universo, então com aproximadamente um terço de sua idade atual, apresentava condições ideais para o nascimento de estrelas em larga escala. Essa identificação foi possível graças à combinação de medições de brilho ultravioleta de galáxias (traçador direto da presença de estrelas massivas e jovens) e de emissão no infravermelho (indicador do gás e poeira aquecidos pela formação estelar), permitindo calibrar a taxa de formação estelar ao longo do tempo cósmico.

Paralelamente, o Hubble desempenhou papel decisivo no estudo das lentes gravitacionais, tanto fortes quanto fracas (NASA, 2025d). Quando a luz proveniente de galáxias distantes é desviada pela gravidade de aglomerados massivos no caminho, surgem distorções geométricas (cisalhamento fraco) ou múltiplas imagens magnificadas (lente forte). As observações do HST desses fenômenos não apenas possibilitaram o mapeamento detalhado da distribuição da matéria escura, algo invisível em outras faixas do espectro, mas também funcionaram como “telescópios naturais”, ampliando galáxias extremamente distantes e tênues, que seriam inacessíveis mesmo com exposições prolongadas. Esses resultados forneceram evidências diretas da predominância da matéria escura em estruturas cósmicas e serviram como testes robustos das previsões da Relatividade Geral em escalas de bilhões de anos-luz.

No campo dos exoplanetas, o Hubble revelou versatilidade ao aplicar técnicas de espectroscopia de trânsito (LIVIO, 2003). O princípio consiste em observar a diminuição periódica do brilho de uma estrela quando um planeta passa à sua frente; durante esse trânsito, parte da luz estelar atravessa a atmosfera do planeta e sofre absorção seletiva em determinados comprimentos de onda. Ao comparar o espectro estelar durante e fora do trânsito, é possível identificar as linhas de absorção correspondentes a elementos e moléculas presentes na atmosfera planetária. Com esse método, o Hubble detectou sódio na atmosfera de HD 209458 b (o primeiro exoplaneta com caracterização atmosférica),

além de vapor d'água, metano e dióxido de carbono em diversos outros mundos. Essas medições exigem extrema estabilidade fotométrica e alta relação sinal-ruído, alcançadas graças à ausência de interferência atmosférica e à capacidade espectroscópica de instrumentos como o STIS e o WFC3. Em sistemas como TRAPPIST-1, o Hubble foi decisivo ao impor limites rigorosos à presença de atmosferas densas em planetas rochosos, indicando que mundos desse tipo poderiam ser desprovidos de envelopes gasosos espessos. Tais resultados abriram caminho para a astrobiologia observacional e estabeleceram as bases para investigações mais detalhadas com telescópios de próxima geração, como o *James Webb Space Telescope*.

3.3.3 Impacto na cosmologia e astrofísica

As contribuições do Telescópio Espacial Hubble transcendem descobertas pontuais, impactando de forma estrutural toda a cosmologia e a astrofísica moderna (SMITH, 2016). Um dos pontos mais notáveis foi seu papel na consolidação do modelo cosmológico Λ CDM, atualmente aceito como paradigma. O Hubble forneceu evidências independentes e complementares àquelas derivadas da radiação cósmica de fundo e da distribuição de grandes estruturas, confirmando a existência de energia escura ao registrar o comportamento inesperado das supernovas distantes do tipo Ia, que revelaram a aceleração cósmica. Esse resultado, premiado com o Nobel de Física de 2011, marcou uma mudança de paradigma na cosmologia. Além disso, observações de lentes gravitacionais, tanto fortes quanto fracas, permitiram mapear a distribuição da matéria escura em galáxias e aglomerados, reforçando a noção de que a maior parte da massa do Universo não é bariônica. Dessa forma, o HST não apenas confirmou a validade do modelo padrão da cosmologia, mas também trouxe à tona novas questões sobre a natureza da energia escura e da matéria escura, elementos ainda desconhecidos em nível fundamental.

No campo da astrofísica, o Hubble revolucionou o entendimento da evolução estelar e galáctica (LIVIO, 2003). Suas observações de aglomerados globulares foram fundamentais para determinar idades estelares com maior precisão, servindo como testes cruciais para modelos teóricos de evolução estelar. O telescópio também investigou populações estelares em ambientes variados, desde regiões de formação estelar intensa até nebulosas planetárias, revelando detalhes sobre o ciclo de vida das estrelas e os efeitos do feedback de supernovas na dinâmica das galáxias. De maneira pioneira, o HST observou discos protoplanetários (*proplyds*) na Nebulosa de Órion, fornecendo evidências diretas da formação de sistemas planetários ao redor de estrelas jovens. Além disso, suas imagens de galáxias em altos (*redshifts*) permitiram reconstruir estágios primordiais da formação galáctica, trazendo à luz processos de fusão e evolução que moldaram o Universo atual.

Outro impacto fundamental do Hubble está no âmbito cultural e educacional (NASA, 2025a). Suas imagens icônicas, como os “Pilares da Criação” na Nebulosa da Águia, tornaram-se símbolos universais da ciência, combinando rigor técnico com impacto estético.

Ainda que compostas a partir de filtros específicos e frequentemente apresentadas em cores falsas, essas imagens têm dupla função: são dados científicos de alta precisão e, simultaneamente, material de divulgação que conecta o público com a beleza do cosmos. O telescópio inaugurou a era da astronomia em alta definição, aproximando a sociedade da ciência de forma inédita e inspirando gerações de novos pesquisadores. Assim, o HST não apenas expandiu as fronteiras do conhecimento científico, mas também consolidou a astronomia como disciplina central na cultura científica contemporânea, em pé de igualdade com marcos históricos como as imagens da chegada do homem à Lua.

4 Telescópio Espacial James Webb (JWST)

4.1 Planejamento e Desenvolvimento

O planejamento do Telescópio Espacial James Webb (JWST) emergiu em um contexto de transição científica no final do século XX, quando a astronomia já acumulava décadas de experiência com observatórios espaciais. O sucesso do Hubble havia demonstrado de forma inequívoca o valor de colocar instrumentos de grande porte acima da atmosfera terrestre, mas também evidenciara limitações importantes, sobretudo em relação à observação de radiação infravermelha, essencial para sondar regiões obscurecidas por poeira cósmica e objetos extremamente afastados no espaço-tempo (NASA, 2025e). Nesse cenário, a comunidade científica começou a articular a necessidade de um observatório com escopo mais ambicioso, que pudesse abrir uma nova janela de observação ao universo. O JWST nasceu, portanto, como resposta a esse anseio, pensado desde o início não apenas como uma evolução incremental em relação ao Hubble, mas como um salto qualitativo em termos de concepção científica e tecnológica.

O processo de desenvolvimento refletiu também a crescente dimensão internacional da pesquisa astronômica. Diferente dos projetos anteriores, em que a liderança recaía fortemente sobre uma única agência espacial, o JWST foi planejado desde o princípio como um empreendimento colaborativo entre a NASA, ESA e a CSA (NASA, 2025g). Essa aliança não apenas distribuiu custos e responsabilidades, mas simbolizou o reconhecimento de que as questões cósmicas investigadas pelo telescópio ultrapassam fronteiras nacionais, exigindo esforço conjunto da comunidade científica global. O projeto assumiu, assim, um duplo caráter: científico, ao buscar responder a algumas das perguntas mais profundas sobre a origem do cosmos, e político, ao se tornar um marco de cooperação internacional em ciência e tecnologia espacial.

4.1.1 Conceito inicial e objetivos científicos

A concepção do James Webb Space Telescope (JWST) surgiu ainda na década de 1990, quando os astrônomos já reconheciam que o Hubble, apesar de suas contribuições

inestimáveis, possuía limitações fundamentais relacionadas ao seu espectro de observação (NASA, 2025e). O Hubble foi otimizado para operar principalmente na faixa do visível e do ultravioleta próximo, mas muitos processos cósmicos cruciais se manifestam no infravermelho, região do espectro em que a atmosfera terrestre é praticamente opaca e que apenas missões espaciais poderiam explorar com eficiência. A detecção no infravermelho permitiria “olhar através da poeira cósmica” que obscurece regiões de formação estelar, além de sondar a luz extremamente avermelhada de galáxias formadas logo após o Big Bang, cuja radiação foi esticada pelo processo de expansão cósmica.

Assim, desde o início, o JWST foi planejado como um observatório de nova geração, capaz de atacar algumas das questões mais fundamentais da astrofísica contemporânea (NASA, 2025f). Para investigar o universo primordial, ele utiliza a combinação de um espelho primário de 6,5 m e detectores extremamente sensíveis no infravermelho próximo (NIRCam, NIRSpec), capazes de captar fótons emitidos há mais de 13 bilhões de anos. Esses instrumentos permitem identificar galáxias muito distantes a partir de seu desvio para o vermelho, obtendo não apenas imagens de alta resolução, mas também espectros detalhados que revelam sua composição química e idade.

No estudo do ciclo de vida das estrelas, o JWST se destaca por sua capacidade de observar em comprimentos de onda que atravessam as nuvens moleculares interestelares, onde o visível não consegue penetrar (NASA, 2025j). Com isso, ele revela o interior de regiões como a Nebulosa da Carina ou a Nebulosa de Órion, registrando em detalhe o processo de colapso gravitacional de nuvens de gás, o surgimento de protoestrelas e a evolução de discos protoplanetários que podem dar origem a sistemas planetários. A câmera MIRI, que opera no infravermelho médio, é particularmente crucial nesse aspecto, pois consegue identificar a emissão térmica de poeira aquecida, mapeando estruturas que antes permaneciam ocultas.

Já no campo da exoplanetologia, o JWST introduziu um avanço decisivo ao aplicar espectroscopia de trânsito com precisão (NASA, 2025h). Quando um planeta passa diante de sua estrela, parte da luz estelar atravessa a atmosfera do planeta e sofre absorções específicas de moléculas presentes. O JWST é capaz de decompor essa luz em diferentes comprimentos de onda, revelando a assinatura de compostos como vapor d’água, dióxido de carbono ou metano. Isso abre a possibilidade de não apenas confirmar a composição química das atmosferas, mas também avaliar sua estrutura térmica e a presença de elementos potencialmente associados à habitabilidade.

Em outras palavras, enquanto o Hubble transformou nossa visão do universo visível, o JWST foi projetado para revelar o “universo oculto”, aquele escondido pela poeira cósmica ou pelo desvio para o vermelho extremo (NASA, 2025f). Sua concepção combina avanços em óptica, criogenia e instrumentação espectroscópica que, pela primeira vez, permitem aos astrônomos sondar diretamente fenômenos até então inacessíveis, ampliando de forma decisiva as fronteiras da astronomia moderna.

4.1.2 Desafios tecnológicos e orçamentários

O desenvolvimento do JWST representou um dos empreendimentos tecnológicos mais complexos já realizados na história da astronomia espacial (NASA, 2025g). O projeto, inicialmente estimado em cerca de 500 milhões de dólares e previsto para lançamento no início dos anos 2000, enfrentou sucessivos adiamentos e revisões orçamentárias, alcançando um custo final superior a 10 bilhões de dólares. Esses custos refletiram não apenas a sofisticação do design, mas também a necessidade de criar soluções inéditas para problemas nunca antes enfrentados na construção de um observatório espacial.

Um dos maiores desafios foi o espelho primário segmentado, que precisava ser grande o suficiente para coletar luz de objetos extremamente tênues e, ao mesmo tempo, leve e dobrável para caber no interior do foguete Ariane 5 (NASA, 2025e). Diferentemente do Hubble, que possui um espelho monolítico de 2,4 metros, o JWST exigia uma superfície coletora muito maior, com 6,5 metros de diâmetro, para alcançar a sensibilidade necessária a observações no infravermelho profundo. A fabricação de um espelho único dessa dimensão era inviável, tanto pelo peso quanto pelas limitações do espaço disponível no foguete. A solução encontrada foi a adoção de 18 segmentos hexagonais de berílio, um material de baixa densidade e alta rigidez, que garante estabilidade estrutural mesmo em temperaturas criogênicas. O formato hexagonal foi escolhido por permitir o encaixe perfeito entre os segmentos, eliminando lacunas e maximizando a área útil de coleta de luz. Essa configuração, embora extremamente eficiente, trouxe o desafio adicional de alinhar cada segmento com precisão nanométrica no espaço, um feito de engenharia sem precedentes.

Outro aspecto crucial foi o revestimento dos espelhos com uma camada ultrafina de ouro, com apenas cerca de 100 nanômetros de espessura (NASA, 2025e). O ouro foi escolhido devido à sua elevada refletividade na faixa do infravermelho próximo e médio, essencial para os objetivos científicos do telescópio. Diferente da prata ou do alumínio, materiais tradicionalmente usados em telescópios ópticos, o ouro apresenta desempenho superior justamente na região do espectro em que o JWST opera. Essa camada, embora extremamente fina, garante que a maior parte da radiação infravermelha incidente seja refletida em direção aos instrumentos científicos, otimizando a eficiência do observatório. Para proteger o revestimento contra riscos e oxidação durante a montagem, foi aplicada ainda uma película adicional de vidro de silício amorfo.

Outro obstáculo foi o escudo solar de cinco camadas, com dimensões equivalentes a uma quadra de tênis (NASA, 2025g). Sua função é proteger os instrumentos sensíveis da radiação solar e manter a parte científica do telescópio a temperaturas criogênicas, próximas a $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$. O sistema de desdobramento desse escudo, com centenas de cabos, roldanas e dobradiças, foi considerado uma das etapas mais críticas da missão, dado que qualquer falha comprometeria irreversivelmente o funcionamento do telescópio. Além

disso, o sistema de resfriamento ativo do instrumento MIRI, capaz de operar no infravermelho médio, exigiu o desenvolvimento de um criocooler avançado, projetado para atingir temperaturas próximas a 7 Kelvin (NASA, 2025g).

Somam-se a isso as dificuldades em testar, em solo, equipamentos destinados a operar em condições de microgravidade e no vácuo profundo do espaço. Para simular o ambiente operacional, o telescópio passou por testes dentro da câmara de vácuo térmico da NASA em Houston, uma das maiores já construídas, que precisou ser adaptada especificamente para o JWST. Esses fatores, combinados a problemas de gestão e de coordenação entre as diversas agências e empresas envolvidas (NASA, ESA, CSA e contratadas como Northrop Grumman e Ball Aerospace), explicam a longa trajetória de atrasos e revisões financeiras que marcaram a história do projeto.

4.1.3 Lançamento em 2021 e posicionamento no ponto de Lagrange L_2

Após décadas de planejamento e inúmeros adiamentos, o *James Webb Space Telescope* foi finalmente lançado em 25 de dezembro de 2021, a bordo de um foguete Ariane 5, a partir do Centro Espacial de Kourou, na Guiana Francesa, em uma missão conduzida pela ESA em colaboração com a NASA e a CSA (NASA, 2025g). O lançamento foi considerado um marco histórico não apenas pelo sucesso da decolagem, mas também pela complexidade da sequência de operações necessárias para o desdobramento completo do observatório.

Ao contrário do Hubble, que orbita a apenas cerca de 550 km da Terra, o JWST foi projetado para operar no ponto de Lagrange L_2 , localizado a aproximadamente 1,5 milhão de quilômetros do planeta, na direção oposta ao Sol (NASA, 2025g). Os pontos de Lagrange são regiões do espaço em que as forças gravitacionais da Terra e do Sol se equilibram com a força centrífuga de um corpo em movimento, criando zonas de “estabilidade relativa”. Existem cinco pontos de Lagrange, designados de **L1** a **L5**, cada um com propriedades específicas, conforme ilustrado na imagem a seguir:

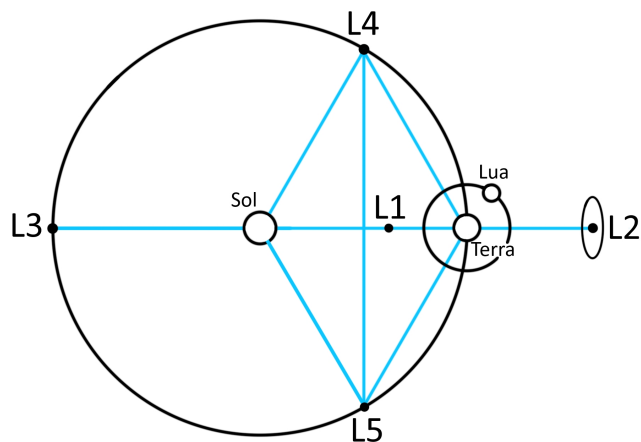


Figura 5: Diagrama dos pontos de Lagrange no sistema Terra-Sol, mostrando a posição estratégica do JWST no ponto L2.

Fonte: Elaboração própria (2025).

- **L1** situa-se entre a Terra e o Sol e é ideal para observatórios solares, como o *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO), já que oferece visão contínua da estrela.
- **L2**, onde está posicionado o JWST, encontra-se além da Terra em relação ao Sol e apresenta excelentes condições para telescópios astronômicos, já que permite manter o Sol, a Terra e a Lua sempre no mesmo alinhamento. Essa configuração simplifica o controle térmico e reduz a interferência luminosa, garantindo um ambiente estável para observações no infravermelho (NASA, 2025g).
- **L3**, situa-se do lado oposto do Sol em relação à Terra. É considerado instável e pouco viável para missões atuais, pois impede a comunicação direta com o planeta.
- **L4** e **L5** estão posicionados aproximadamente 60° à frente e 60° atrás da Terra em sua órbita, formando triângulos equiláteros com o Sol e o planeta. São pontos estáveis e tendem a acumular pequenos corpos celestes conhecidos como asteroides troianos, embora ainda não tenham sido utilizados para abrigar grandes observatórios.

O L2 apresenta vantagens decisivas para o JWST: (i) garante um ambiente quase estático em relação à Terra e ao Sol, simplificando as correções orbitais; (ii) permite que o escudo solar mantenha permanentemente a sombra sobre os instrumentos, condição indispensável para manter temperaturas criogênicas; (iii) elimina a interferência direta da

radiação da Terra e de sua atmosfera, algo inevitável em órbitas baixas; (iv) possibilita comunicação constante com as antenas terrestres, já que o telescópio mantém uma posição previsível em relação ao planeta (NASA, 2025g).

Entretanto, o L2 também impõe desafios significativos. Trata-se de um ponto de equilíbrio instável, de modo que o JWST não está “fixo” ali, mas descreve uma órbita de halo ao redor desse ponto, necessitando de correções regulares para não se afastar. Além disso, a grande distância em relação à Terra impede missões de manutenção, diferentemente do Hubble, que pôde ser atualizado por astronautas em várias ocasiões (NASA, 2025g). Isso tornou a fase inicial da missão crítica: durante cerca de um mês após a decolagem, o telescópio executou a sequência de abertura do escudo solar, desdobramento dos espelhos e ativação gradual dos sistemas de resfriamento. Cada uma dessas etapas, popularmente chamadas de “29 dias de terror”, precisava ocorrer de forma absolutamente precisa, já que qualquer falha seria irreversível.

O sucesso do lançamento e da instalação em L2 marcou o início de uma nova era para a astronomia, consolidando o James Webb Space Telescope como o observatório mais sofisticado já colocado em operação. Desde então, o JWST tem produzido resultados que confirmam não apenas a viabilidade de sua engenharia arrojada, mas também a importância de sua posição estratégica no espaço.

4.2 Inovações Tecnológicas

4.2.1 Espelho segmentado de 6,5 metros

O espelho primário do James Webb Space Telescope (JWST) representa uma das estruturas ópticas mais sofisticadas já desenvolvidas pela engenharia humana. Sua concepção foi um dos maiores desafios do projeto, pois exigia a construção de um sistema segmentado capaz de ser simultaneamente leve, dobrável e de grande diâmetro, o suficiente para coletar luz proveniente de objetos extremamente tênues e distantes, e ainda assim caber no interior do foguete Ariane 5. Diferentemente do Hubble, que possui um espelho monolítico de 2,4 m, o JWST exigia uma superfície coletora muito maior, de 6,5 m de diâmetro, para atingir a sensibilidade necessária a observações no infravermelho profundo. A fabricação de um espelho único dessa dimensão era inviável devido ao peso e às restrições de transporte, motivo pelo qual os engenheiros optaram por um design composto por 18 segmentos hexagonais de berílio (NASA, 2025e).

O berílio foi escolhido por combinar leveza e alta rigidez estrutural, mantendo sua forma mesmo em temperaturas criogênicas próximas a $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NASA, 2025e). Esse material apresenta um coeficiente de dilatação térmica extremamente baixo, o que evita deformações que poderiam comprometer a qualidade óptica. O formato hexagonal dos segmentos, por sua vez, foi definido por permitir encaixe perfeito entre as peças, formando uma superfície quase contínua e maximizando a área de coleta de luz. O alinhamento e a

curvatura de cada segmento são ajustados por atuadores micrométricos controlados com precisão inferior a 50 nanômetros, garantindo que os 18 painéis funcionem como um único espelho coeso e perfeitamente focalizado.

A superfície refletora é recoberta por uma camada finíssima de ouro, com apenas cerca de 100 nanômetros de espessura, equivalente a uma fração da espessura de um fio de cabelo. O ouro foi escolhido por apresentar alta refletividade na faixa do infravermelho próximo e médio, justamente a região do espectro em que o JWST opera. Outros metais, como alumínio e prata, são mais eficientes na luz visível, mas têm desempenho inferior no infravermelho e são suscetíveis à oxidação, o que tornaria sua durabilidade inadequada no vácuo espacial. Segundo dados da NASA, toda a camada de ouro que reveste o espelho pesa apenas 48 gramas, quantidade suficiente para cobrir uma área total de aproximadamente 25 m² (NASA, 2025e).

Quando a radiação infravermelha proveniente de galáxias, estrelas ou exoplanetas atinge o telescópio, ela é inicialmente captada pelos 18 segmentos do espelho primário, que a refletem e convergem para o espelho secundário, uma estrutura circular de 0,74 m posicionada à frente do primário e sustentada por um conjunto de hastes de titânio. Esse espelho secundário tem a função de focalizar e redirecionar a luz coletada para dentro do corpo principal do telescópio, onde estão os instrumentos científicos localizados no módulo ISIM (Integrated Science Instrument Module) (NASA, 2025e). A radiação, já concentrada, é então dividida e guiada para os detectores da NIRC*am*, NIR*Spec*, MIRI e FGS/NIRISS, que a transformam em sinais elétricos interpretáveis.

Essa sequência de reflexões, que vai do espelho primário segmentado ao secundário e segue até os espelhos terciário e de direção fina, compõe o sistema óptico anastigmático de três espelhos (*Three Mirror Anastigmat, TMA*) do JWST (NASA, 2025e). Esse sistema foi projetado para corrigir aberrações ópticas e eliminar erros de foco e curvatura de campo, garantindo alta qualidade de imagem em toda a área observada e permitindo que a luz infravermelha seja direcionada aos instrumentos científicos com máxima precisão e sem distorções. A trajetória completa dessa reflexão óptica pode ser observada na figura abaixo:

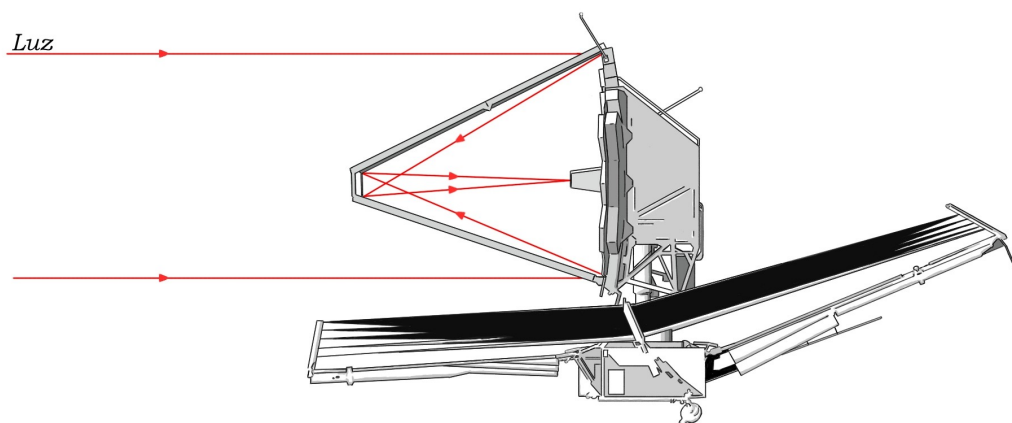


Figura 6: Esquema óptico do James Webb Space Telescope mostrando o caminho da luz através do sistema de espelhos.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Graças a esse sistema óptico, o JWST consegue transformar a fraca radiação térmica emitida há bilhões de anos em dados científicos de altíssima qualidade. Cada fóton coletado percorre um trajeto cuidadosamente calculado entre os espelhos, com mínima perda de energia, até atingir os sensores criogênicos (NASA, 2025f). Assim, o espelho segmentado não atua isoladamente, mas como o primeiro elo de um conjunto de reflexões e focalizações perfeitamente coordenadas, que tornam possível observar o universo em seus estágios mais primitivos.

4.2.2 Instrumentos infravermelhos avançados

O sucesso científico do James Webb depende da sinergia entre seus quatro instrumentos principais, cada um projetado para cobrir diferentes faixas do espectro infravermelho e responder a perguntas específicas sobre a formação do universo, das estrelas e dos planetas (NASA, 2025g). Esses instrumentos transformam a luz coletada pelo espelho em imagens, espectros e medições precisas, revelando a composição química, a temperatura e a estrutura física dos objetos observados.

O primeiro deles, a **NIRCam (Near Infrared Camera)**, é o principal instrumento de imageamento do JWST. Ela opera na faixa do infravermelho próximo ($0,6$ a $5 \mu\text{m}$) e é responsável por capturar imagens de altíssima resolução de galáxias e estrelas. Sua sensibilidade permite detectar fontes extremamente tênues e afastadas, como as primeiras galáxias formadas no universo. A NIRCam também desempenha um papel essencial no alinhamento do espelho segmentado, servindo como referência óptica durante o processo de calibração fina dos 18 painéis (NASA, 2025g).

O **NIRSpec (Near Infrared Spectrograph)** atua como um espectrômetro, decompondo a luz em diferentes comprimentos de onda para identificar a composição química e as propriedades físicas de objetos celestes (NASA, 2025g). Ele é capaz de realizar

espectroscopia multiobjeto, observando até 100 alvos simultaneamente, graças a um sistema de micro-obturadores que controlam individualmente quais fontes de luz entram no espectrógrafo. Esse recurso permite estudar populações inteiras de galáxias distantes, estrelas jovens e exoplanetas de forma simultânea, algo inédito em missões anteriores.

O terceiro instrumento, o **MIRI (Mid-Infrared Instrument)**, opera no infravermelho médio (5 a 28 μm), uma faixa que exige temperaturas ainda mais baixas e sensibilidade extrema (NASA, 2025g). Ele combina funções de câmara e espectrômetro, sendo particularmente eficiente para detectar a emissão térmica de poeira interestelar, moléculas orgânicas complexas e discos protoplanetários. O MIRI é crucial para investigar regiões de formação estelar e planetária, revelando processos que o Hubble jamais poderia observar devido à opacidade da poeira.

Por fim, o **FGS/NIRISS (Fine Guidance Sensor / Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph)** cumpre dupla função: atua como sensor de orientação para garantir o apontamento preciso do telescópio e também realiza espectroscopia sem fendas, permitindo a análise de atmosferas de exoplanetas durante trânsitos planetários (NASA, 2025h). Com ele, é possível detectar a presença de moléculas como vapor d'água, dióxido de carbono e metano, fornecendo pistas sobre a composição e a estrutura térmica desses mundos.

Em conjunto, esses instrumentos fazem do JWST um observatório versátil, capaz de realizar tanto observações de campo profundo quanto medições espectroscópicas altamente detalhadas (NASA, 2025g). Essa multiplicidade de funções torna o telescópio não apenas um sucessor do Hubble, mas um verdadeiro observatório multiuso, apto a investigar praticamente todos os estágios da evolução cósmica, do nascimento das primeiras galáxias até a análise de planetas potencialmente habitáveis.

4.2.3 Sistema de resfriamento e escudo solar

A observação no infravermelho impõe uma condição crítica: o telescópio deve operar em temperaturas extremamente baixas para evitar que sua própria emissão térmica interfira nas medições. Qualquer aquecimento do espelho ou dos instrumentos produziria radiação infravermelha indesejada, mascarando a luz proveniente dos alvos cósmicos (NASA, 2025g). Para contornar esse problema, o JWST emprega um complexo sistema de resfriamento passivo e ativo, composto principalmente pelo escudo solar de cinco camadas e pelo criogenizador do MIRI.

O escudo solar tem dimensões comparáveis a uma quadra de tênis e é feito de *Kapton*, um material polimérico extremamente fino e resistente, revestido com alumínio e silício para refletir radiação. Suas cinco camadas funcionam como um gradiente térmico: cada uma dissipa parte do calor residual, de modo que a última camada voltada para o telescópio permanece a cerca de $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto o lado voltado para o Sol pode ultrapassar $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esse contraste de mais de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ é o que permite manter os instrumentos

científicos frios sem consumo de energia (NASA, 2025g).

O posicionamento no ponto L2 complementa esse sistema, garantindo que o escudo solar mantenha constantemente o Sol, a Terra e a Lua no mesmo lado, evitando variações térmicas significativas. Esse alinhamento é fundamental para assegurar a estabilidade dos detectores e minimizar ruídos térmicos.

Além do resfriamento passivo, o JWST utiliza um sistema ativo de criogenia para o instrumento MIRI, que opera em comprimentos de onda mais longos e exige temperaturas ainda menores, cerca de 7 Kelvin (-266 °C). Esse sistema utiliza um circuito fechado de hélio comprimido, que remove o calor residual de forma contínua. O criocooler foi projetado para funcionar de maneira autônoma por toda a duração da missão, sem necessidade de manutenção, e é considerado um dos componentes mais sofisticados já enviados ao espaço (NASA, 2025g).

A combinação entre o escudo solar e o sistema de resfriamento ativo garante o silêncio térmico necessário para que o JWST detecte sinais infravermelhos de altíssima sensibilidade (NASA, 2025f). Essa capacidade de “ver no frio” é o que permite ao telescópio observar galáxias que se formaram nos primeiros instantes do universo, estrelas em gestação e exoplanetas distantes, cuja luz seria invisível em qualquer telescópio óptico convencional.

4.3 Primeiras Descobertas e Impacto Científico

4.3.1 Observações do universo primordial

O lançamento e a operação do James Webb Space Telescope (JWST) representaram um marco tecnológico e científico. Desde suas primeiras observações, o telescópio começou a redefinir radicalmente nossa compreensão do cosmos, revelando estruturas e fenômenos antes inacessíveis. Seu poder de observar o universo no infravermelho tem sido a chave para explorar desde os primeiros instantes cósmicos até a formação de sistemas planetários e a caracterização de exoplanetas.

Entre as descobertas mais impactantes estão as observações do universo primordial, que é um dos pilares da missão (NASA, 2025f). Conforme detalhado pela NASA, o JWST foi especificamente projetado para ser uma máquina do tempo, capaz de olhar para trás, até menos de 300 milhões de anos após o Big Bang, para testemunhar o nascimento das primeiras galáxias. Essa capacidade extraordinária deve-se à sua sensibilidade no infravermelho. A luz das galáxias mais antigas é “esticada” pela expansão contínua do universo, um fenômeno conhecido como desvio para o vermelho cosmológico. O que começou como luz ultravioleta e visível dessas galáxias infantis chegou até nós, após uma viagem de bilhões de anos, como luz infravermelha. Telescópios como o Hubble, que operam principalmente no visível, são praticamente “cegos” a esse comprimento de onda alongado, tornando o JWST o único instrumento capaz de acessar essa era cósmica fundamental (NASA, 2025f).

Graças a essa tecnologia, o JWST já está fornecendo evidências diretas de como a matéria começou a se organizar. Suas imagens revelam uma infinidade de objetos tênues e distantes com altíssimos desvios para o vermelho, cuja luz percorreu quase a idade total do universo. Essas observações não se limitam a capturar imagens; a espectroscopia do Webb permite analisar a composição dessas galáxias. Isso está ajudando os astrônomos a investigar questões centrais: determinar a taxa de formação das primeiras estrelas, entender o enriquecimento químico inicial do cosmos (quando elementos mais pesados que hidrogênio e hélio foram forjados pela primeira vez nas estrelas) e desvendar o processo de reionização cósmica (NASA, 2025f).

Este último, a reionização, foi uma das grandes transformações do universo. Após a “idade das trevas”, o universo era um opaco nevoeiro de gás hidrogênio neutro. Acredita-se que a luz das primeiras estrelas e galáxias tenha fornecido a energia necessária para “cozinhar” esse gás, tornando-o transparente novamente e permitindo que a luz viajasse livremente (NASA, 2025f). O JWST está observando diretamente as fontes que poderiam ter causado essa transição.

Ao combinar imagens de alta resolução com espectros detalhados, o JWST vai além de simplesmente encontrar galáxias antigas; ele permite distinguir a natureza delas. É possível identificar galáxias jovens, em frenética formação estelar, de outras mais maduras e já estruturadas. Essa diferenciação é crucial para traçar a linha do tempo da evolução galáctica e entender como as pequenas protogaláxias se fundiram e cresceram para formar as gigantescas galáxias que vemos hoje. Dessa forma, o telescópio não apenas amplia os limites da observação, mas também atua como uma ponte vital entre as previsões teóricas da cosmologia e as evidências observacionais, fornecendo uma nova e profunda perspectiva sobre as origens das estruturas que compõem o universo atual (NASA, 2025f).

4.3.2 Estudo de atmosferas de exoplanetas

Além de explorar as fronteiras do cosmos distante, o JWST tem desempenhado um papel decisivo no estudo de mundos próximos, revolucionando o campo da exoplanetologia. Sua principal ferramenta para isso é a espectroscopia de trânsito. Quando um exoplaneta passa na frente de sua estrela hospedeira, vista da Terra, ele bloqueia uma pequena fração da luz estelar. No entanto, uma fração ínfima dessa luz filtra-se através da atmosfera do planeta antes de chegar até nós. É essa luz que o JWST analisa com precisão extraordinária. Diferentes moléculas na atmosfera do exoplaneta absorvem comprimentos de onda específicos dessa luz, criando assinaturas químicas únicas no espectro da estrela. Ao decodificar essas assinaturas, os astrônomos podem identificar a composição química da atmosfera a anos-luz de distância (NASA, 2025h).

A vantagem crítica do JWST reside em sua capacidade de observar uma ampla faixa do infravermelho, que é justamente onde muitas moléculas-chave, como vapor d’água, metano e dióxido de carbono, deixam suas assinaturas mais fortes. Além de identificar

componentes, o telescópio vai além, criando mapas de temperatura e perfis atmosféricos detalhados. Ele faz isso observando o eclipse secundário, quando o planeta desaparece atrás da estrela, e medindo a diminuição no brilho infravermelho total. Essa medição direta da luz do planeta (sua emissão térmica) permite aos cientistas determinar a temperatura do lado diurno do planeta e inferir a presença e a composição de nuvens e neblinas. Combinando os dados de trânsito e eclipse, o JWST pode sondar diferentes camadas atmosféricas, determinando propriedades como pressão, estrutura térmica e até a dinâmica dos ventos, ao detectar como as assinaturas de gás se deslocam devido à rotação do planeta (NASA, 2025h).

As observações iniciais, como as do exoplaneta gigante gasoso WASP-96 b, demonstraram imediatamente o poder do JWST. Ele não apenas confirmou a presença de água, mas detectou uma assinatura clara de neblina e detalhes que permitiram medir a temperatura do planeta com uma precisão nunca antes alcançada. Essa capacidade marca um ponto de virada, especialmente com a observação de planetas menores do tipo super-Terra e sub-Netuno, como os do sistema TRAPPIST-1 (NASA, 2025h). Lá, o JWST está procurando por atmosferas e tentando identificar as primeiras assinaturas biológicas em mundos rochosos. Ao caracterizar a diversidade de atmosferas, desde as de gigantes gasosos inflados até as de mundos potencialmente rochosos, o telescópio está fornecendo uma visão sobre os mecanismos físicos e químicos que moldam os planetas.

Assim, o estudo das atmosferas exoplanetárias pelo JWST complementa perfeitamente sua missão cosmológica. Ele conecta a narrativa da origem do universo e das galáxias à busca por vida em outros mundos, transformando os exoplanetas de meros pontos de luz em mundos complexos e caracterizáveis, e nos aproximando do objetivo final de identificar um planeta com condições propícias para a vida.

4.3.3 Contribuições para a compreensão da formação estelar

Enquanto o James Webb Space Telescope revoluciona nossa compreensão do cosmos distante e de exoplanetas, ele também redefine o estudo da formação estelar e planetária (NASA, 2025i). Sua capacidade única de observar no infravermelho funciona como um visor para o universo obscurecido, permitindo que os astrônomos espiem através das espessas nuvens moleculares que, na luz visível, ocultam completamente os processos de nascimento das estrelas. Essas nuvens, berçários estelares frios e escuros, colapsam sob sua própria gravidade, formando núcleos densos que, eventualmente, dão origem a novas estrelas.

Em imagens, como as dos Pilares da Criação na Nebulosa da Águia e da Nebulosa de Carina, o JWST revela muito mais do que estrelas infantis anteriormente escondidas (NASA, 2025j). Ele detalha com precisão inédita as complexas estruturas dos discos protoplanetários de gás e poeira que orbitam as estrelas jovens. É dentro desses discos que os ingredientes básicos para a formação planetária se organizam, onde grãos de poeira

coalescem para formar os blocos de construção de asteroides, cometas e, por fim, planetas inteiros.



Figura 7: Contraste entre a visão tradicional no visível (esquerda) e a visão penetrante no infravermelho (direita) dos Pilares da Criação.

Fonte: (NASA, 2025j).

Essas observações vão além da imagem, permitindo aos cientistas decifrar a dinâmica física desses ambientes turbulentos. O telescópio analisa a complexa interação entre os poderosos jatos bipolares, os vigorosos ventos estelares e a intensa radiação ultravioleta provenientes de estrelas jovens massivas. Essas forças fundamentais atuam esculpindo as próprias nuvens que lhes deram origem, erodindo umas áreas enquanto comprimem outras. Este processo de retroalimentação pode, paradoxalmente, semear a formação da próxima geração de estrelas ao desencadear novas instabilidades gravitacionais nas nuvens circundantes.

Complementarmente, a espectroscopia de última geração do JWST desvenda a composição química desses berçários estelares. Ele identifica diretamente as assinaturas de gelo cósmico, compostos como água, dióxido de carbono, metano e moléculas orgânicas complexas, congelados nos grãos de poeira. Esta análise é crucial para rastrear como os elementos pesados, forjados nas fornalhas nucleares de gerações estelares passadas, são incorporados aos discos protoplanetários. Esses gelos fornecem a matéria-prima química para novos sistemas planetários e são considerados fundamentais para o desenvolvimento da química prebiótica (NASA, 2025f).

Ao integrar observações de escalas cósmicas radicalmente diferentes, desde as primeiras galáxias até as regiões de formação estelar próximas, o JWST oferece uma visão holística de uma fábrica cósmica em funcionamento. Ele conecta a narrativa da origem cósmica, onde os elementos pesados foram inicialmente semeados, aos processos locais onde esse

mesmo material é continuamente reciclado (NASA, 2025g). Desta forma, o telescópio revela não apenas como as estruturas primordiais do universo surgiram, mas também como os mesmos mecanismos fundamentais de nascimento e evolução estelar permanecem ativos, moldando a galáxia até os dias atuais.

Cada nova descoberta do telescópio contribui, portanto, para uma compreensão mais profunda de um ciclo universal contínuo. Ele ilumina o eterno renascimento da matéria que constitui as estrelas, os planetas e a própria vida, unificando o passado remoto do cosmos com a sua contínua e dinâmica evolução.

5 Comparação entre Hubble e James Webb

5.1 Diferenças nas faixas de observação (visível vs. infravermelho)

O Telescópio Espacial Hubble foi projetado para observar principalmente nas faixas da luz ultravioleta, visível e infravermelho próximo, cobrindo comprimentos de onda de aproximadamente 0,1 a 2,5 micrômetros (NASA, 2025c). Esta capacidade permitiu que ele capturasse algumas das imagens mais espetaculares do universo próximo, revelando com precisão a estrutura complexa de galáxias, a dinâmica das nebulosas e a evolução de estrelas (NASA, 2025d). Suas observações no visível fornecem uma janela para o universo como o enxergaríamos, se nossos olhos fossem extremamente sensíveis.

Em contraste, o Telescópio Espacial James Webb foi otimizado especificamente para o infravermelho, operando em uma faixa muito mais ampla que vai de aproximadamente 0,6 a 28,5 micrômetros (NASA, 2025g). Este desenho instrumental confere ao Webb uma capacidade única de perscrutar através de densas nuvens de poeira interestelar, que são opacas à luz visível, revelando os processos de formação estelar e planetária que ocorrem em seu interior (NASA, 2025i). Além disso, sua sensibilidade ao infravermelho permite captar a luz de galáxias incrivelmente distantes, cuja radiação foi "esticada" para comprimentos de onda mais longos devido à expansão do universo, um fenômeno conhecido como desvio para o vermelho cosmológico (NASA, 2025f).

Esta divisão fundamental de responsabilidades espectrais, onde o Hubble domina o visível e o Webb explora o infravermelho, pode ser visualizada de forma concreta na Figura 8, que compara as faixas de operação de ambos os telescópios:

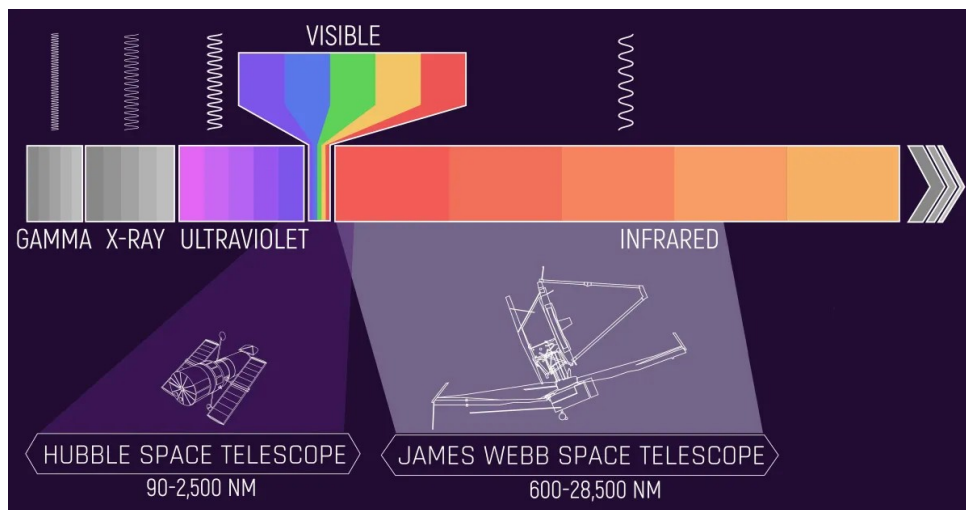


Figura 8: Comparação das faixas espectrais de observação dos telescópios Hubble e James Webb.

Fonte: (NASA, 2025e).

Como a figura ilustra, a combinação desse amplo alcance espectral com um espelho primário significativamente maior (6,5 metros contra 2,4 metros do Hubble) é um salto tecnológico decisivo (NASA, 2025e). O grande espelho do Webb, composto por 18 segmentos banhados a ouro para maximizar a reflexão da luz infravermelha, concede ao telescópio uma área de coleta de luz muito superior. Isso possibilita a detecção de objetos até cem vezes mais tênues do que aqueles que o Hubble pode perceber, abrindo uma nova fronteira para a observação dos primeiros fenômenos cósmicos e de estruturas que simplesmente não emitem luz no espectro visível.

Essa diferença fundamental nas faixas de observação vai além de uma mera curiosidade técnica, pois define capacidades científicas complementares. O Hubble permanece como uma ferramenta insubstituível para mapear a morfologia visível de objetos astrofísicos e estudar fenômenos como as atmosferas de planetas gigantes em nosso sistema solar (NASA, 2025a). O Webb, por sua vez, especializa-se em acessar regiões do cosmos anteriormente ocultas, investigando os processos iniciais de formação de galáxias, a composição química de atmosferas exoplanetárias (NASA, 2025h) e as condições dos berçários estelares (NASA, 2025j). Juntos, eles oferecem uma visão multiplataforma e profundamente enriquecida do universo, cada um iluminando uma parte diferente do vasto quebra-cabeça cósmico.

5.2 Complementaridade nas pesquisas astronômicas

A verdadeira sinergia entre os telescópios Hubble e James Webb fundamenta-se em suas diferenças espectrais e técnicas, que se revelam complementares em vez de excludentes (NASA, 2025e). O Hubble mantém sua posição única como instrumento essencial para observações no ultravioleta e no visível, capturando com riqueza de detalhes a estrutura de galáxias próximas, a população estelar de aglomerados e processos astrofísicos

que emitem nessas frequências (NASA, 2025d). Enquanto isso, o Webb especializa-se em explorar os domínios do infravermelho, acessando fenômenos cósmicos simplesmente invisíveis a outros comprimentos de onda, como as primeiras galáxias do universo, discos protoplanetários obscurecidos por poeira e as assinaturas químicas de atmosferas exoplanetárias (NASA, 2025h; NASA, 2025i; NASA, 2025f).

Na prática, essa divisão de funções permite uma abordagem observacional integrada. Um mesmo objeto celeste pode ser investigado por ambas as lentes, cada uma revelando uma camada distinta de sua natureza. Por exemplo, o Hubble pode mapear a distribuição de estrelas adultas em uma galáxia espiral, registrando sua morfologia em luz visível (NASA, 2025d). Simultaneamente, o Webb pode penetrar nos véus de poeira das mesmas regiões, expondo os berçários estelares ocultos e a luz tênue de populações estelares mais antigas e frias, invisíveis ao Hubble (NASA, 2025j).

Essa colaboração multiespectral amplia significativamente a precisão e a profundidade das investigações astronômicas (NASA, 2025a). Ao combinar dados de diferentes faixas de comprimento de onda, os astrônomos podem construir uma compreensão tridimensional e holisticamente mais completa dos objetos celestes. Os resultados são interpretados dentro de um contexto mais amplo, onde as informações de uma faixa spectral validam, complementam e enriquecem as descobertas da outra. Dessa forma, a astronomia moderna avança por meio de uma parceria orbital, onde a visão penetrante do Webb no infravermelho e a acuidade visual do Hubble se unem para desvendar o universo em toda a sua complexidade e esplendor.

5.3 Expectativas futuras e possíveis colaborações entre os telescópios

O início das operações do Telescópio Espacial James Webb representa muito mais do que a simples adição de um novo observatório; marca o surgimento de uma nova filosofia de investigação cósmica baseada na colaboração multiespectral (NASA, 2025e). A era que se inicia não é da substituição, mas da sinergia, onde as capacidades complementares do Hubble e do Webb se unem para criar uma visão mais rica e multidimensional do cosmos. A continuidade das operações do Hubble é, portanto, estratégica, fornecendo dados cruciais no ultravioleta e no visível que servirão de base contextual para as descobertas infravermelhas do seu sucessor (NASA, 2025a).

Espera-se que esta parceria orbital defina o padrão para a astronomia observacional nas próximas décadas. Estratégias de observação conjunta, nas quais um telescópio identifica e caracteriza um alvo em seu comprimento de onda nativo para que o outro o investigue em uma faixa espectral diferente, devem se tornar uma prática comum. Por exemplo, o Hubble pode identificar galáxias com altas taxas de formação estelar através de sua emissão ultravioleta, enquanto o Webb pode, em seguida, analisar a mesma região no

infravermelho para medir a quantidade de poeira que obscurece essas estrelas e estudar as populações estelares mais antigas (NASA, 2025f; NASA, 2025j). Esta abordagem combinada tem o potencial de acelerar dramaticamente a descoberta de novos fenômenos cósmicos.

O verdadeiro poder dessa colaboração reside na validação e no aprofundamento que ela proporciona. Dados multiespectrais permitem que os astrônomos confrontem e refinem modelos teóricos com precisão, testando previsões sobre a evolução galáctica, a formação de planetas e a física de objetos compactos a partir de múltiplas perspectivas independentes (NASA, 2025h). Dessa forma, o legado do Hubble é prolongado e amplificado (GAINOR, 2020), e o Webb não opera como uma entidade isolada, mas como o parceiro principal em uma rede crescente de observatórios espaciais e terrestres. Juntos, eles estão tecendo uma tapeçaria cósmica mais completa e detalhada, onde cada fio espectral é essencial para revelar a imagem final do universo.

6 Conclusão

O presente trabalho permitiu analisar de forma abrangente a evolução tecnológica e as contribuições científicas dos telescópios espaciais Hubble e James Webb, evidenciando o papel central que esses observatórios desempenham na consolidação da astronomia espacial moderna. Ao superar as limitações impostas pela atmosfera terrestre, ambos os telescópios possibilitaram avanços significativos na observação do Universo, ampliando o alcance das investigações astrofísicas e redefinindo paradigmas científicos fundamentais.

A partir de uma revisão bibliográfica sistemática e de uma análise comparativa baseada em parâmetros técnicos e científicos, foi possível compreender como o Hubble, operando principalmente nas faixas do visível e do ultravioleta, estabeleceu bases sólidas para o entendimento da expansão do Universo, da formação estelar e galáctica, bem como para a determinação de parâmetros cosmológicos essenciais, como a constante de Hubble e a idade do Universo. Suas observações inauguraram uma nova era de precisão na astronomia observacional e serviram como referência para o desenvolvimento de missões subsequentes.

Por sua vez, o James Webb Space Telescope representa um salto tecnológico significativo, ao operar predominantemente no infravermelho e empregar inovações como o espelho segmentado de grande diâmetro, sistemas avançados de resfriamento e instrumentação de alta sensibilidade. Essas características permitiram estender o alcance observacional para épocas mais remotas do cosmos, possibilitando o estudo de galáxias primordiais, a investigação dos processos iniciais de formação estelar e a caracterização detalhada de atmosferas exoplanetárias, aspectos fundamentais para a compreensão da evolução cósmica e da potencial habitabilidade de outros mundos.

Dessa forma, conclui-se que Hubble e James Webb não devem ser compreendidos como instrumentos concorrentes, mas sim como observatórios complementares, cujas ca-

pacidades distintas se integram para oferecer uma visão mais completa e aprofundada do Universo. A análise conjunta de seus resultados demonstra como a continuidade tecnológica e científica entre missões espaciais é essencial para o avanço do conhecimento astronômico, consolidando a astronomia espacial como uma ferramenta indispensável para a investigação das origens, da estrutura e do futuro do cosmos.

Referências

- [1] ARCHIBALD, E. N. et al. On the atmospheric limitations of ground-based submillimetre astronomy using array receivers. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 336, n. 1, p. 1-13, 2002. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2002.05610.x.
- [2] ESA. **Lyman Spitzer: Space Telescope Pioneer**. 2025. Disponível em: https://www.esa.int/About_Us/ESA_history/Lyman_Spitzer_Space_telescope_pioneer. Acesso em: 14 out. 2025.
- [3] GAINOR, C. **Not Yet Imagined: A Study of Hubble Space Telescope Operations**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, Office of Communications, NASA History Division, 2020. (NASA History Series, SP-2020-4237). Disponível em: <https://www.nasa.gov/history/history-publications-and-resources/nasa-history-series/not-yet-imagined-a-study-of-hubble-space-telescope-operations/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [4] LAUNIUS, R. D.; BRANDT, D. S. **The Hubble Space Telescope: A Case Study in Large Space Missions**. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 1990. NASA Technical Memorandum 103443. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19910003124>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [5] LAUNIUS, R. D.; DEVORKIN, D. H. (eds.). **Hubble's Legacy: Reflections by Those Who Dreamed It, Built It, and Observed the Universe with It**. Washington, DC: Smithsonian Institution Scholarly Press, 2015.
- [6] LIVIO, M. (org.). **A Decade of Hubble Space Telescope Science**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1017/CBO9780511536168.
- [7] NASA. **Hubble Design - NASA Science**. 2025c. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/observatory/design/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [8] NASA. **Hubble Science Highlights**. Greenbelt, MD: NASA's Goddard Space Flight Center, 2025d. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/multimedia/e-books/hubble-science-highlights/>. Acesso em: 10 out. 2025.
- [9] NASA. **30 Years Ago: Hubble Launched to Unlock the Secrets of the Universe**. 2025b. Disponível em: <https://www.nasa.gov/missions/hubble/30-years-ago-hubble-launched-to-unlock-the-secrets-of-the-universe/>. Acesso em: 14 out. 2025.

- [10] NASA. **Hubble vs. Webb: Mirrors**. 2025e. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/observatory/hubble-vs-webb/#mirrors>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [11] NASA. **Astronomical Community Impacts - NASA Science**. 2025a. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/impacts-and-benefits/astronomical-community-impacts/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [12] NASA. **Webb and the Early Universe**. 2025f. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/webb/early-universe/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [13] NASA. **James Webb Space Telescope Fact Sheet**. 2025g. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/webb/fact-sheet/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [14] NASA. **Webb and Other Worlds**. 2025h. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/webb/other-worlds/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [15] NASA. **Webb's Star Formation Discoveries: How Do Stars Form?** 2025i. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/webb/science-overview/science-explainers/webbs-star-formation-discoveries/#How-Do-Stars-Form>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [16] NASA. **Webb and the Star Lifecycle**. 2025j. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/webb/star-lifecycle/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [17] OBERT, Hermann. *Die Rakete zu den Planetenräumen*. 4. ed. München: Oldenbourg, 1929. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=9pmUDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA4&dq=Die+Rakete+zu+den+Planetenr%C3%A4umen>. Acesso em: 30 out. 2025.
- [18] PROQUEST. **Influência da Atmosfera Terrestre na Visibilidade: Estudo da Correlação Entre Dados Atmosféricos e Visibilidade**. 2023. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/99d3c3a68a9ef47910c56311123d3bd3/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 21 set. 2023.
- [19] ROTTNER, R. M. **Making the Invisible Visible: A History of the Spitzer Infrared Telescope Facility (1971–2003)**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, NASA History Division, 2020. (NASA History Series). Disponível em: <https://www.nasa.gov/history/history-publications-and-resources/nasa-history-series/making-the-invisible-visible/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [20] SMITH, R. W. **The Hubble Space Telescope: From Concept to Success**. Cham: Springer Praxis Books, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2827-9.

- [21] SPITZER, L. Jr. Report to project rand: Astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory. **Astronomy Quarterly**, v. 7, n. 3, p. 131-142, jan. 1990.