



ATMOSFERA DO PLANETA MARTE: INVESTIGAÇÃO SOBRE A PERDA DE MASSA ATMOSFÉRICA POR FOTOEVAPORAÇÃO E INTERAÇÃO COM VENTOS SOLARES

Julia de Oliveira Arpiani (IC) e Adriana Benetti Marques Valio (Orientadora)

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

Interações entre o Sol e os planetas em órbita podem levar à dissipação de gases atmosféricos do planeta devido a processos como fotoevaporação, vento solar e explosões causadas pela atividade solar. O objetivo deste trabalho é realizar uma estimativa quantitativa da perda de massa atmosférica do planeta Marte, especialmente considerando suas interações mais intensas com um Sol mais jovem e ativo. Inicialmente, o planeta possuía características semelhantes às de um planeta Terra jovem, porém, ao longo do tempo, transformou-se em um ambiente hostil e inabitável para formas de vida conhecidas. Para tanto, são utilizadas equações que descrevem a perda de massa por fotoevaporação e vento solar aplicadas ao planeta Marte. Obtivemos como resultado para os parâmetros do vento solar em 227,94 milhões de km (distância de Marte do Sol), uma velocidade de 790,4 km/s e uma densidade de $3,6 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$. Portanto, a perda da massa atmosférica de Marte pelo vento solar, atualmente, resultou em $6,18 \times 10^{14} \text{ g/s}$. Por outro lado, a perda atmosférica por fotoevaporação total obtida de 0 a 4,6 bilhões de anos (idade estimada do Sistema Solar) foi de $1,87 \times 10^{11} \text{ kg}$, sendo menor comparado às perdas atmosféricas do planeta Marte por interações com o vento solar.

Palavras-chave: Marte. Fotoevaporação. Vento Solar.



ABSTRACT

Interactions between the Sun and orbiting planets can lead to the dissipation of atmospheric gases from the planet due to processes such as photoevaporation, solar wind, and flares caused by solar activity. The aim of this work is to provide a quantitative estimate of the atmospheric mass loss of planet Mars, particularly considering its more intense interactions with a younger and more active Sun. Initially, the planet had characteristics similar to those of a young Earth, but over time, it transformed into a hostile and uninhabitable environment for known life forms. For this purpose, equations describing mass loss through photoevaporation and solar wind applied to Mars are used. The result obtained for the solar wind parameters at 227,94 million km (distance of Mars from the Sun) was a velocity of 790,4 km/s and a density of $3,6 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$. Therefore, the current atmospheric mass loss of Mars due to the solar wind was calculated to be $6,18 \times 10^{14} \text{ g/s}$. On the other hand, **the** total atmospheric loss due to photoevaporation obtained over 0 to 4.6 billion years was $1,87 \times 10^{11} \text{ kg}$, which is lower compared to the atmospheric losses of Mars due to interactions with the solar wind.

Keywords: Mars. Photoevaporation. Solar Wind.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Sol, a nossa estrela

O Sol sempre foi objeto de estudos por parte dos seres humanos. Assim, avanços na áreas sobre o conhecimento de nossa estrela têm progredido cada vez mais, incluindo o conhecimento sobre a atmosfera solar. Para tanto, já se sabe, desde 1925 graças à Cecilia Payne, que o Sol, em sua maioria, é composto por 78,5% de hidrogênio (H), 19,7% de hélio (He), e outros gases (SILVA, 2006). Para fins de estudo, o Sol é dividido em camadas conforme mostrado na Figura 1.

Sua superfície é considerada a região opaca à emissão do visível, já acima desta, existe uma região bastante rarefeita, a atmosfera, que, por apresentar diversas diferenças de temperatura, também é subdividida. A fotosfera é a superfície visível do Sol, ela é bastante estreita (300 km) e, comparada com as outras regiões, com 5800 K é considerada fria. Já a cromosfera é uma região avermelhada, na qual as temperaturas são bem altas (milhares de kelvin) e é observada, também no espectro de onda ultravioleta, e em altas frequências de rádio. Por fim, a última camada atmosférica é a coroa solar, camada mais extensa e mais quente (milhões de kelvin) que permeia todo espaço interplanetário. Entre esta região e a cromosfera existe uma região de transição. É na atmosfera solar que ocorrem as explosões solares, que serão vistas ao decorrer do texto.

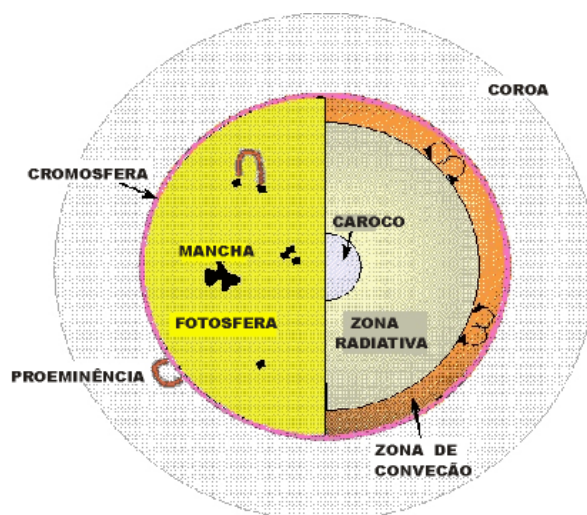


Figura 1: Esquema das camadas do interior e atmosfera do Sol solares. Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/sol/sol.htm#:~:text=Composi%C3%A7%C3%A3opara%20todos%20os%20outros%20elemento.>



1.2. Vento solar

A primeira observação do vento solar ocorreu em 1946, por Biermann através da análise da cauda dos cometas (BIERMANN E LUST, 1958). Isso porque, os ventos solares são emissões de partículas carregadas que ocupam todo o meio interplanetário do Sistema Solar, e quando um cometa se aproxima da estrela, a maior parte de seus constituintes se volatiliza e o vento solar projeta a cauda do cometa de partículas carregadas para a direção radial oposta ao Sol.

A ocorrência da emissão desse fluxo intenso de plasma solar tem como fonte a coroa, região extensa mais externa e que possui temperaturas da ordem de 10^6 K e caracteriza-se por ser uma região muito ativa. Desta forma, o vento solar é originado pela imensa diferença de pressão entre a coroa e o espaço interplanetário. Por conseguinte, a velocidade térmica é maior que a velocidade de escape do Sol, gerando o escape de partículas, majoritariamente de núcleos de hélio ionizados e de elétrons, que são acelerados a altas velocidades, da ordem de centenas de quilômetros por segundo (COSTA *et al.*, 2011). Os dois tipos de ventos solares são rápidos (700-800 km/s), aqueles que são originados nos buracos coronais, regiões mais frias e menos densas (3 milhões de prótons por m^3), e os ventos solares lentos (400 km/s). Esses são originados em regiões de baixas latitudes localizadas nas proximidades do equador solar, além de serem mais densos (10 milhões de prótons por m^3).

Desse modo, é fato que os ventos solares interferem diretamente no planeta Terra, bem como, em todo Sistema Solar. Assim, é de extrema importância o estudo destas consequências, tendo em vista que além de um desafio tecnológico, os ventos solares podem, inclusive, afetar a vida, assim como veremos adiante.

1.3. Atividade Solar

Sob a mesma perspectiva do estudo dos ventos solares, a atividade solar é algo que impacta diretamente a vida na Terra, tendo em vista que o Sol é a estrela mais próxima de nós, e nosso fornecedor de energia e luz, componentes essenciais para a vida. Para tanto, as explosões solares (ou *flares*) são os fenômenos mais energéticos e importantes na dinâmica do Sistema Solar, pois são liberações repentinas de energia magnética (na ordem de 10^{24} a 10^{32} erg). As explosões têm como origem as manchas solares, áreas mais escuras e frias da região da fotosfera solar devido à alta concentração de campos magnéticos (SILVA 2006)., Grandes quantidades de radiação são emitidas durante as explosões,



incluindo o ultravioleta (UV) e raios X, que podem propiciar a fotoevaporação de atmosferas planetárias, que ocorre quando a radiação fornecida pela estrela é absorvida pela atmosfera do planeta, podendo ionizar os átomos e moléculas presentes, que se separam em elétrons e íons. Esta ionização das camadas mais externas da atmosfera pode resultar na perda destas partículas carregadas para o espaço (JACKSON *et al.* 2012).

Felizmente, o planeta Terra encontra-se protegido dessas radiações, devido à presença da camada de ozônio. Porém, planetas como Marte, não possuem tal proteção, e são impactados diretamente por estes fenômenos. Um desafio tecnológico, atual, de grande importância são os impactos dessas explosões em satélites artificiais, e até, em naves espaciais, objetos que estão acima da proteção da camada de ozônio terrestre.

Ademais, outro evento solar importante são as ejeções de massa. Esses fenômenos geralmente estão atrelados a erupções de proeminências e explosões solares, mas também ocorrem quando não há registros, ou estes são baixos, de atividade solar na superfície. Essas ejeções de massa coronal carregam massas de cerca de 10^{15} g com altas velocidades (200 a 2000 km/s) (WEBB e HOWARD, 2012).

1.4. **Marte: Superfície e Atmosfera**

O planeta Marte desperta muita curiosidade por parte da comunidade científica, isso porque, assim como a Terra, este é um planeta Telúrico, ou seja, está no interior do Sistema Solar e possui uma superfície rochosa. Além disso, esse planeta tem sido alvo de muitas missões espaciais, que tiveram seu início já em 1964 com a sonda Mariner enviada pela Agência Espacial Norte Americana (NASA). Atualmente, missões estão sendo cada vez mais financiadas com a possibilidade de entender mais sobre outros planetas, e ainda, buscar algo que fascina o ser humano desde sua origem, a vida fora da Terra.

O habitat marciano, em seus primórdios, caracterizava-se por ser menos hostil do que se apresenta nos dias de hoje, assemelhando-se com os primórdios do planeta Terra. Isso porque, estudos apontam, através de dados da sonda Mariner 9, da Viking 1 que o planeta, provavelmente, era mais úmido e quente, e com uma pressão atmosférica maior do que a atual (KASTING e CATLING, 2003).

Porém, apesar de existirem comprovações que o planeta Marte já deteve características que possibilitariam a forma de vida que é conhecida (GALANTE *et al.* 2016), isso não é o que é retratado na atualidade. Com sua evolução, o oxigênio presente no planeta se combinou com o ferro do solo, formando uma superfície composta por óxido de ferro. Sua atmosfera evoluiu e chegou na composição de 95% CO₂, 3% de gás N₂, além de



também serem encontradas outras substâncias, como: Ar, CO e, inclusive, H₂O. O planeta marciano, apesar de ter água, apresenta, em sua maioria, H₂O congelada, o que torna este um planeta árido, que pode apresentar tempestades de poeiras locais. Estes eventos ocorrem quando os ventos excedem de 50 a 100 m/s, podendo se tornar, até mesmo, tempestades globais, que afetam diretamente o clima do planeta.

Sob a mesma temática, Marte possui temperaturas muito baixas, sendo, sua temperatura média igual a 250 K (-23°C), fato que ocorre devido à sua atmosfera extremamente fina, que não promove um efeito estufa que consiga segurar a irradiação solar na superfície planetária. Ainda pouco se sabe sobre a evolução da atmosfera marciana, que um dia, pode ter se assemelhado com a terrestre, esse será o tópico abordado nos seguintes passos do trabalho, possibilitando, quem sabe, entender um pouco mais de como poderá ser a Terra do futuro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Fotoevaporação e Ventos Solares na perda de massa planetária

Os ventos solares foram primeiramente detectados pela sonda Voyager 2, no meio interplanetário para além da órbita de Plutão. O vento é composto por um fluxo de partículas carregadas que, próximas da órbita terrestre, chegam à velocidade de 1,6 milhão de km/h (SILVA 2006). À medida que o fluxo de plasma do vento se afasta do Sol, torna-se cada vez mais rarefeito, e assim, ocorrem menores colisões entre partículas, e o desacoplamento entre íons e elétrons. Dessa maneira, é possível inferir que os ventos solares, como partículas que atingem o meio interplanetário, possuem impactos nos planetas do Sistema Solar. No caso de planetas muito próximos de sua estrela hospedeira, maiores serão essas interferências.

Sob a mesma perspectiva, a fotoevaporação pode ser causada por um grande fluxo de raios ultravioletas derivados da grande atividade estelar em seus primeiros milhões de anos de vida, em que a estrela está mais ativa (JACKSON et al. 2012). Foi realizado um estudo (MODI *et al.* 2023) que evidencia que em exoplanetas na zona habitável em órbitas menores < 0,1 UA, o vento solar remove cerca de $\leq 1\%$ da atmosfera de H/He, enquanto, em sua maioria, a fotoevaporação é responsável por remover toda esta atmosfera. Assim, nos 38 planetas estudados por Modi *et al.* (2023), previu-se que 13 tivessem perdido seu



envelope primário devido à fotoevaporação, enquanto apenas 2 planetas perderam em decorrência das ações dos ventos estelares em conjunto com a fotoevaporação. Desse modo, pode-se analisar, através desse estudo, que a atmosfera planetária é diretamente afetada, tanto pelo fenômeno da fotoevaporação, quanto pelos ventos estelares. E, além disso, esses impactos são maiores nos primórdios dos sistemas planetários, devido à alta atividade estelar, resultando até, no impedimento do desenvolvimento da vida extraterrestre.

Bauer e Lammer (2004) descrevem que a fonte da radiação EUV (1750-70 Å) e da radiação de raios X (170-1 Å) de estrelas como o Sol é produzida na atmosfera estelar. A absorção dessa radiação (XUV) na atmosfera planetária, leva à fotoionização e fotodissociação dos constituintes atmosféricos. Os autores também complementam que além da radiação ultravioleta, o fluxo de massa do vento estelar em função da idade, tem implicações importantes para a evolução das atmosferas planetárias.

2.2. Marte em seus primórdios

As causas da baixa massa do planeta Marte (0,1 massas terrestres) continuam um mistério, mesmo após diversas teorias de formação planetária do Sistema Solar (IZIDORO et al. 2014). Isso porque, segundo os autores, todas as simulações existentes para um objeto no atual semieixo maior (1,5 ua) de Marte, em sua maioria, resultam em corpos muito mais massivos. Apesar de existirem teorias como depleção de massas diferentes no disco para um planeta rochoso, não é aplicável com outros requisitos do Sistema Solar.

Hiscox (1999) trata sobre as possibilidades, e comprovações, de um possível habitat, no passado marciano, que seria local apropriado para vida. Isso é, o texto aborda as semelhanças entre Terra e Marte em seus primórdios, com evidências da existência de água líquida, após estudos que comprovaram a existência de um conjunto de canais fundos e rios secos. Outra semelhança é a existência de uma atmosfera mais densa nos primeiros anos do planeta Marte, devido às teorias, que abordam a existência de uma camada de dióxido de carbono (1-5 bars), levando a um significativo efeito estufa que propiciaria temperaturas médias mais altas que o ponto de congelamento da água.

Estudos sobre meteoritos marcianos relatam dados sobre glóbulos de carbonatos e traços de grânulos, que podem ser indícios de atividades biogênicas passadas (HISCOX 1999). Desse modo, parece plausível a existência de um planeta marciano, no passado, menos hostil, com a possibilidade da presença de água líquida. Sendo assim, ocorreram



alterações desde a formação de Marte que contribuíram para seu estado atual, sendo a perda de atmosfera, um possível motivo.

3. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho é baseada na investigação da perda da atmosfera marciana por fotoevaporação e ventos solares, partindo do princípio de que Marte foi um planeta menos hostil em seu passado (KASTING e CATLING, 2003). Evidências sugerem que Marte detinha uma atmosfera mais densa e úmida capaz de proporcionar um clima mais ameno e semelhante ao da Terra jovem. Também, durante esse período, o Sol era uma estrela mais jovem e, portanto, mais ativa comparada aos dias atuais, sendo 70% menos brilhante. Dessa maneira, na presente pesquisa, foram utilizadas equações que descrevem quantitativamente as perdas atmosféricas de Marte através das interações estrela-planeta que podem ter contribuído para a atmosfera fina e clima hostil do planeta atualmente.

3.1. Fotoevaporação

Quando a radiação emitida por uma estrela, principalmente UV e raios X, é absorvida pela atmosfera do planeta, ela pode ionizar os átomos e moléculas presentes, que se separam em elétrons e íons. Esta ionização das camadas mais externas da atmosfera pode resultar na perda destas partículas carregadas para o espaço. Este processo é conhecido como fotoevaporação.

Para estimar a perda de massa atmosférica de um planeta por fotoevaporação, será utilizada a seguinte equação (JACKSON et al. 2012), aplicada ao planeta Marte:

$$\dot{m} = n \frac{L_x R_p^3}{3GM_p(a)^2} \quad \text{Eq. 1.}$$

onde R_p e M_p , são dados do planeta, neste caso, Marte, sendo raio e massa marcianos. G representa a constante gravitacional ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$). O semi-eixo maior, a , é definido pela média temporal da distância orbital, que no caso de Marte é 1,5 UA. O n é um fator de eficiência, variável de 0,25 a 1 (JACKSON et al., 2012). Por fim, L_x é a luminosidade em raio X e EUV da estrela, nesse caso, o Sol.



3.2. Ventos solares

A perda de atmosfera por vento solar é um processo que ocorre quando o vento solar, que é um fluxo de partículas carregadas emitido pelo Sol, interage com a atmosfera de um planeta. Esse processo é especialmente importante para planetas como Marte que não têm um campo magnético forte o suficiente para proteger sua atmosfera da interação com o vento solar. Quando o vento solar atinge a atmosfera de um planeta, as partículas carregadas interagem com os átomos e moléculas presentes na atmosfera podendo ser arrastados para fora da atmosfera do planeta.

O cálculo da perda de massa atmosférica planetária em decorrência dos ventos solares, aplicada em Marte, foi feito pela equação:

$$\dot{m} = 4\pi R_p^2 \rho_{surf} u_{surf} \quad \text{Eq. 2.}$$

onde, R_p representa o raio do planeta, nesse caso, o raio marciano. Representada por u_{surf} temos a velocidade do vento solar, sendo necessário seu cálculo, pela equação de Parker (1958), para sua inserção na Eq. 2. Assim:

$$u^2 - \frac{2kT}{m} - \frac{2kT}{m} \ln \ln \frac{mu^2}{2kT} = 8 \frac{kT}{m} \ln \ln \left(\frac{r}{r_c} \right) + 2GM \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_c} \right) \quad \text{Eq. 3.}$$

Da mesma maneira, o cálculo da densidade do vento solar (KIVELSON E RUSSEL, 1995) também foi considerado antes da Eq. 2.:

$$4\pi r^2 \rho_{surf} u_{surf} = 1 \quad \text{Eq. 4.}$$

3.3. Perda de massa total

Considerando as mudanças no raio e na massa do planeta Marte causado pela perda do envelope planetário, os cálculos, tanto da fotoevaporação, quanto do vento solar, devem ser feitos retrocedendo no tempo. Dessa maneira temos (MODI *et al.* 2023):

$$M_{anterior} = M_p + \dot{m} \quad \text{Eq. 5.}$$



Onde, M_p é a massa atual do planeta. O m , representa a massa total perdida pelo planeta, tanto por fotoevaporação, quanto por ventos solares. Obtendo, assim, $M_{anterior}$, a massa atualizada do planeta e a massa que será utilizada em todos os outros cálculos.

Para o raio atualizado calculamos (MODI *et al.* 2023):

$$R_{anterior} = R_{núcleo} + R_{envelope} \quad \text{Eq. 6.}$$

Onde $R_{núcleo}$, é o raio do núcleo do planeta, a distância do centro do planeta a borda do núcleo rochoso, para planetas Telúricos como Marte. $R_{envelope}$ é o raio do envelope planetário, ou seja, a camada gasosa que envolve o núcleo. $R_{anterior}$ representa o raio inicial atualizado do planeta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização de todos os cálculos quantitativos referente a perda de massa atmosférica de Marte por fotoevaporação e ventos solares foi implementado um código em linguagem de programação Python para facilitar a realização dos mesmos.

4.1. Fotoevaporação

A fotoevaporação é um fenômeno derivado da relação estrela-planeta que é capaz de ionizar átomos e moléculas presentes na atmosfera planetária através da absorção da radiação emitida pela estrela em comprimento de ondas UV e raios X. Para tanto, os planetas mais afetados são aqueles mais próximos da estrela mãe, por conseguinte, são mais expostos a radiação.

Na Eq. 1 o cálculo da perda de massa atmosférica por fotoevaporação é diretamente proporcional a luminosidade L_x da estrela, portanto, foi calculada a luminosidade do Sol em função do tempo através da equação:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4 \quad \text{Eq. 7.}$$

onde R é o raio do Sol, $6,9 \cdot 10^8 \text{ m}$, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann e $T_{\text{eff}} = 5780 \text{ K}$ é a temperatura efetiva do Sol. A luminosidade solar ao longo dos seus 10 bilhões de anos de vida é mostrada na Figura 1.

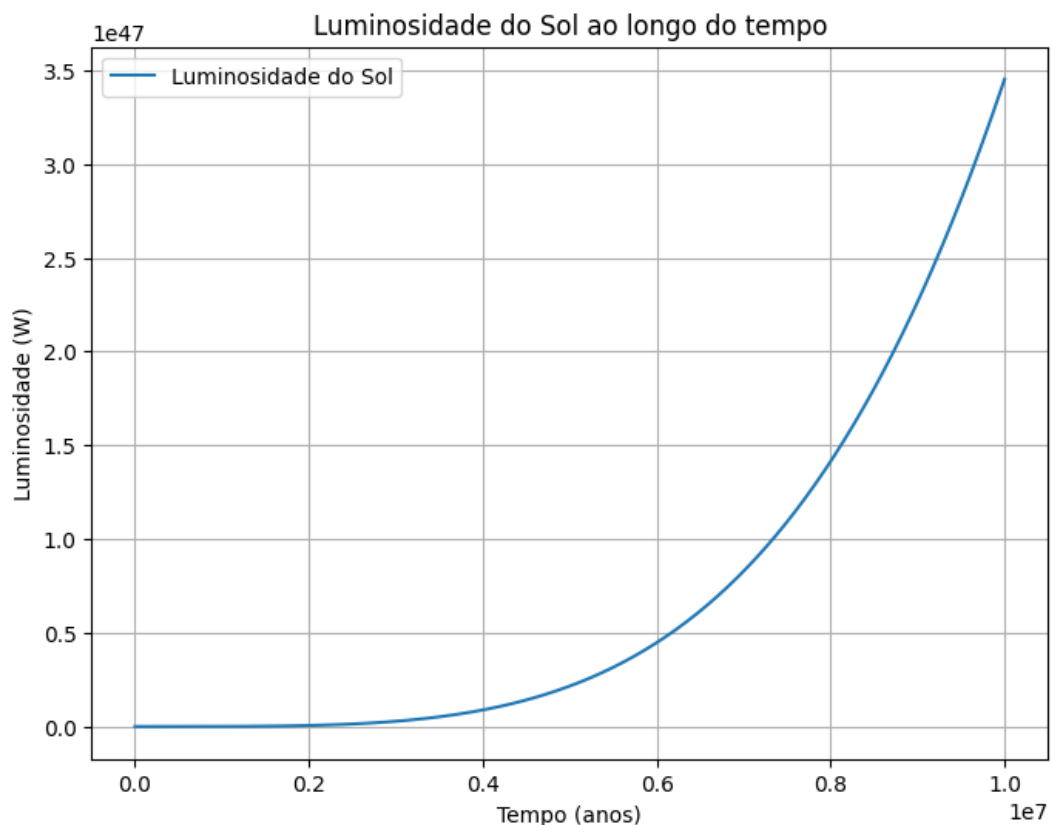


Figura 2: Luminosidade do Sol em Watts em função do tempo em 10^7 anos. Fonte: Autora

Ao resolver todos os cálculos através do programa em linguagem Python obteve-se $1,87 \times 10^{11} \text{ kg}$ de perda de massa atmosférica total em decorrência da fotoevaporação.

4.2. Vento Solar

O vento solar também é eficiente na perda do envelope planetário de planetas mais próximos da estrela mãe. Porém, em planetas mais distantes da estrela, como por exemplo, Marte, no processo de perda atmosférica do planeta, o vento solar é mais eficiente que a fotoevaporação.

A densidade do vento solar, adaptada do trabalho de Leblanc et al. (1998) é dada pela equação:

$$n(r) = 7e4 r^{-1.67} + 4.1e6 r^{-4} + N_s r^{-6} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad \text{Eq. 8}$$

onde $N_s = 2.6e7 \text{ cm}^{-3}$. Esta densidade é mostrada na Figura 3.

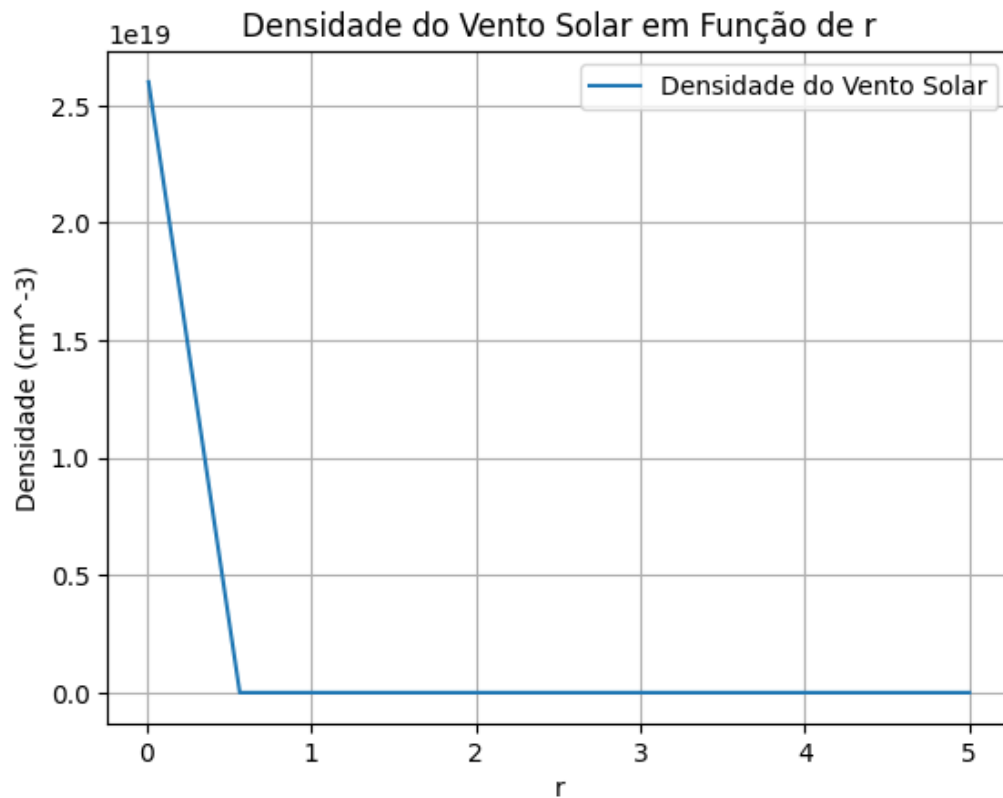


Figura 3: Gráfico obtido pelo programa em linguagem Python da densidade do vento solar em função da distância “r” em UA. Fonte: Autora

Resolvendo a Eq. (3) para uma temperatura coronal de 2 MK e usando um programa em linguagem Python, e adotando a distribuição de densidade do vento solar mostrada na Figura 3, obtivemos a velocidade do vento solar em função da distância da estrela mostrada na Figura 4.

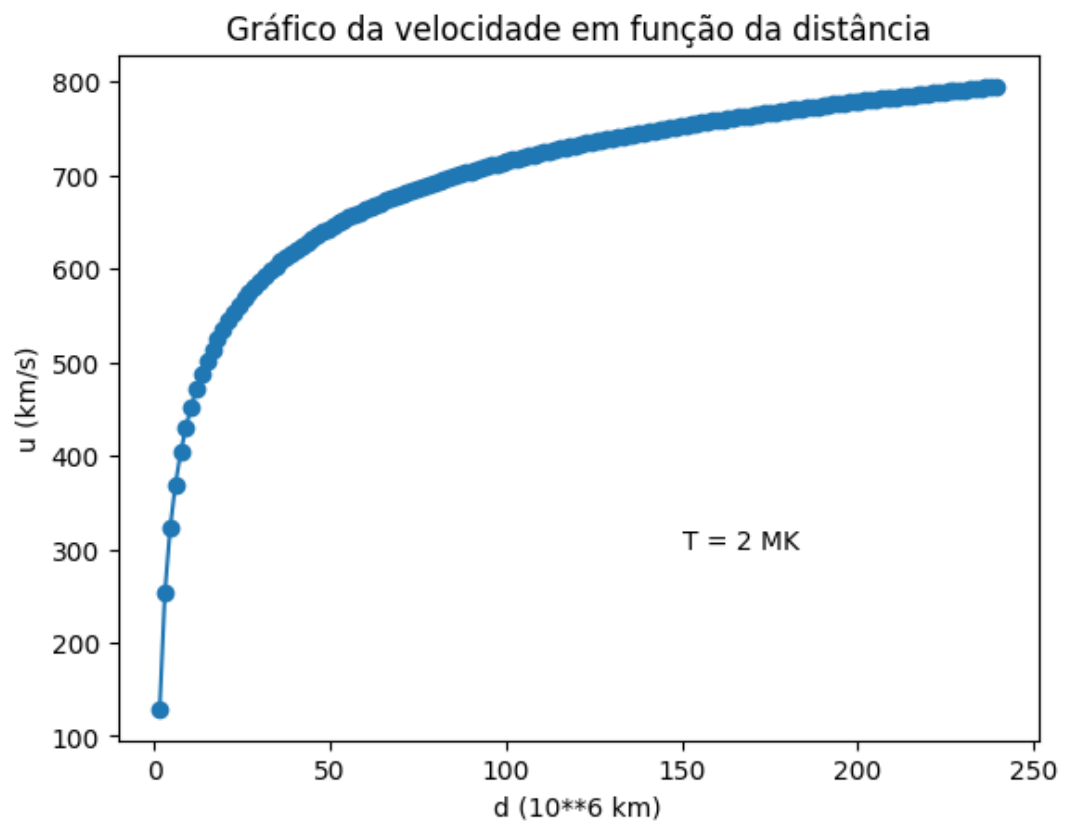


Figura 4: Gráfico obtido pelo programa em linguagem Python da velocidade do vento solar em função da distância para uma temperatura de 2MK. Fonte: autora

Do gráfico da Figura 4, obtemos que a velocidade em $227,94 \times 10^6$ km (distância de Marte do Sol) é de 790,446 km/s e, que a densidade do vento solar na mesma distância é de $3,6 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$. Na Figura 5 é mostrado o ponto interpolado onde a velocidade foi calculada. A distância de Marte ao Sol é identificada pela linha vertical tracejada em vermelho.

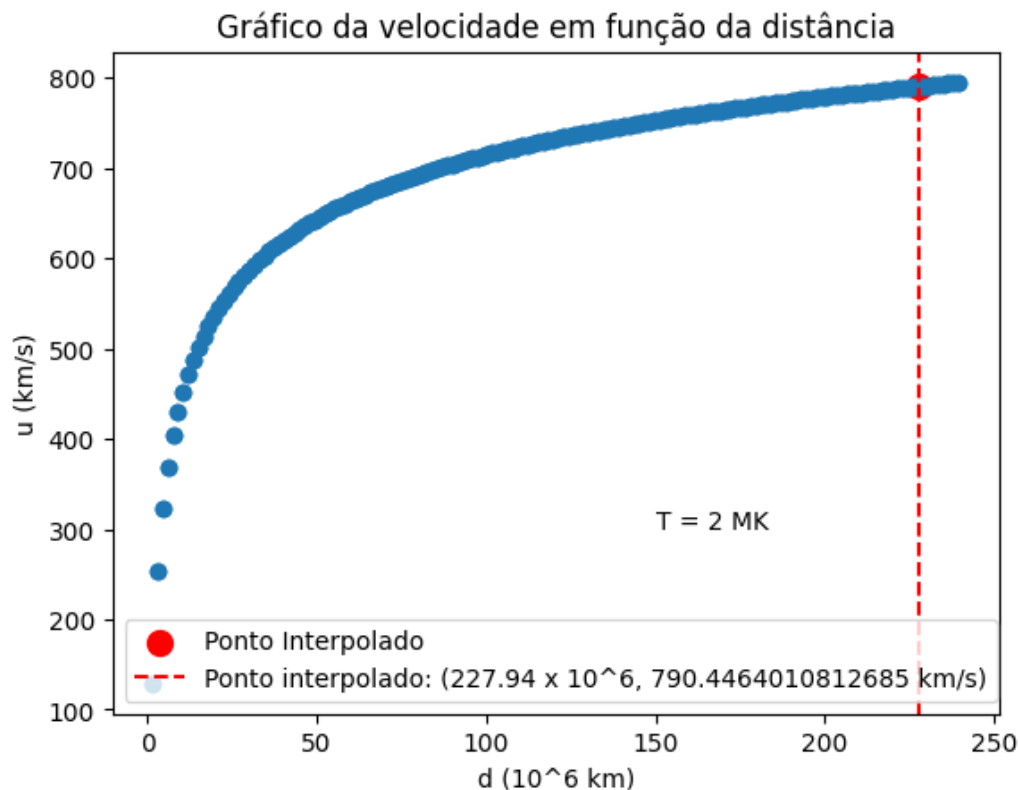


Figura 5: Gráfico obtido através do programa com resultado da interpolação dos números para obter a velocidade do vento solar em Marte. Fonte: autora

Adicionando os valores obtidos da velocidade e densidade do vento solar é possível resolver a Eq.1 e estimar a perda de massa atmosférica de Marte atualmente, resultando: $6,18 \times 10^{14} \text{ g/s}$.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planeta Marte passou por processos durante sua evolução que tornaram sua atmosfera, que no passado era mais densa e úmida, em uma atmosfera bastante rarefeita. Existem diversas explicações que levam aos motivos dessa mudança de um clima mais ameno a um clima hostil, como o atual, que impossibilita a forma de vida conhecida. Uma dessas explicações é a perda atmosférica devido às interações entre Marte e Sol, entre elas os fenômenos da fotoevaporação e as interações com o vento solar.



É conhecido que o Sol jovem era mais ativo e menos luminoso que o Sol atual e isso impacta efetivamente a evolução atmosférica dos planetas que o orbitam. A fotoevaporação está diretamente ligada à exposição que estes planetas têm à emissão de radiação proveniente do Sol, para tanto, planetas mais próximos da estrela sofrem mais com esse fenômeno. Os efeitos do vento solar estão intimamente ligados ao campo magnético dos planetas e, também, à distância estrela-planeta, já que a densidade e velocidade do vento solar diminuem com o aumento da distância e assim, são menos eficientes no arraste do envelope planetário. Para planetas longínquos de suas estrelas, como Marte, o fenômeno do vento solar é predominante na perda atmosférica, além do fato do planeta Marte não possuir um campo magnético forte como o da Terra, aumentando a eficiência do vento solar no arraste atmosférico.

Desse modo, as combinações desses fatores levaram à perda atmosférica do planeta Marte como foi estimado quantitativamente na presente pesquisa. Porém os valores necessitam de sofisticções, pois resultaram em números provavelmente maiores do que de fato são, sendo necessário estimar a variação da luminosidade para o Sol jovem e o cálculo aprimorado da efetividade da absorção da radiação no fenômeno da fotoevaporação, que ficaram, portanto, para uma pesquisa futura.



PROGRAMA INSTITUCIONAL DE
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

6. REFERÊNCIAS

BIERMANN, L. e LUST, R. **The Tails of Comets**. Scientific American, v. 199, 44, 1958. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1058-4>

COSTA Jr., E., Simões Jr., F. J. R., Cardoso, F. R. e Alves, M.V. **O vento solar e a atividade geomagnética (Solar Wind and geomagnetic activity)**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, 4301, 2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400001>

GALANTE, D. et al. **Astrobiologia: uma ciência emergente**. São Paulo: Tikinet, 2016, 361 p.

HISCOX, J. A. **An overview of the origin of life: the case for biological prospecting on Mars**. Earth, Moon, and Planets, v. 87, 191–212, 1999.

IZIDORO, A., Haghighipour, N., Winter, O. C. e Tsuchida, M. **Terrestrial Planet Formation in a Protoplanetary Disk with a Local Mass Depletion: A Successful Scenario for the Formation of Mars**. The Astrophysical Journal, v. 782, 31, 2014. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/782/1/31>

JACKSON, A.P., DAVIS, T. A., e WHEATLEY, P.J. **The coronal X-ray–age relation and its implications for the evaporation of exoplanets**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 422, 2024–2043, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20657.x>

KASTING, J.F. e CATLING, D. **Evolution of a Habitable Planet**. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v. 41, 429–463, 2003. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.071601.170049>

KIVELSON, M. G. e RUSSELL, C. T. **Introduction to Space Physics**. 1st Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, 586 p.

LAMMER, Helmut & BAUER, Siegfried J. **Planetary Aeronomy: Atmosphere Environments in Planetary Systems**. Alemanha. Springer, 2004.

LEBLANC, Y., Dulk, G. A.; Bougeret, J-L. **Tracing the Electron Density from the Corona to 1 au**. Solar Physics, 183, 165-180, 1998. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005049730506>

MODI, A., Estrela, R. e Valio, A. **Impact of M-dwarf Stellar Wind and Photoevaporation on the Atmospheric Evolution of Small Planets**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2023.

PARKER, E. N. **Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields**. The Astrophysical Journal, v. 128, 664, 1958. <https://doi.org/10.1086/146579>

SILVA, A.V.R. **Nossa Estrela: o Sol**. 1. ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2006. 166 p.

WEBB, D.F. e HOWARD, T. A. **Coronal Mass Ejections: Observations**. Living Reviews in Solar Physics, v. 9, 3, 2012. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>



PROGRAMA INSTITUCIONAL DE
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Contatos: arpiani20@gmail.com e avalio@craam.mackenzie.br