II Congresso Aeroespacial Brasileiro

De 16 a 19 de setembro

EM DIREÇÃO A UMA TAXONOMIA UNIFICADA PARA SATÉLITES COM BASE EM MASSA E TAMANHO

Rui C. Botelho A. S. [a]***; Ademir L. Xavier Jr.*** [b]***;***

[a] Centro Universitário UniRuy | Wyden, Salvador - BA.

[b] Agência Espacial Brasileira – AEB, Brasília - DF.

Resumo: *A classificação de satélites por massa é uma das principais métricas para definição do porte e dos custos de lançamento desses dispositivos. A existência de muitas classificações, com categorias de tamanho e valores de faixas de massa, torna imprecisa uma caracterização mundial desses dispositivos. Diante disso, foi realizado um estudo bibliográfico e a análise das principais classificações existentes para satélites e da classificação de veículos lançadores pela capacidade de carga útil. Fez-se também um breve estudo da capacidade de carga dos principais veículos lançadores atuais, das tendências desse mercado e dos projetos futuros de lançadores. O presente trabalho apresenta os resultados obtidos em direção a uma taxonomia unificada de satélites, agrupados por massa e tamanho. Além de procurar unificar as definições de categorias para pequenos satélites, busca-se categorizar classes e subclasses para dispositivos espaciais com massa e tamanho muito grande.*

Palavras-chave: *classificação de satélites, taxonomia, massa, tamanho, carga útil.*

1. INTRODUÇÃO

O crescimento no número de lançamentos de satélites desde a década de 1950 até o início dos anos 1990 teve como consequência o contínuo crescimento no tamanho, massa e custo dos satélites, com a inclusão de inúmeras cargas úteis (Kramer; Cracknell, 2008), tendência que foi observada até os anos 2000. Isso fez com que satélites se tornassem grandes laboratórios espaciais multifuncionais (Volynskaya; Kasyanov, 2016). Um exemplo característico é o Envisat (Noël et al 1998), com uma massa de aproximadamente 8.200 kg.

Com os avanços da microeletrônica ocorridos no final dos anos 1980 e miniaturização dos circuitos integrados, houve o barateamento dos custos e o aumento na escala de desenvolvimento e produção de sistemas computacionais para a área espacial. Isso fez com que o lançamento de missões com satélites pequenos e extra-pequenos se tornasse uma prática cada vez mais difundida mundialmente, principalmente a partir da década de 1990 (Volsyskaya; Kasyanov, 2016; Kramer; Cracknell, 2008; Nag; LeMoigne; Weck, 2014).

Tais mudanças definiram uma nova conjuntura e coexistência entre dispositivos tradicionais e de grande porte em órbita e dispositivos mais novos, cada vez menores e mais eficientes. Essa situação de ruptura implicou na necessidade de se segmentar essas duas correntes, de modo a permitir as suas identificações de forma mais precisa, o que gerou novos conceitos e classificações para categorizar esses diversos tipos, principalmente, no que diz respeito à massa e tamanho de tais equipamentos, requisitos importantes na definição de custos das missões e o lançamento em órbita. No entanto, apesar do surgimento de classificações e categorias de satélites pelas suas massas, constata-se a carência de convergência e muitas diferenças entre terminologias semelhantes, conforme o país, o fabricante ou a instituição de pesquisa (Volsyskaya; Kasyanov, 2016).

Rui C. Botelho A. S.: ruicbs@gmail.com

Tendo adquirido status de processo sistemático de classificação, a taxonomia é amplamente empregada em uma variedade de ciências: biologia (Simpson, 1961), astronomia (Tholen; Barucci, 1989; Brownlee; Olszewski; Wheelock, 1982; Levison, 1996), pedologia (Wilding; Drees, 1983), dentre outros. A multiplicidade e variedade das manifestações de diversas ordens de fenômenos dão origem às classificações taxonômicas. Na biologia, a taxonomia tem como função prover uma classificação sistemática de seus objetos de estudo, algo que posteriormente revelou uma ordem ainda mais profunda de causas, como a evolução natural (Winsor, 2009). De forma semelhante, a evolução de dispositivos específicos nas várias engenharias também se submete a uma taxonomia, que igualmente revela uma ordem subjacente como resultado do progresso tecnológico (Shenhar; Bonen, 1997) e do processo de gerenciamento de projetos. Pode-se dizer que existe uma relação entre os diversos esquemas taxonômicos das inovações e o processo subjacente de desenvolvimento e gerenciamento (Shenhar; Dvir, 1996). Isso não poderia deixar de acontecer também nos desenvolvimentos da área espacial e, em particular, com satélites (Sweeting, 1991; Kramer; Cracknell, 2008).

Através do estudo bibliográfico e comparação entre classificações de satélites em massas e porte, complementado pela relação destas com a capacidade de carga útil (*Payload* – PL) de veículos lançadores (*Launch Vehicles* – LVs), o presente artigo apresenta resultados obtidos na direção da proposição de um novo esquema de classificação (taxonomia) unificada para satélites, com base na sua massa e tamanho. Também foram observadas as tendências futuras oriundas do intenso progresso tecnológico na área espacial vivido atualmente. Assim, foi possível definir classes de satélites associadas às faixas de valores de massa, bem como o tamanho (porte) de tais dispositivos.

Ao final do trabalho é apresentada uma proposta inicial de taxonomia unificada de satélites, agrupados por massa e tamanho com 8 classes de satélites, da ordem de centenas de milhares de toneladas às frações do grama. Em termo de definição de tamanho as classes definidas por massa foram divididas em 7 categorias, que vão da ultragrande a ultrapequena. Além de unificar as definições de categorias para pequenos satélites, essa proposta de taxonomia tem a vantagem de criar classes para dispositivos espaciais com massa muito grande, tais como estações espaciais e potenciais missões interplanetárias.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 faz-se uma breve revisão dos esquemas já existentes, incluindo as classificações que envolvem nanossatélites, na Seção 3 é feita a revisão das capacidades atuais e previstas de veículos lançadores, o que leva à necessidade de se propor novas classes, principalmente para engenhos de grande massa (como estações espaciais). Finalmente, na Seção 4 é apresentada uma primeira proposta de classificação, com considerações finais feitas na Seção 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ESQUEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SATÉLITES POR MASSA E TAMANHO

2.1 Esquemas de classificação de satélites por massa e tamanho

Algumas tentativas de classificação de satélites em termos de sua ordem de massa tiveram início na década de 1990. Em 1992, Sweeting (1992) cunhou a primeira classificação para pequenos satélites (Kramer; Cracknell, 2008), tão somente a partir da sua massa. Essa classificação define o surgimento de categorias de pequenos satélites e nanossatélites. Kramer e Cracknell (2008) apresentam uma revisão da classificação anterior, mesclando as classes de pequenos satélites (500 – 1.000 kg) e de minissatélites (100 – 500 kg) em um intervalo de 100 a 1.000 kg (Tabela 1). Além disso, a classe de nanossatélites foi dividida em três grupos: nanossatélites, picossatélites e femtossatélites.

Muitos autores, fóruns e instituições têm adotado a classificação do limite superior de 1.000 kg para a categoria de minissatélites (Nag; LeMoigne; Weck, 2014). Apesar de criar um padrão de faixa de valores de massa para classes de satélites, tal classificação não separou a nomenclatura da classe e sua respectiva massa

do tamanho / porte dos satélites. Assim, essa classificação ainda carece de subclasses que melhor definam satélites em categorias cujo intervalo de massa seja maior, como no caso dos minissatélites entre 100 kg e de 1.000 kg, com características distintas ainda que em uma mesma categoria.

Com o crescente número e variedade de aplicações, requisitos de serviço e miniaturização do sistema, Konecny (2004) refinou (Tabela 2) a classificação anterior, substituindo classe de pequenos satélites (*small*) pela classe "Médio" (*medium*) e dividindo a classe nanossatélite em três grupos: nanossatélites (1 – 10 kg) , picossatélites (0,1 – 1 kg) e femtossatélites (0,001- 0,1kg ou 1-100 g). Kramer e Cracknell (2008) apresentaram uma revisão (Tabela 3) da classificação de Konecny (2004), mesclando as classes de pequenos satélites (500 – 1.000 kg) e de minissatélites (100 – 500 kg) em um intervalo de 100 a 1.000 kg. Além disso, a classe de nanossatélites foi dividida em três grupos: nanossatélites (1 – 10 kg), picossatélites (0,1 – 1 kg) e femtossatélites (0,001 – 0,1kg ou 1 – 100g).

Muitos autores (Konecny (2004) e Xue et al (1998, rev)) e instituições têm adotado a classificação do limite superior de 1.000 kg para a categoria de minissatélites.

Tabela 1. Primeira classificação de satélites de Sweeting, adaptado (Sweeting 1991).

Classe	Massa (kg)
Grande	> 1.000
Pequeno	500 – 1.000
Mini	100 – 500
Micro	10 – 100
Nano	< 10

Tabela 2. Classificação de satélites de Konecny (Konecny, 2004).

Classe	Massa (kg)
Grande	> 1,000
Médio	500 – 1,000
Mini	100 – 500
Micro	10 – 100
Nano	1 – 10
Pico	0.1 – 1
Femto	< 0.1

Tabela 3. Classificação de satélites por ordem de intervalo de massa (potências de 10), adaptado (Kramer; Cracknell, 2008).

Classe		Massa (kg)
Grande	*(observatories, etc)*	> 1.000
Mini	*Smallsats (or light satellites)*	100 – 1.000
Micro		10 – 100
Nano		1 – 10
Pico		0,1 – 1
Femto	*Satellite-on-a-chip*	0,01 – 0,1

Na conferência da UNISPACE III (Schrogl, 1998), por exemplo, os custos de desenvolvimento e manufatura de pequenos satélites foram estimados na ordem de US$ 5 a 20 milhões (minissatélite), de US$ 2 a 5 milhões (microssatélite) e menos de US$ 1 milhão (nanossatélite) (Nag; LeMoigne; Weck, 2014). Mesmo sendo uma referência aceita pela comunidade, inclusive por representar os limites de massa como potências de 10, a classificação da tabela 3 é pouco prática ou ajustada à realidade de custos (inclusive de lançamento). Isso se deve porque ela agrega, em uma mesma classe, satélites de 100 kg a 1.000 kg de massa, os quais, teoricamente, possuem custos e, provavelmente, complexidade bem diversos entre si, dado o

histórico de missões espaciais das últimas décadas, conforme apresentado por Nag, LeMoigne e Weck (2014).

A padronização de nomenclaturas também pode depender da entidade ou agência encarregada pelas missões espaciais. Conforme Nag, LeMoigne e Weck (2014), a ESA (*European Space Agency*) estabelece que satélites pequenos (*small satellites*) têm massa entre 350 - 700 kg, minissatélites estariam entre 80 - 350 kg e microssatélites se enquadrariam entre 50 - 80 kg (Tabela 4). Já a EADS (*European Aeronautic Defence and Space Company*), também europeia e subsidiária da Astrium, especifica valores de massa maior do que as demais classificações (Tabela 5) para a mesma nomenclatura (minissatélite), adicionando ainda subcategorias para os minissatélites (miniXL (1.000 – 1.3000 kg) e mini (400 - 700 kg) e, além disso, apresenta uma faixa limite de massa diferente para os microssatélites (100 - 200 kg). Estranhamente existe duas faixas não abrangidas segundo esse esquema, de acordo com Nag, LeMoigne e Weck (2014), para valores de massa entre 300 – 400 kg e 700 – 1.000 kg.

Tabela 4. Esquema de classificação da ESA, adaptado (Nag; LeMoigne; Weck, 2014).

Classe	Massa (kg)
Pequeno	350 – 700
Mini	80 – 350
Micro	50 – 80

Tabela 5. Classificação de satélites da Astrium, adaptado (Nag; LeMoigne; Weck, 2014).

Classe	Massa (kg)
Pequeno	1.000 – 1.300
Mini	400 – 700
Micro	100 – 200

Como as classificações da ESA e da Astrium não definem explicitamente as classes de satélites padrão e de grandes satélites, para fins de padronização, essas foram agrupadas e definidas como sendo as que possuem valores de massa superiores a 700 kg e 1.300 kg, respectivamente. Essa mesma inferência foi usada com outras classificações apresentadas em outros trabalhos e descritas no presente estudo, alterando-se somente os valores limites para cada caso. Na classificação (Tabela 6) adotada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) os pequenos satélites, *SmallSats* são engenhos espaciais com massa inferior a 180 kg e "tamanho máximo equivalente a um refrigerador" (NASA, 2015).

Tabela 6. Classificação de pequenos satélites da NASA, adaptado (Volynskaya; Kasyanov, 2016).

Classe	Massa (kg)
Mini	100 – 180
Micro	10 – 100
Nano	1 – 10
Pico	0,01 – 1
Femto	0,001 – 0,01

O uso dos pequenos satélites em missões espaciais comerciais e científicas é relativamente novo na Rússia, mas para alguns autores (Volynskaya; Kasyanov, 2016), a classificação de satélites pela massa deve ser conforme a Tabela 7. Observa-se que não há um consenso entre os cientistas russos para os valores limites das classes de mini / microssatélites. Diferentemente da definição da NASA, não há uma classe de femtossatélites na classificação russa. Assim pode ser considerada a classe de Femtossatélites nas classificações, a partir de inferência, considerando o valor limite inferior da classe de Picossatélites.

Tabela 7. Classificação de pequenos satélites da ROSCOSMOS, adaptado (Volynskaya; Kasyanov, 2016).

Classe	Massa (kg)
Pequeno	500 – 1.000
Mini	100 – 500 kg ou 150 – 500
Micro	10 – 100 kg ou 10 – 150
Nano	1 – 10
Pico	0,01 – 1

Tabela 8. Classificação de pequenos satélites por Wekerle, adaptado (Wekerle et al 2017).

Classe	Massa (kg)
Mini	101 – 500
Micro	11 – 100
Nano	1 – 10

Wekerle et al (2017) defende particularmente que pequenos satélites devem ser classificados como engenhos espaciais de massa igual ou inferior a 500 kg (Tabela 8). Como as classes de grandes satélites e de Femtossatélites não estão definidas, essas podem ser inferidas, do mesmo modo como em algumas classificações anteriores.

O setor de radiocomunicação da União Internacional de Telecomunicação (*International Telecommunication Union* – ITU, 2014) define categorias semelhantes à classificação apresentada por Wekerle et al (2017) para minissatélites, microssatélites, nanossatélites e picossatélites. Define ainda, diferentemente, a categoria de femtossatélites conforme apresentado na Tabela 9.

Inicialmente mais focada na relação com a capacidade de carga dos veículos lançadores, a Administração Federal de Aviação (*Federal Aviation Administration* – FAA, 2015) dos Estados Unidos da América apresentou uma classificação de satélites pela massa, para fins de definição de requisitos de lançamento, como mostrado na Tabela 10. No entanto, a partir de 2016 (FAA, 2016; 2017; 2018), seus anuários descrevem uma classificação com mais categorias de satélites (Tabela 11), mais próxima das últimas classificações apresentadas, combinados com a proposta da Tabela 9, ainda que existam diferenças em relação ao padrão de faixas de valores em potências de 10, conforme definido em Kramer e Cracknell (2008).

Tabela 9. Classificação da ITU (2014) de pequenos satélites por intervalo de massa, adaptada.

Classe	Massa (kg)
Mini	100 – 500
Micro	10 – 100
Nano	1 – 10
Pico	0,1 - 1
Femto	< 0,1

Tabela 10. Categorização de classes de satélites por massa segundo FAA (2015), adaptada.

Classe	Massa (kg)
Extra pesada	100 – 500
Pesada	10 – 100
Intermediária	0,1 - 1
Média	< 0,1

Tabela 11. Classes de massa de carga útil usadas pela FAA, adaptado. (FAA, 2018)

Classe	Massa (kg)
Extrapesada	> 7.100
Pesada	5.401 – 7.000
Grande	4.201 – 5.400
Intermediária	2.501 – 4.200
Média	1.201 – 2.500
Pequena	601 – 1.200
Mini	201 - 600
Micro	11 - 200
Nano	1,1 - 10
Pico	0,09 - 1
Femto	0,01 – 0,1

2.2 Classificações nanossatélites e cubesats

Essa revisão de classificação visa demonstrar a inexistência de consenso para uma nomenclatura de classes e valores de referência aplicados a pequenos satélites, o que ocorre tanto pela definição de várias classes de satélites como de uma classe única. Particularmente quanto às demais categorias já vistas, o desenvolvimento de nanossatélites representa claramente o processo de miniaturização na eletrônica, a partir do desenvolvimento de circuitos de alto desempenho e adaptados às condições de radiação do espaço.

Desse modo, os cubesats surgiram no final dos anos 1990 (Nason et al, 2002; Swartwout, 2013), inicialmente como missões estudantis em engenharia de sistemas. Rapidamente, porém, foram adaptados a missões com aplicações científicas e comerciais relevantes (Kramer; Cracknell, 2008). Com o surgimento desses novos sistemas, uma nova classificação também surgiu motivada principalmente pela quantização da dimensão ou volume exigida como requisito de missão, o que distingue cubesats de nanossatélites mais gerais. Assim cerca de 50% dos satélites nessa faixa de massa (< 10 kg), baseiam-se em uma mesma arquitetura modular de estruturas cúbicas de 10x10x10 cm (1U) para definir subcategorias, normalmente, até 12U. A popularização do uso de nanossatélites alterou a concepção das missões e de projetos multifuncionais de sistemas dedicados. Muitas das missões atuais têm ainda forte cunho educacional e são baseadas inclusive em plataformas predefinidas com componentes COTS (*Commercial Off the Shelf*), o que contribuiu para uma nova tendência comercial em atividades espacial (Kramer; Cracknell, 2008; Nag; LeMoigne; Weck, 2014; Lal et al, 2017; Wekerle et al, 2017).

Nota-se que o padrão Cubesat não cria, teoricamente, amarras com relação a massa, mas com a estrutura modular cúbica e seus possíveis arranjos multicúbicos, sendo um subconjunto dos nanossatélites. Assim, Cubesats com massas superiores à categoria de nanossatélites são possíveis, como no caso de exemplares 12U ou superiores, conforme a Tabela 12. Arranjos até 6U estão dentro da faixa de massa de 1 kg a 10 kg para nanossatélites. No entanto, o Tipo 12U já pode atingir massa aproximada de 15 kg, devendo ser mais propriamente classificado como microssatélite (10 kg a 100 kg), ressalvando que essa massa estimada para um 12U pode ser menor que 10 kg, a depender da missão e dos componentes utilizados no desenvolvimento.

Tabela 12. Tipos, massa, categorias e volumes de nanossatélites do tipo cubesat, adaptado (Nag; LeMoigne; Weck, 2014).

Tipo	Volume (cm x cm x cm)	Massa (Kg)	Categoria
12U	~10x40x30	~15	Micro
6U	~10x20x30	~10	Nano
3U	~10x10x30	3,99	Nano
2U	~10x10x20	2	Nano
1U	~10x10x10	1,33	Nano

2.3 Resumo das classificações estudadas

A classificação de faixas de categorias em potências de 10 do quilograma facilita a definição de classes com limites inferiores bem claros. Além disso, verificou-se que a nomenclatura da classe deve estar dissociada da definição de tamanho / porte do satélite, dado que o termo pequeno (*small*) pode se referir a diversas classes e faixas de massa, por exemplo. No entanto, se para satélites menores que 1.000 kg existem classes mais bem definidas, já para os satélites com massas superiores a 1.000 kg todos são classificados como grandes, inexistindo categorias complementares.

De um modo geral, foram estudadas categorias que apresentam divergências tanto em nomenclatura de classes de satélites, quanto em valores para as faixas de massas dessas classes: ESA e Astrium (Nag; LeMoigne; Weck, 2014); ITU (ITU, 2014); FAA (FAA, 2015); NASA e ROSCOSMOS (Volynskaya; Kasyanov, 2016); Wekerle et al (2017); e FAA (2018). É relevante destacar que, apesar de não adotar o padrão de faixas de massas para as classes em potência de 10, a classificação FAA (2018) adiciona classes para satélites com massas superiores aos 1.000 kg. A Tabela 13 apresenta um resumo dessas classificações e a Tabela 14 sumariza o arranjo de classes das principais classificações, considerando as características comuns, além de apartar a nomenclatura de classes do intervalo de massas e do atributo tamanho.

Tabela 13. Comparação de classificações de satélites por ordem de intervalo de massa.

Classes	**Sweeting (1991)**	**Kramer e Cracknell (2008)**	**FAA (2018)**
	Faixas de Massas de Satélites (kg)		
Extrapesados	-	-	> 7.000
Pesados	-	-	5.401 - 7.000
Grandes satélites	> 1.000	> 1.000	4.201 – 5.400
Intermediários	-	-	2.501 – 4.200
Médios	-	-	1.201 – 2.500
Pequenos satélites	500 – 1.000	-	601 – 1.200
Minissatélites	100 – 500	100 – 1.000	201 – 600
Microssatélites	10 – 100	10 – 100	11 – 200
Nanossatélites	< 10	1 – 10	1,1 – 10
Picossatélites	-	0,1 – 1	0,11 – 1
Femtossatélites	-	0,01 – 0,1	0,01 – 0,1

Assim, do que foi visto até então é possível sumarizar as principais classificações de pequenos satélites em categorias preliminares conforme a Tabela 14. Essa tabela segue quase que integralmente o padrão de classes e massas estabelecido por Kramer e Cracknell (2008), adicionando uma coluna para definição do tamanho (ou porte). A partir da contribuição de outras classificações, satélites pequenos foram definidos com massa inferior a 500 kg e superior a 1 kg, o que corresponde às classes de Mini, Micro e Nanossatélites. A classe de Minissatélites possui ainda uma definição de tamanho como média, para satélites com massa superior a 500 kg e inferior a 1.000 kg. As classes de Pico e de Femtossatélites também não mudaram suas faixas de valores de massa em comparação com o referencial, mas foram respectivamente denominadas como muito e ultrapequenas, em termos de tamanho.

Para valores de massa da classe Satélite foram associados os tamanhos muito grande, grande e médio para valores entre 1.000 kg e 3.000, 3.000 kg e 10.000 kg e acima de 10.000 kg, respectivamente. Mesmo seguindo o padrão de divisão das classes por potência de 10 com relação a massa, faz sentido propor classes especiais para satélites e outros dispositivos espaciais de massas superiores à tonelada, de forma a melhor agrupá-los conforme seu tamanho. Isso significa dizer que a Estação Espacial Internacional (*International Space Station* – ISS), que possui massa na ordem de 400.000 kg, ou a nova estação espacial chinesa, na faixa de 60.000 kg, poderiam pertencer a classes distintas, o que não reflete a ordem de complexidade da capacidade de transporte ao espaço de tais equipamentos, proporcional ao tamanho de cada um.

Por serem variedades de nanossatélites, um enquadramento de cubesats foi feito segundo essa denominação (1 a ~10 kg), não sendo uma classe em si, mas fazendo parte de classes definidas por massa e tamanho, podendo ser identificados como microssatélites, caso possuam massa superior a 10 kg.

Cabe destacar que foram retirados da nomenclatura da classe e do tamanho qualquer termo associado à massa como pesado (*heavy*) ou leve (*light*) como forma de dissociar esses adjetivos dos atributos mencionados.

Tabela 14. Sumário das características de classes, de massa e de tamanho com base nas classificações estudadas.

Classe	Massa (kg)	Tamanho
Satélite	> 10.000	Muito grande
	[3.000 – 10.000[	Grande
	[1.000 – 3.000[	Médio
Mini	[500 – 1.000[	
	[100 – 500[	Pequeno
Micro	[10 – 100[	
Nano	[1 – 10[	
Pico	[0,1 – 1[	Muito pequeno
Femto	[0,01 – 0,1[	Ultrapequeno

Outra forma de definir a ordem de grandeza de tais dispositivos pode ser através de uma orientação a partir da capacidade de carga dos principais veículos lançadores operacionais e os que estão presentemente em projeto e testes. Tendo em vista que satélites de massa superiores a uma tonelada importam em veículos lançadores maiores e de maior potência, é preciso conhecer os perfis de veículos lançadores existentes e em desenvolvimento para se definir melhor as categorias e faixas de valores de massas para cargas úteis.

3. RELAÇÃO COM A CAPACIDADE DE CARGA DE VEÍCULOS LANÇADORES

Uma das principais métricas para determinar os requisitos de lançamento é a massa do objeto que vai ser colocado em órbita pelo veículo lançador (FAA, 2015). A capacidade de lançamento deve ser levada em consideração não só no planejamento de novas missões, como também na própria classificação de tamanho e massa dos satélites que devem ser lançados. Classes baseadas em intervalos de massas de satélite são usadas para analisar os desenvolvimentos de satélites e a demanda de lançamento.

Não obstante a redução no tamanho dos satélites por conta da miniaturização, os veículos lançadores passaram, nos últimos anos, por um aumento de sua capacidade de carga. Esse aumento da carga útil é motivado não só pela necessidade de reduzir o valor do custo médio do quilograma de transporte ao espaço, mas, também, pelas novas demandas oriundas do ressurgimento de iniciativas de exploração da Lua, de Marte e até mineração de asteroides por empresas privadas. Com a atual revolução promovida por empresas privadas de grande capacidade tecnológica, um mercado de veículos lançadores se estabeleceu. Tal tendência de oferta de lançamento crescerá ainda mais nos próximos anos, enquanto que o custo operacional de lançamento seguirá o caminho inverso (Weinzierl, 2018).

Assim como a classificação de satélites, existem diversas classificações para os veículos lançadores considerando a sua capacidade de carga útil. A FAA (FAA, 2018) apresenta, por exemplo, uma classificação muito sucinta pela capacidade de carga útil, com duas categorias, considerando a altitude de inserção em uma órbita baixa de 185 km (*Low Eath Orbit* - LEO), com inclinação de 28,5º, conforme a Tabela 15. Essa classificação se resume a duas classes associados a um limiar de carga de 2,268 kg (5,000 lb). Conforme se

posicionem em relação a esse liminar são chamados Médios pesados (*Medium – Heavy*) ou Pequenos (*Small*).

Tabela 15. Classificação para veículos lançadores segundo FAA (2018).

Classe de Veículos Lançadores	Massa da Carga Útil (kg)
Médio - Pesado	> 2.268
Pequeno	< 2.268

O documento NASA (2010) classifica os veículos lançadores em quatro categorias, conforme a Tabela 16. Essa classificação prevê mais classes que a da FAA (2018), subdividindo a categoria dos Médio – Pesados daquela classificação em três classes: Médios, Pesados e Superpesados (*Super Heavy*). A classe de Pequenos veículos é muito similar nas duas classificações. Por outro lado, por ser mais antiga, não existe nessa última uma classe específica uma subdivisão para representar microlançadores.

Tabela 16 Classificação para veículos lançadores segundo a NASA, adaptado (NASA, 2010).

Classe de Veículos Lançadores	Massa da Carga Útil (kg)
Super pesado	> 50.000
Pesado	20.000 – 50.000
Médio	2.000 – 20.000
Pequeno	< 2.000

Em Wekerle et al (2017) é apresentada uma classificação similar a da NASA (2010) no que diz respeito as classes Pequenos e Médios veículos. Entretanto, apesar de já contemplar uma classe para microlançadores (< 500 kg), não contempla a classe Super pesados (*Super Heavy*) para veículos acima de 50.000 kg, previstos em NASA (2010), os quais deveriam ser classificados como *Heavy LV*, para veículos com capacidade de carga maior que 20.000 kg (Tabela 17).

A fim de ilustrar com números essas classificações, foi realizado um levantamento e ordenação da capacidade de carga de alguns veículos lançadores em atividade (ou os que estão aptos para tal), na Tabela 18. Do mesmo modo, um levantamento e ordenação da capacidade estimada de carga de projetos de alguns veículos lançadores (ou os que estão em processo de validação para entrar em atividade) são mostrados na Tabela 19. Em ambos os caso, foi considerado o lançamento com relação à referência de altitude da órbita da FAA (FAA, 2018).

Tabela 17 Classificação para veículos lançadores segundo Wekerle, adaptado (Wekerle et al, 2017).

Classe de Veículos Lançadores	Massa da Carga Útil (kg)
Pesado	> 20.000
Médio	2.001 – 20.000
Pequeno	501 – 2.000
Micro	< 500

Tabela 18. Exemplos de veículos lançadores ativos e suas cargas correspondentes, ordenados pela capacidade de carga útil até LEO[1] e classificação segundo Wekerle et al (2017) e NASA (2010).

Veículos Lançadores	País / Fabricante	Massa para Injecção em LEO (kg)	Classificações	
			Wekerle et al (2017)	NASA (2010)
Electron	Nova Zelândia / Rocket Lab	225	Micro	Small
Epsilon	Japão / IHI	1.200	Small	Small
Strela	Rússia / Khrunichev	1.400	Small	Small
Minotaur-C (Taurus)	EUA / Orbital	1.450	Small	Small
Minotaur IV	EUA / Orbital	1.735	Small	Small
PSLV-XL	Índia / ISRO	3,800	Medium	Medium
Long March 2D	China / SAST	4,000	Medium	Medium
Long March 4C	China / SAST	4,200	Medium	Medium
GSLV Mk II	Índia / ISRO	5.000	Medium	Medium
Antares 230	EUA / Orbital ATK	6.500	Medium	Medium
Zenit-3SL	Ucrânia / RKK Energia	7.000	Medium	Medium
Soyuz-2.1b (Baikonour)	Rússia / TsSKB-Progress	8.200	Medium	Medium
Long March 2F	China / CALT /	8.600	Medium	Medium
Soyuz ST-B (Kourou)	Rússia / TsSKB-Progress	9.000	Medium	Medium
GSLV Mk III	Índia / ISRO	10.000	Medium	Medium
H-IIA 202	Japão / Mitsubishi	10.000	Medium	Medium
Long March 3B/E	China / CALT	11.500	Medium	Medium
Atlas V 521	EUA / ULA	13.300	Medium	Medium
Long March 7	China / CALT	13.500	Medium	Medium
Delta IV M+(5,4)	EUA / ULA	14.140	Medium	Medium
H-IIB	Japão / Mitsubishi	16.500	Medium	Medium
Atlas V 552	EUA / ULA	20.520	Heavy	Heavy
Ariane 5 ES	Europa / EADS Astrium	21.000	Heavy	Heavy
Falcon 9 Full Thrust	EUA / SpaceX	22.800	Heavy	Heavy
Proton-M / M+	Rússia / Khrunichev	23.000	Heavy	Heavy
Long March 5	China / CALT	25.000	Heavy	Heavy
Delta IV Heavy	EUA / ULA	28.790	Heavy	Heavy

[1] Dados levantados e compilados pelos autores a partir de diversas fontes.

Tabela 19 Estimativas de capacidade de carga em diversos projetos de LVs, ordenadas pela capacidade de carga útil até LEO[1] e classificação segundo Wekerle et al (2017) e NASA (2010).

Veículos Lançadores	**País / Fabricante**	**Massa para Injecção em LEO (kg)**	**Classificações**	
			Wekerle et al (2017)	NASA (2010)
Ariane Q@TS	Europa / ArianeGroup	100	Micro	Small
Orbex Prime	Espanha - Reino Unido / Deimos - Orbex	150	Micro	Small
VLM-1	Brazil / IAE - Avibrás	150	Micro	Small
Arion 2	Espanha / PLD Space	300	Micro	Small
KSLV-2	Coreia do Sul / KARI	1.500	Small	Small
Naga-L	China / CALT	1.590	Small	Small
Vega E	Europa / ESA / ASI	2.000	Small	Small
Vega C	Europa / ESA / ASI	2.300	Medium	Medium
Angara 1.2	Rússia / Khrunichev	3.800	Medium	Medium
Ariane 6 A62	Europa / ArianeGroup	10.350	Medium	Medium
Proton Light	Rússia / Khrunichev	16.000	Medium	Medium
Ariane 6 A64	Europa / ArianeGroup	21.650	Heavy	Heavy
Proton Medium	Rússia / Khrunichev	23.000	Heavy	Heavy
Vulcan 561 with ACES	EUA / ULA	35.000	Heavy	Heavy
New Glenn (2 Stages)	EUA / Blue Origin	45.000	Heavy	Heavy
Falcon Heavy	EUA / SpaceX	63.800	Heavy	Super heavy
SLS Block 1	EUA / NASA / Boeing(core) / Orbital ATK(SRBs)	95.000	Heavy	Super heavy
SLS Block 1B with EUS	EUA / NASA / Boeing(core) / Orbital ATK(SRBs)	105.000	Heavy	Super heavy
SLS Block 2 with EUS	EUA / NASA / Boeing	130.000	Heavy	Super heavy
Long March 9	China / CALT	140.000	Heavy	Super heavy
Big Falcon Rocket (BFR)	EUA / SpaceX	150.000	Heavy	Super heavy
Interplanetary Transport System	EUA / SpaceX / NASA	300.000 / 550.000	Heavy	Super heavy

A Tabela 20 apresenta um resumo comparativo das classificações de veículos lançadores pela capacidade de cargas úteis referenciadas.

Tabela 20. Comparação de classificações de LVs por ordem de intervalo de massa de PL.

Classes de VL	**FAA (2015)**	**NASA (2010)**	**Wekerle et al (2017)**
	Faixas de **Massa**s de PL (kg)		
Superpesados	-	> 50.000	-
Pesados	-	20.000 – 50.000	> 20.000
Médio - pesados	> 2.268	-	-
Médios	-	2.000 – 20.000	2.001 – 20.000
Pequenos	< 2.268	< 2.000	501 – 2.000
Micros	-	-	< 500

Também foram analisadas as capacidades de PLs dos principais LVs atuais e de projetos em andamento, os quais preveem um aumento de capacidade de PL para massas da ordem de 100.000 kg.

4. PROPOSTA DE TAXONOMIA UNIFICADA DE SATÉLITES POR MASSA E TAMANHO

Levando-se em conta a análise feita a partir da literatura, a Tabela 21 representa a proposta realizada que adiciona novas classes de satélites e as organiza, considerando massas em potências de 10. Também separa o conceito de tamanho / porte como um atributo distinto da nomenclatura da classe, que vão de ultragrandes a ultrapequenos, passando pelos termos mais comuns vistos nas classificações anteriores como: grande, médio e pequeno.

Tabela 21. Proposta de taxonomia unificada para satélites, conforme a massa e o tamanho.

#	Classe	Massa Classe (kg)	Tamanho
1	Hectossatélite	$\geq$ 100.000	Ultragrande
2	Decassatélite	[10.000 , 100.000[	Muito grande
3	Prótipossatélite	[3.000 , 10.000[	Grande
		[1.000 , 3.000[	Médio
4	Minissatélite	[500 , 1.000[	
		[100 , 500[	Pequeno
5	Microssatélite	[10 , 100[	
6	Nanossatélite	[1 , 10[	
7	Picossatélite	[0,1 , 1[	Muito Pequeno
8	Femtossatélite	< 0,1	Ultrapequeno

As classes definidas na proposta de taxonomia são as seguintes:

- Classe 1 – Hectossatélite: Com massa igual ou superior a 100 toneladas, esses dispositivos são classificados em tamanho / porte como ultra-grandes (*Ultra Large - UL*). Um exemplo de "hectosat" é a Estação Espacial Internacional *(International Space Station* – ISS), com uma massa de cerca de 420.000 kg;
- Classe 2 – Decassatélite: Comporta engenhos espaciais entre 10 e 100 toneladas, os *decasats* são classificados em tamanho / porte como muito grandes (*Very Large - VL*). O telescópio espacial Hubble e os satélites militares americanos USA-182 e USA-245 são exemplos de dispositivos nessa categoria;
- Classe 3 – Prótipossatélite: Engloba satélites de 1 e 10 toneladas. Do grego "prótypos" (πρότυπο) significa "padrão" e considera a média de massa de todos os satélites ativos (~ 1,600 kg) que se encontram na faixa de valores. Também foi levada em conta a definição desse nome, ao se considerar a média de massa de satélites comerciais e geoestacionários de comunicação (cerca de 62% do total de satélite ativos em órbita), que possuem valor médio de massa entre 3.500 a 5.200 kg. Os "protyposats" são classificados em tamanho / porte como grandes (*Large - L*) para massas de 3.000 a 10.000 e médios para massas de 1.000 a 3.000. O SGDC-1, o CBERS-4A, o GOES-R e o INMARSAT IV-A F4 são exemplos desta classe;
- Classe 4 – Minissatélite: Comporta satélites entre 100 e 1.000 kg. Os *minisats* são classificados em tamanho / porte como médios (*Medium - M*) ou como pequenos (*small*), caso tenham massa superior ou inferior ou igual a 500 kg. Os satélites SDC-1/2, o NovaSAR-1 e o Zhangheng-1 são exemplos dessa classe;
- Classe 5 – Microssatélite: Define satélites com massa igual ou superior a 10 kg e inferior a 100 kg. Todos os satélites dessa categoria são classificados em tamanho / porte como pequenos (*smallsats*). Essa categoria também engloba cubesats 12U ou com mais cubos, cujas massas sejam iguais ou superiores a 10 kg, assim como o cubesat chinês "Ao Xiang Star". São exemplos de microssatélites a

constelação de satélites sauditas Saudicomsat1/2/3/4/5/6/7 (11 a 13kg) e o satélite indiano Youthsat (92 kg);

- Classe 6 – Nanossatélite: Define satélites com massa igual ou superior a 1 kg e inferior a 10 kg. Nessa classe encontram-se os *cubesats* 1U a 12U (com massa inferior a 10 kg), além de outros satélites com massa nessa faixa de valores, mas em diversos formatos diferentes dos *cubesats*. São exemplos nacionais dessa classe o NanosatC-Br1 e SERPENS-I;
- Classe 7 – Picossatélite: É a classe para dispositivos orbitais com massa entre 100 gramas e 1 kg e são considerados em termos de porte como Muito Pequenos (*Very Small - VS*). São exemplos dessa classe o COMPASS-1 e o StudSat; e
- Classe 8 – Femtossatélite: É a classe para equipamentos com massa entre 10 a 100 gramas e são considerados como Ultrapequenos (*Ultra small - US*) pelo tamanho. O WikiSat e o EPSCSat são exemplos de femtossatélites.

Por ser um trabalho parcial, tem-se em mente que seria interessante a subdivisão das classes em subclasses para agrupar satélites com características mais próximas, pois assim como satélites com massas na faixa dos 1.000 kg possuem características diferentes dos próximos aos 10.000 kg, mesmo sendo prótypossatélites, o mesmo acontece com espaçonaves com 10 kg e outras próximas aos 100 kg, ainda que ambas sejam microssatélites.

Apesar de estar voltada para a classificação de satélites, vislumbra-se que a presente proposta pode ser empregada para os mais diversos dispositivos como sondas espaciais e espaçonaves. Além disso, pode servir como base para uma melhor padronização da classificação dos LVs, dado que as atuais agrupam em uma mesma classe LVs com diferenças da ordem de 10 vezes, entre suas capacidades de PL. Assim a proposta permitirá a inclusão de novas subclasses, principalmente com veículos de maior porte como resultado de avanços tecnológicos e maior inclusão no espaço.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do estudo bibliográfico e comparação das principais classificações de satélites pelas suas massas, o presente artigo propõe uma taxonomia unificada para satélites com base na massa e tamanho, a partir das classificações anteriores. Tal esquema observa, também, as tendências oriundas do intenso progresso tecnológico na área espacial vivido atualmente.

Assim, foi possível definir 08 classes de satélites associadas às faixas de valores de massa, bem como apartar destas classes 07 categorias de tamanho (porte) de tais dispositivos, desde massas da ordem de milhares de toneladas a frações do grama, para dispositivos ultragrandes a ultrapequenos. Desse modo, é possível se classificar / categorizar, de forma independente, os dispositivos espaciais, tanto pela sua massa, quanto pelo seu tamanho.

Em particular, os avanços tecnológicos de miniaturização expandiram a necessidade de classificação para classes de menor tamanho. Isso se observou depois dos esforços iniciais de satelitização, quando pequenos engenhos foram colocados em órbita mais como demonstradores de conceito. A atual revolução da microeletrônica permite a concepção de satélites até mesmo de dimensões de um *chip*, o que motiva as classes *pico* e *femto*.

Do lado oposto da escala de massa, o estudo apontou a necessidade de criação de subclasses de maior massa, um território ainda pouco explorado nos esforços de classificação. Não se inclui no esquema proposto a classificação de engenhos ainda muito maiores, tal como aqueles propostos para missões interestelares, que seriam do tipo mega (Long, 2011). Obviamente que a proposta também traz em seu bojo a possibilidade de expansão para essas classes de engenhos maiores, através da mesma sistemática de subdivisões.

Conclui-se assim que esse esquema tanto propõe novas classes para uma futura aplicação classificativa como também estabelece uma direção ou sistemática de seu uso que é a principal princípio a ser adotado em qualquer classificação futura. Essa classificação não pode depender de objetivos particulares ligados a agências, empresas ou governos, mas deve acomodar classes em conformidade com o avanço tecnológico. O esquema, por exemplo, aplica a quantização de volume estabelecida para cubesats (que é um importante motivador tecnológico) para nanossatélites, ainda que esses não obedeçam ao critério de discretização originalmente proposto. Mesmo assim, caso o satélite tenha densidade tal que no volume de 12U ele tem massa superior a 10 kg, ele deve ser classificado como um minissatélite.

Diversos exemplos foram dados como para cada uma das classes. A classificação para satélites maiores foi motivada principalmente pelas propostas recentes de novos lançadores, que tanto podem servir para lançamentos múltiplos como para o transporte de grandes estruturas. Este trabalho buscou explicitar a necessidade de se levar em consideração o potencial dos transportes ao espaço, além da dimensão dos satélites. Um refinamento da taxonomia aqui proposta pode ser feito ao se considerar a densidade do dispositivo, entendida como a razão entre a massa e tamanho, permitindo a definição de subclasses dentro de classes com maior precisão, o que pode ser particularmente importante para os engenhos espaciais de maior massa, já que satélites pequenos teriam densidade limitada ao grau de acondicionamento "ótimo" dos circuitos eletrônicos.

Como trabalhos futuros vislumbra-se o refinamento da presente taxonomia, com novas classes e /ou o fracionamento em subclasses das classes por massa apresentadas até então, bem como a definição de novas categorias por tamanho, tudo de modo a melhor representar e agrupar dispositivos com características semelhantes.

6. REFERÊNCIAS

Brownlee, D. E., Olszewski, E., Wheelock, M, 1982. *A working taxonomy for micrometeorites*. In Lunar and Planetary Science Conference (Vol. 13, pp. 71-72).

Federal Aviation Administration – FAA, 2015. *2015 Commercial Space Transportation Forecasts*. FAA Commercial Space Transportation (AST) and the Commercial Space Transportation Advisory Committee (COMSTAC). Washington (D.C.), United States of America.

Federal Aviation Administration – FAA, 2018. *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018*. FAA Commercial Space Transportation (AST). Washington (D.C.), United States of América.

International Telecommunication Union - ITU, 2014. *Characteristics, definitions and spectrum requirements of nanosatellites and picosatellites, as well as systems composed of such satellites*. Report ITU-R SA.2312-0. Geneva, Switzerland.

Konecny, G., 2004. *Small Satellites – a tool for earth observation?* In: ISPRS Congress Istanbul 2004. pp. 580–582.

Kramer, H. J., Cracknell, A. P., 2008. *An overview of small satellites in remote sensing*. International Journal of Remote Sensing, 29:15, pp. 4285-4337, DOI: 10.1080/01431160801914952.

Levison, H. F., 1996. *Comet taxonomy*. In Completing the Inventory of the Solar System (Vol. 107, pp. 173-191).

Long, K. F., 2011. *Project Icarus: The first unmanned interstellar mission, robotic expansion & technological growth*. Journal of the British Interplanetary Society, 64(4), 107.

Nag, S., LeMoigne, J., De Weck, O., 2014. *Cost and Risk Analysis of Small Satellite Constellations for Earth Observation*. IEEE Aerospace Conference Proceedings. March 2014. DOI: 10.1109/AERO. 2014.6836396.

Nason, I., Puig-Suari, J., Twiggs, R., 2002. *Development of a family of picosatellite deployers based on the CubeSat standard*. In Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE(Vol. 1, pp. 1-1). IEEE.

National Aeronautics and Space Administration – NASA, 2010. *DRAFT Launch Propulsion Systems Roadmap - Technology Area 01*. (November 2010). Disponível em:< https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ 2015_nasa_technology_roadmaps_ta_1_launch_propulsion_systems_final.pdf >. Último acesso: 22/07/2019.

National Aeronautics and Space Administration – NASA, 2015. *What are SmallSats and CubeSats?* (february 2015, n. d.). Disponível em:<https://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats>. Último acesso: 22/07/2019.

Schrogl, K. U., 1998. *Basic space science at UNISPACE III 1999*. United Nations Programme on Space Applications, 9, 141.

Shenhar, A. J., Bonen, Z., 1997. *The new taxonomy of systems: Toward an adaptive systems engineering framework*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 27(2), 137-145.

Shenhar, A. J., Dvir, D., 1996. *Toward a typological theory of project management*. Research policy, 25(4), 607-632.

Sweeting, M. N., 1992. *UoSAT microsatellite missions*. Electronics & Communication Engineering Journal, vol. 4, no. 3, pp. 141-150, June 1992. DOI: 10.1049/ecej:19920024.

Simpson, G. G., 1961. *Principles of animal taxonomy*. Columbia University Press, New York.

Swartwout, M., 2013. *The first one hundred cubesats: A statistical look*. Journal of Small Satellites, 2(2), 213-233.

Tholen, D. J., Barucci, M. A., 1989. *Asteroid taxonomy*. In Asteroids II (pp. 298-315).

Volynskaya, O. A., Kasyanov, R. A., 2016. *Lauching Numerous Small Satellites – A Flourishing Business? The Case of the Russian Federation (in Small Satellites: Regulatory Challenges and Changes)*. Ed. Marboe, I. Brill – Njihoff, Leiden / Boston.

Xue, Y., Li, Y., Guang, J., Zhang, X. and Guo, J., 2008. *Small satellite remote sensing and applications - history, current and future*, International Journal of Remote Sensing, 29:15, 4339 —4372.

Wekerle, T.; Pessoa Filho, J. B.; Costa, L. E. V. L. da; Trabasso, L. G., 2017. *Status and Trends of Smallsats and Their Launch Vehicles - An Up-to-date Review*. Journal of Aerospace Technology and Management, 9(3), pp. 269-286.

Weinzierl, M. (2018). *Space, the Final Economic Frontier*. Journal of Economic Perspectives, 32(2), 173-92.

Wilding, L.P., Drees, L.R., 1983. *Spatial variability and pedology*. In: Wilding, L.P.; Smerck, N.E.; Hall, G.F. (Ed.). Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier, 1983. p.83-116. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)70599-3.

Winsor, M. P., 2009. *Taxonomy was the foundation of Darwin's evolution*. Taxon, 58(1), 43-49.