
Perigos Relacionados ao Transporte de Baterias de Metal e Íons de Lítio em Aeronaves de Passageiros e de Carga

Renato Crucello Passos¹, Paulo Fabrício Macário²

1 Doutor em Engenharia Mecânica Aeroespacial pela UNESP/FEG desde 2009, servidor da Gerência Geral de Certificação de Produto Aeronáutico – GGCP/SAR/ANAC, desde 2002, tendo trabalhado como engenheiro especialista em sistemas mecânicos na certificação do ERJ-170/190, no controle e vigilância da aeronavegabilidade continuada das aeronaves em operação no Brasil, responsável pelas instruções de operação e manutenção das aeronaves Phenom 100/300 e Legacy 500/550, atualmente trabalhando junto ao grupo de aeronaves experimentais e leves esportivas e de aprovação de embalagens para o transporte de artigos perigosos pelo modal aéreo.

2 Graduado em Engenharia Mecânica pela UNESP, servidor da Gerência Geral de Certificação de Produto Aeronáutico – GGCP, desde 2008. Trabalhou até 2014 como coordenador de programas na certificação de partes e componentes aeronáuticos, motores convencionais e a reação e com a atividade de certificação de embalagens para o transporte de artigos perigosos. Hoje atua nas áreas de Inspeção e Auditoria de empresas, na aceitação de Aeronaves Leves Esportivas e na certificação de embalagens. Representa ainda a ANAC junto a ICAO e a SAE, no grupo de trabalho G27 - SAE Standards Development Committee - Lithium Battery Packaging Performance.

RESUMO: Frente aos inúmeros incidentes ocorridos nos últimos anos relacionados ao transporte aéreo de baterias de lítio, as Autoridades de Aviação Civil, a Organização da Aviação Civil Internacional - OACI, juntamente com fabricantes de aeronaves, operadores aéreos, fabricantes de baterias, associação internacional de pilotos e Associação Internacional de Transporte Aéreo - IATA, têm se reunido em busca de uma solução na contenção dos riscos associados ao transporte de células/baterias de lítio na segurança de voo (ocorrência de explosão, emissão de eletrólitos, vapores superaquecidos, gases inflamáveis, fumaça tóxica, temperatura de queima elevada, entre outros.). Após diversos testes e análises sobre o comportamento dessas células/baterias verificou-se que ocorrência de um evento de falha com o superaquecimento (“*Thermal Runaway*”) das mesmas, em uma aeronave, segundo o critério de classificação de Risco descrito no Manual de Gerenciamento de Risco da ICAO, SMM, Doc 9859, é em termos de probabilidade/severidade, de frequência ocasional e consequência catastrófica, o que é inaceitável do ponto de vista da segurança da aviação. A falha simples de uma única célula/bateria, (item não relacionado ao projeto da aeronave e sua operação) pode desencadear eventos em série que têm alta chance de evoluir para um evento catastrófico, visto que todos os sistemas de supressão de fogo atualmente existentes nas aeronaves certificadas não são capazes de conter o fogo gerado por células/baterias de metais/íons de lítio em caso de superaquecimento ocasionado por defeitos de fabricação, mal funcionamento ou fogo externo envolvendo as mesmas. Não existe uma segunda linha de proteção, há apenas o sistema interno da própria célula/bateria. As embalagens padrão ONU atualmente empregadas e especificadas para o transporte deste tipo de material são ineficientes na contenção do risco em caso de fogo, geração de gases tóxicos e atmosfera explosiva (quando confinadas), que são eventos decorrente da sua falha. Fato este, que levou em 2015, ao banimento/proibição do transporte de células e baterias de metal de lítio e em 2016 a proibição se estendeu para as de íons de lítio quando transportadas isoladamente (não instaladas em equipamentos) em aeronaves de passageiro. Este artigo visa apresentar os principais riscos conhecidos associados ao transporte de células/baterias de lítio, assim como alguns dos estudos que têm sido realizados para mitigação dos riscos em vários níveis pela combinação de barreiras de proteção, que envolvem ações mitigatórias: no sistema de supressão de fogo da aeronave, no projeto das baterias e nas embalagens, para que seja possível estabelecer um nível aceitável de segurança no transporte de células/baterias de lítio.

Palavras Chave: Célula. Bateria. Lítio. Estado de Carga. Fogo. Superaquecimento. Fuga Térmica. Risco.

Dangers Related to the Transport of Metal and Lithium Ion Batteries in Passenger and Cargo Aircraft

ABSTRACT: In view of the numerous incidents in recent years related to air transport of lithium batteries, the Civil Aviation Authorities, the International Civil Aviation Organization (ICAO), together with aircraft manufacturers, air operators, battery manufacturers, International Air Transport Association (IATA) have been meeting in search of a solution to contain the risks associated with the transport of lithium cells / batteries in flight safety (occurrence of explosion, emission of electrolytes, superheated vapours, flammable gases, toxic smoke, high burning temperature, etc.). After several tests and analyses on the behaviour of these cells / batteries it was verified that a thermal runaway event occurred in an aircraft and, according to the risk classification criteria described in the ICAO Doc 9859 Safety Management Manual (SMM), in terms of probability / severity, it is of occasional frequency and catastrophic consequence, which is unacceptable from the point of view of aviation safety. The simple failure of a single battery cell (item unrelated to aircraft design and operation) can trigger serial events that have a high chance of evolving into a catastrophic event, as all fire suppression systems on board of currently certified aircraft are not capable of containing fire generated by cells / batteries of metals / lithium ions in case of overheating caused by manufacturing defects, malfunctions or external fire involving them. There is no second line of protection, there is only the internal system of the cell

itself. The UN standard package currently used and specified for the transport of this material is ineffective in containing the risk in case of fire, generation of toxic gases and explosive atmosphere (when confined), which are events resulting of this failure. This fact led in 2015 to ban / forbid the transport of lithium metal cells and batteries and in 2016 the ban extended to lithium-ion batteries when transported alone (not installed in equipment) in passenger aircraft. Thus, this article aims to present the main known risks associated with the transportation of lithium cells, as well as some of the studies that have been carried out to mitigate risks at several levels by combining protection barriers, involving mitigation actions: in the system the design of the batteries and the packaging so that an acceptable level of safety can be established in the transport of lithium cells / batteries.

Key words: Batteries. Metals or Lithium Ions. Air Transport of Dangerous Goods. Flight Safety.

Citação: Passos, RC, Macário, PF. (2017) Perigos Relacionados ao Transporte de Baterias de Metal e Íons de Lítio em Aeronaves de Passageiros e de Carga. *Revista Conexão Sipaer*, Vol. 8, No. 2, pp. 149-160.

DEFINIÇÕES

Célula: Uma única unidade eletroquímica contida em um envolto, com um eletrodo positivo e um eletrodo negativo que apresenta um diferencial de tensão nos seus dois terminais e pode conter dispositivos de proteção.

Bateria: Duas ou mais células ou baterias que estão ligadas eletricamente em conjunto e equipadas com dispositivos necessários para utilização, por exemplo: envolto, terminais, marcação e dispositivos de proteção.

Estado de Carga (State of Charge - SOC): Estado de Carga de uma célula ou bateria é a percentagem da sua capacidade total de energia que ainda está disponível para descarregamento.

Fuga Térmica (Thermal Runaway): Aumento incontrolável da temperatura de uma célula ou bateria movida por processos exotérmicos (SAE J2464, 2009). A evidência de uma fuga térmica pode incluir um aumento rápido da temperatura, uma queda na tensão, liberação de vapor ou líquido, ruptura ou desmontagem da pilha, presença de fogo/chama.

1 INTRODUÇÃO

Motivado pelo crescente número de incidentes aéreos envolvendo baterias de lítio em aviões de carga e passageiros e o aumento significativo do volume transportado deste tipo de produto ao longo dos últimos anos devido à alta demanda mundial por este tipo de energia, as Autoridades de Aviação Civil, a Organização da Aviação Civil Internacional - OACI, juntamente com os fabricantes de aeronaves, os operadores aéreos, os fabricantes de baterias, a associação internacional de pilotos e a Associação Internacional de Transporte Aéreo – IATA se uniram através de grupos de trabalhos para elaborar estudos e desenvolver mecanismos a fim de identificar e reduzir o risco associado ao transporte aéreo de baterias de lítio.

Após alguns estudos e testes, observou-se uma enorme fragilidade no sistema de transporte atual. Foi constatado que as regras que disciplinam o transporte de artigos perigosos (ICAO, Doc 9284/AN905) não endereçavam de forma efetiva o real perigo relacionados a estes artigos. Por exemplo, havia a indicação ao piloto de um código ERG (Emergency Response Guidance) (ICAO, Doc 9481/AN928) totalmente inefetivo em caso de fogo envolvendo baterias de lítio. A regulamentação também negligenciava os requisitos de embalagem, identificação e acondicionamento de células/baterias de lítio com menos de 20 e 100 Wh (Watt-hour) respectivamente, onde não havia necessidade de utilizar uma embalagem padrão ONU, apresentar declaração de expedição de artigos perigosos e colar as etiquetas de risco de classe, ou seja, uma vez embarcado a tripulação não saberia identificar a existência deste tipo de células/baterias a bordo.

Um outro fator identificado foi a ineficiência da capacidade de supressão e extinção de fogo nos diversos tipos de compartimentos de cargas existentes nas aeronaves certificadas. Todos os testes executados durante as certificações levaram em conta as chamas geradas a partir de materiais a base de carbono ou materiais comumente encontrados nas bagagens (combustíveis, papéis, roupas, tecidos, etc.), não foi considerado o fogo gerado a partir da queima de substâncias metálicas.

Devido a este fato, vários testes foram realizados com inúmeros tipo de baterias e células isoladas, confinadas ou simulando a condição de transporte para verificar os efeitos das possíveis falhas e suas consequências. Após estes testes foi possível classificar a severidade do evento de falha de bateria com sobreaquecimento (Thermal Runaway) em uma aeronave, através da metodologia definida pelo manual da ICAO de Gerenciamento de Risco (ICAO, Doc 9859AN/474).

A seguir, nas figuras 1, 2, 3 e 4, é mostrado o extrato da metodologia usada para classificação da probabilidade e severidade com base no modelo descrito neste Manual.

<i>Likelihood</i>	<i>Meaning</i>	<i>Value</i>
Frequent	Likely to occur many times (has occurred frequently)	5
Occasional	Likely to occur sometimes (has occurred infrequently)	4
Remote	Unlikely to occur, but possible (has occurred rarely)	3
Improbable	Very unlikely to occur (not known to have occurred)	2
Extremely improbable	Almost inconceivable that the event will occur	1

Figura 1: Tabela de Probabilidade de Risco à Segurança.

Severity	Meaning	Value
Catastrophic	<ul style="list-style-type: none"> — Equipment destroyed — Multiple deaths 	A
Hazardous	<ul style="list-style-type: none"> — A large reduction in safety margins, physical distress or a workload such that the operators cannot be relied upon to perform their tasks accurately or completely — Serious injury — Major equipment damage 	B
Major	<ul style="list-style-type: none"> — A significant reduction in safety margins, a reduction in the ability of the operators to cope with adverse operating conditions as a result of an increase in workload or as a result of conditions impairing their efficiency — Serious incident — Injury to persons 	C
Minor	<ul style="list-style-type: none"> — Nuisance — Operating limitations — Use of emergency procedures — Minor incident 	D
Negligible	<ul style="list-style-type: none"> — Few consequences 	E

Figura 2: Tabela de Severidade do Risco à Segurança.

Risk probability	Risk severity				
	Catastrophic A	Hazardous B	Major C	Minor D	Negligible E
Frequent 5	5A	5B	5C	5D	5E
Occasional 4	4A	4B	4C	4D	4E
Remote 3	3A	3B	3C	3D	3E
Improbable 2	2A	2B	2C	2D	2E
Extremely improbable 1	1A	1B	1C	1D	1E

Figura 3: Matriz de Avaliação de Risco à Segurança.

Tolerability description	Assessed risk index	Suggested criteria
Intolerable region	5A, 5B, 5C, 4A, 4B, 3A	Unacceptable under the existing circumstances
Tolerable region	5D, 5E, 4C, 4D, 4E, 3B, 3C, 3D, 2A, 2B, 2C, 1A	Acceptable based on risk mitigation. It may require management decision.
Acceptable region	3E, 2D, 2E, 1B, 1C, 1D, 1E	Acceptable

Figura 4: Matriz de Tolerância ao Risco à Segurança.

Concluiu-se através da aplicação desta metodologia, que os eventos de fogo relacionados ao transporte de baterias lítio tem uma classificação de frequência ocasional e severidade catastrófica (Classificação 4A), visto que a falha simples de uma única

bateria/célula em meio a um carregamento de células/baterias tem potencial para desencadear eventos em série com elevada chance de evoluir para um evento catastrófico, o que não é aceitável em termos de gerenciamento de risco para a aviação regular.

Uma das bases para se obter a classificação de risco 4A foi o estudo do Federal Aviation Administration - FAA (Office of Security and Hazardous Materials Safety”, 2016), que utilizou-se dos dados disponibilizados pelas companhias aéreas de transporte de carga e de passageiros de eventos abordo envolvendo fumaça, fogo, calor extremo ou explosão de baterias de Metal e Íons de Lítio, onde foram listados em torno de 138 registros de ocorrências envolvendo estas baterias quando transportadas como carga ou bagagem no período de 20 de março de 1991 à 22 de dezembro de 2016. Esta lista não inclui os três principais acidentes com aeronaves aonde carregamentos de baterias de lítio estavam diretamente implicadas no resultado final, mas que não se provou ser a fonte originária do incêndio, que são: Asiana Airlines 747 perto da Coreia do Sul em 28 de julho de 2011; UPS 747 em Dubai, Emirados Árabes Unidos em 3 de setembro de 2010 e UPS DC-8 na Filadélfia, PA em 7 de fevereiro de 2006.

Considerando que os eventos que comprometem a segurança de voo, inerentes as baterias de lítio, não foram previstos diretamente nos projetos ou nos procedimentos para a operação das aeronaves, resolveu-se buscar formas de mitigação dos riscos envolvendo três frentes de atuação, que são: (1) redução dos riscos de falhas das células/baterias através de melhorias nos seus projetos, redução do SOC no transporte e implementação de mecanismos de segurança internos nas células/baterias; (2) desenvolvimento de norma para requisitos de performance para embalagem destinadas ao transporte das células/ baterias de lítio (SAE AS6413,2016); e (3) desenvolvimento de mecanismos de auxílio ao sistema de detecção e supressão de fogo dos compartimentos de carga das aeronaves.

Com isso, pretende-se adicionar barreiras de proteção efetivas para que o risco seja reduzido a um nível tolerável/aceitável.

2 BATERIAS DE LÍTIO

O Lítio é o mais leve de todos os metais usados em baterias, tem o maior potencial eletroquímico e fornece a maior densidade de energia por peso. Baterias recarregáveis que usam anodos de metal de lítio (eletrodos negativos) combinam duas importantes características que são a alta tensão e excelente capacidade de armazenamento por volume, resultando em alta densidade de energia. Vários tipos de materiais têm sido desenvolvidos de forma a melhorar a performance em termos de energia específica, ciclo de vida e segurança das baterias de lítio. O maior desafio tem sido em aliar a alta potência elétrica em pequenos volumes com condições extremas de uso sem que haja comprometimento da segurança. Nesse sentido, a estabilidade térmica é um ponto chave na segurança das células/baterias, pois diversas reações exotérmicas podem ocorrer dentro da célula/bateria quando sua temperatura aumenta muito rapidamente, razão pela qual a implementação de múltiplos mecanismos eficientes de dissipação de calor é tão importante na segurança e confiabilidade das mesmas. Quando uma bateria de íons de lítio está totalmente carregada, o eletrodo positivo (anodo) possui um forte poder de oxidação devido a formação de um óxido de transição metálico de lítio (por ex. LiMO_2 , $M = \text{Ni, Co, Mn}$), enquanto o eletrodo negativo (catodo) contém carbono litiado (carbolitiação), um material redutor muito forte. O eletrólito não aquoso habitualmente constituído por um solvente de carbonato orgânico e um sal de lítio tende a ser facilmente oxidado e reduzido. Deste modo, a própria célula é termodinamicamente instável e a compatibilidade da célula é obtida com a presença de películas de passivação na superfície do eletrodo (Binotto, 2011). Portanto, as baterias de íons de lítio são muito sensíveis ao abuso elétrico e representam riscos de incêndio significativos e possível explosão.

Essa sensibilidade a variância térmica é prevista em projeto e é verificada através de testes como estabilidade térmica, penetração/perfuração por prego, sobrecarga, curto-circuito e experimentos TGA (*Thermogravimetric Analysis*), DSC (*Differential Scanning Calorimeter*) e ARC (*Accelerating Rated Calorimeter*). A figura 5 abaixo ilustra o mecanismo de carga e descarga dessas células/baterias e a figura 6 a energia específica por densidade.

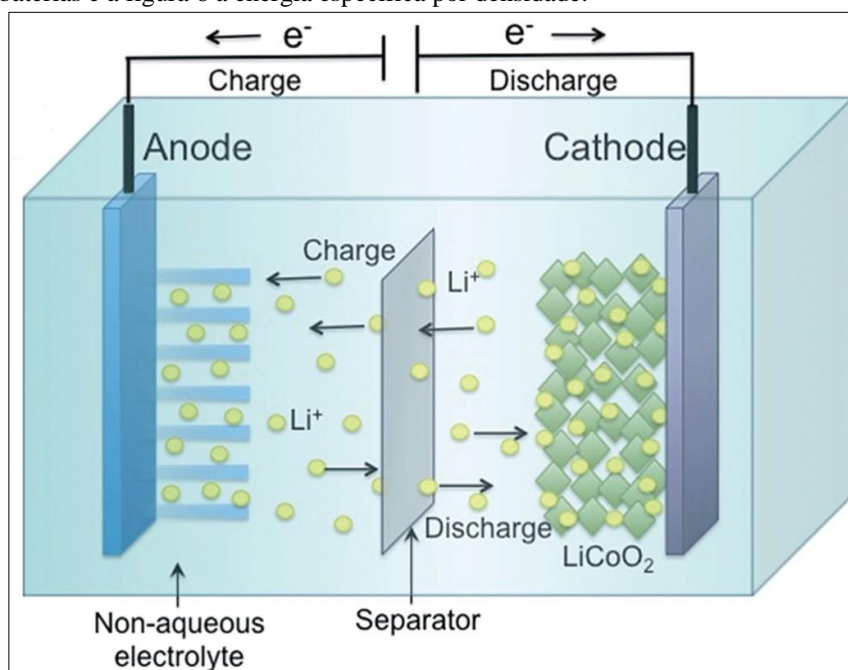


Figura 5: Mecanismo de Carga e Descarga de Célula de Íons de Lítio.

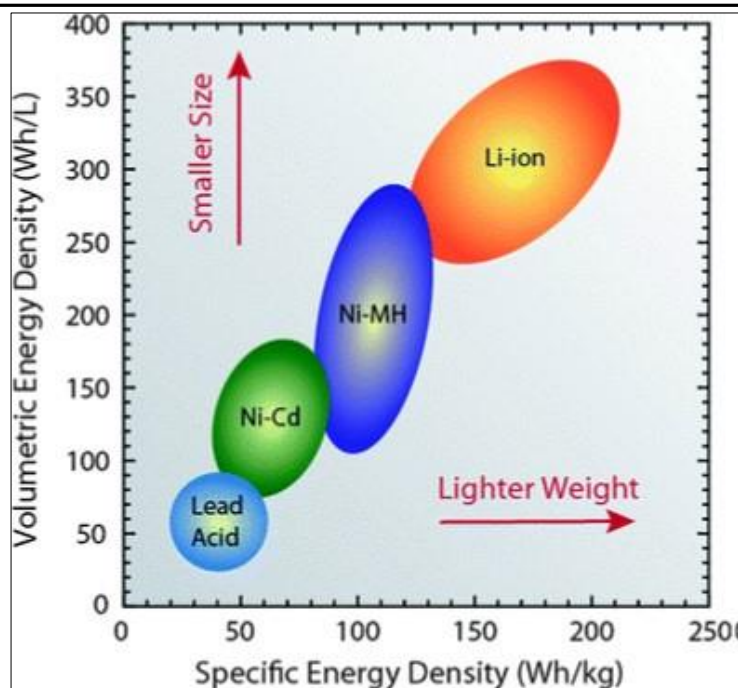


Figura 6: Representação Gráfica dos Diferentes Tipos de Bateria Quanto a Densidade de Energia por Peso e por Volume.

Testes desenvolvidos pelo FAA evidenciaram que a temperatura máxima que atinge uma bateria em processo de fuga térmica (*Thermal Runaway*) varia de acordo com sua composição. Por exemplo, uma bateria com composição LiFePO_4 chegou a uma temperatura de $357\text{ }^\circ\text{C}$; uma bateria com composição LiNiMnCoO_2 chegou a uma temperatura de $563\text{ }^\circ\text{C}$; e uma bateria com composição LiMnNi chegou a uma temperatura de $757\text{ }^\circ\text{C}$.

Algumas baterias de íon lítio quando entram em *Thermal Runaway* podem ter como consequência apenas uma combustão, outras podem iniciar com chamas e posteriormente explodir, outras podem explodir imediatamente sem que ocorra chamas (explosão seca). Ou seja, os testes evidenciam que não há um padrão exato para as consequências deste evento. As figuras 7 e 8 abaixo apresentam exemplos de baterias típicas de metal e íons de lítio.



Figura 7: Exemplos de Baterias de Metal de Lítio.



Figura 8: Exemplos de Baterias de Íons de Lítio.

3 MECANISMOS DE INICIAÇÃO

Face o perigo atual decorrente do transporte de baterias de Lítio, é importante o conhecimento dos principais mecanismos de iniciação que podem levar ao superaquecimento das células/baterias de lítio, para assim desenvolver barreiras de contenção e/ou mitigatórias. Sendo assim, pode-se citar como principais mecanismos: (1) superaquecimento decorrente de defeitos de fabricação, (2) mal funcionamento, (3) uso inadequado (sobrecarga/descarga rápida), (4) curto-circuito ou (5) fogo externo envolvendo as baterias.

Os componentes utilizados numa célula/bateria de íons de lítio são completamente estáveis até 80 °C. A partir de temperaturas mais elevadas, a camada de passivação denominada SEI (Interface Sólido-Eletrólito: uma fina camada não reativa de compostos de carbonatos, que isola a superfície dos eletrodos negativos de grafite), inicia uma dissolução progressiva no eletrólito, tornando-se significativa à 120-130 °C. Devido a este mecanismo, o eletrólito reage adicionalmente com a superfície menos protegida de grafite, gerando calor. Quando a temperatura atinge valores superiores a 200 °C é iniciando o processo de *Thermal Runaway*, com a reação do anodo de lítio com o catodo (Binotto, 2011). Este processo é exotérmico e não-controlável, gerando uma grande quantidade de energia (Hewson, 2015).

Abaixo, na figura 7, temos a estabilidade térmica dos componentes usados na bateria de íons de lítio (Recharge aisbl, 2013).

Temp (°C)	Reaction identified	Energy (J/g)	Comment
120-130	Passivation layer	200-350	Passive layer breaks Solubilisation starts below 100°C
130-140	PE separator melts	-90	Endothermic
160-170	PP separator melts	-190	Endothermic
200	Solvents-LiPF ₆	300	Slow kinetic
240-250	LiC ₆ + binder	300-500	
240-250	LiC ₆ + electrolyte	1000-1500	
200-230	Positive material decomposition	1000	O ₂ emission reacts with solvents

Figura 7: Estabilidade Térmica dos Componentes Usados na Bateria de Íons de Lítio.

Desta forma, o fenômeno de Thermal Runaway é fortemente dependente do tipo e natureza dos materiais usados na confecção da bateria como: materiais e tipos dos eletrodos, da natureza do material usado como eletrólito (sal, solvente, aditivos, etc.), do estado atual da carga contida na célula bateria e da origem do aumento da temperatura, que pode ser relacionada a processo de carga ou descarga rápida da bateria, sobrecarga (overcharge), curto circuito interno ou externo, fogo/aquecimento externo (Wang, 2012).

4 PRINCIPAIS RISCOS ASSOCIADOS AO TRANSPORTE DE BATERIAS DE LÍTIO

A seguir, são apresentados os principais riscos advindos do transporte de baterias de lítio, sendo que estes, geralmente se apresentam de forma combinada o que leva a necessidade de tratamento do evento de forma mais abrangente a fim de incluir barreiras de mitigação para cada um dos riscos envolvidos. Dentre os principais riscos podemos citar:

- **Penetração de fumaça na cabine:** é quando, em decorrência de fogo não controlado no compartimento de bagagem/carga, o sistema de ventilação e remoção de ar do compartimento não é suficiente para evitar que a cabine seja invadida por fumaça, podendo levar à intoxicação e perda de visibilidade dos instrumentos de voo. A figura 8, ilustra a quantidade de gás produzido durante um evento de “Thermal Runaway”, para células de em três estados de carga (SOC) diferentes. Para comparação, o volume relatado refere-se à pressão e temperatura padrão (26,6 °C, pressão atmosférica padrão).

State of Charge	Vented Gas Volume	Volume per Wh
50%	0.8 L / 0.2 Gal	0.10 L/Wh
100%	2.5 L / 0.7 Gal	0.33 L/Wh
150%	6.0 L / 1.6 Gal	0.78 L/Wh

Figura 8: Tabela com os Volumes de Gás Produzido por uma Célula de Volume de 0,014 L de 7,7 Wh à Pressão e Temperatura Padrão (Ponchaut, 2015).

- **Explosão:** Formação de atmosfera inflamável devido a quantidade de gases liberados provenientes do processo de superaquecimento das baterias de lítio aliado a presença de chamas e/ou fagulhas devido a presença de eletrólito superaquecido pode ocasionar na explosão do ambiente, podendo danificar a estrutura e sistemas das aeronaves levando a condições potencialmente inseguras e até perda da aeronave (descompressão explosiva);
- **Emissão de eletrólitos:** emissão de elementos com alto poder de calorífico, podendo causar fagulhas e chamas dos materiais próximos (cargas ou da própria aeronave);

- **Vapores superaquecidos:** é sabido que o processo de superaquecimento de baterias de lítio gera a formação de vapor superaquecidos o que podem atingir sistemas vitais da aeronave bem como contribuem para a propagação do fogo para outros itens transportados;
- **Gases inflamáveis:** emissão dos gases com alto potencial de inflamabilidade contribuindo para a propagação do fogo;
- **Fumaça tóxica:** é sabido que no processo de superaquecimento de baterias de lítio resultam, além de altíssimas temperaturas a emissão de fumaça tóxica. A tabela abaixo, resume a composição do gás para diferentes SOC. Com exceção do dióxido de carbono, todas as substâncias relatadas na figura 9 são inflamáveis. Além disso, o monóxido de carbono e alguns outros hidrocarbonetos não são apenas inflamáveis, mas também podem representar riscos significativos para a saúde.

Gas	50% SOC (%vol)	100% SOC (%vol)	150% SOC (%vol)	
Carbon Dioxide	32.3	30.0	20.9	
Carbon Monoxide	3.61	22.9	24.5	
Hydrogen	31.0	27.7	29.7	
Hydrocarbons	Methane	5.78	6.39	8.21
	Ethylene	5.57	2.19	10.8
	Ethane	2.75	1.16	1.32
	Propylene	8.16	4.52	0.013
	Propane	0.68	0.26	2.54
	Isobutane	0.41	0.20	0.13
	n-Butane	0.67	0.56	0.39
	Butenes	2.55	1.58	0.60
	Isopentane	0.45	0.07	0.036
	n-Pentane	1.94	0.73	0.30
	Hexanes +	4.94	2.32	8.21
	Benzene	0.14	0.11	0.33
	Toluene	0.061	0.018	0.052
Ethyl-benzene	0.009	0.002	0.003	

Figura 9: Tabela com a Composição de Gás Produzido por uma Célula de 0,014 L de 7,7 Wh a Pressão e Temperatura Padrão (Ponchaut, 2015).

- **Temperatura de queima elevada:** é sabido que no processo de superaquecimento de baterias de lítio podem resultar em altíssimas temperaturas (superiores a 900° C);
- **Consumo e vazamento do Halon:** atualmente os requisitos de segurança requerem para certificação de compartimentos de bagagem/carga um sistema de detecção e extinção/supressão de fogo. A maioria dos aviões de passageiros possuem compartimentos de carga classe C, que utilizam-se do gás Halon 1301 para supressão de fogo. Este sistema a base de Halon requer uma concentração mínima inicial de 5% de volume no compartimento de carga para efetivar a supressão das chamas e manutenção de uma concentração mínima de 3% durante o resto do voo para controle. No caso de incidentes de fogo envolvendo baterias de lítio, essa concentração de agente supressor previne a ignição dos eletrólitos e dos gases emitidos durante um evento envolvendo o superaquecimento de baterias de íons de lítio, porém não evita a propagação do calor e queima das mesmas quando internas, dentro de embalagens, que continuam a ocorrer. Desta forma, a temperatura interna no compartimento de carga continua a se elevar, e esta situação se torna crítica quando existe um carregamento considerável de baterias lítio no local. O aumento do volume dos gases, aumenta a taxa de escape/vazamento do gás Halon 1301, reduzindo sua efetividade e o tempo de proteção.

5 CLASSIFICAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DE CARGA E TIPOS DE CONTROLE E SUPRESSÃO DE FOGO

Na tabela 1, são mostrados os diversos tipos e quais as principais características dos compartimentos de bagagem/carga em uso pela aviação comercial, bem como as exigências mínimas regulamentares (RBAC/FAR 25.855 e 25.857) de sistemas de detecção, extinção de fogo e supressão de fumaça que por requisito de certificação devem possuir.

Em relação ao tempo de detecção do fogo, é crucial uma resposta rápida em casos de evento envolvendo baterias de lítio devido a rápida taxa de evolução do fogo. Observa-se que os atuais detectores de fumaça (ópticos) e de fogo (fio quente) não são capazes de detectar o fogo em tempo hábil, afim de prevenir a propagação do efeito do superaquecimento entre baterias devido ao confinamento das baterias dentro das embalagens ou containers.

Quanto ao uso do Halon 1301 como agente de Supressão de Fogo, foi demonstrado que o agente de supressão é efetivo apenas na supressão de parte do fogo gerado pelos eletrólitos provenientes de células/baterias de íons de lítio assim como da queima dos materiais da embalagem e adjacentes, porém não é efetivo na prevenção de uma explosão ocasionada por gases típicos gerados por baterias de lítio em Thermal Runaway nas concentrações para a qual o sistema Halon 1301 foi certificado, que é a de manter uma concentração mínima de 3 a 5 % de agente de supressão no compartimento de carga. O gás hidrogênio, que é gerado no processo, requer uma concentração muito alta Halon 1301 para prevenir uma explosão. Dos testes realizados de uma mistura de gases provenientes de uma bateria de íons de lítio, foi requerido no mínimo 10% de concentração de Halon 1301 para suprimir a explosão.

Quanto ao controle de ventilação, principalmente nos compartimentos de carga classe E, que dependem exclusivamente da descompressão da cabine com a eliminação do oxigênio. Testes demonstraram efetividade marginal no controle do fogo gerado por baterias de íons de lítio. Os mesmos testes não se mostraram efetivos em caso de evento envolvendo baterias de metal de lítio.

Assim, conclui-se que os tipos de sistemas de supressão de fogo atualmente existentes nas aeronaves certificadas não são capazes de conter o fogo gerado por baterias ou células de metais/íons de lítio. Não existe uma segunda linha de proteção além do sistema interno da própria bateria. As embalagens padrão ONU atualmente empregadas e especificadas para o transporte destas baterias são ineficientes na contenção do risco em caso de fogo, geração de gases tóxicos e atmosfera explosiva (quando confinadas), que são eventos decorrente da sua falha. Fato este, que levou em 2015, ao banimento/proibição do transporte de baterias de metal de lítio e em 2016 a proibição se estendeu as baterias de íons de lítio em aeronaves de passageiro quando transportadas isoladamente (não instaladas em equipamentos).

Classe	Características do compartimento de carga
A	(1) A presença de um incêndio deve ser facilmente detectada pela tripulação; e (2) Cada parte do compartimento deve ser de fácil acesso quando em voo.
B	(1) deve ter acesso suficiente em voo para permitir que um tripulante, sem entrar no compartimento, seja capaz de extinguir o incêndio usando um extintor manual; (2) Quando em uso do acesso para extinção do fogo, nenhuma quantidade perigosa de fumaça, chamas ou agente extintor poderá entrar no compartimento ocupado pela tripulação ou passageiros; e (3) deve haver um detector de fumaça ou de fogo para dar aviso à tripulação sobre a ocorrência de fumaça ou fogo.
C	(1) deve haver um sistema de detecção de fumaça ou fogo para dar aviso a tripulação; (2) deve haver um sistema de extinção de incêndio ou supressão controlável a partir do cockpit; (3) devem existir meios para excluir as quantidades perigosas de fumaça, chamas ou agente extintor de qualquer compartimento ocupado pela tripulação ou passageiros; e (4) devem existir meios para controlar a ventilação dentro do compartimento de carga, de modo que o agente extintor utilizado possa controlar qualquer incêndio que possa começar dentro do compartimento. Obs: Compartimento de bagagem e carga não tem acesso pela tripulação.
D	Não possui sistema de pressurização no compartimento de carga e nem acesso da tripulação. Obs: Esta classificação foi abolida após acidente com um DC-9 da ValuJet em 1996.
E	(1) Deve haver um sistema de detecção de fumaça ou fogo para dar aviso a tripulação; (2) Devem existir meios para desligar o fluxo de ar de ventilação para, ou dentro do compartimento; (3) Devem existir meios para excluir do compartimento da tripulação de voo quantidades perigosas de fumaça, chamas ou gases nocivos; e (4) As saídas de emergência devem estar acessíveis sob qualquer condição de carregamento da aeronave. Obs: Tem seu uso restrito somente a aeronaves cargueira e os compartimentos de carga classe E dependem exclusivamente da descompressão da cabine, com a eliminação do oxigênio como método para controlar o fogo.
F	(1) Deve haver um sistema de detecção de fumaça ou fogo para dar aviso a tripulação; (2) Devem existir meios para extinguir ou controlar um incêndio sem exigir que um tripulante entre no compartimento; e (3) Devem existir meios para excluir as quantidades perigosas de fumaça, chamas ou agente extintor de qualquer compartimento ocupado pela tripulação ou passageiros.

Tabela 1. Tabela com a Classificação dos Compartimentos de Bagagem e Cargas.

6 MOTIVAÇÃO

Com base em um levantamento feito pela PRBA (*Portable Rechargeable Battery Association*), que é uma associação inicialmente formada pelas 5 maiores fabricantes de baterias do mundo: Energizer, Panasonic, SAFT, SANYO e Varta, estimou que o transporte aéreo de baterias somente nos EUA em 2016 de metal e íons de lítio gira em torno 10.000.000 kg, distribuídas conforme tabela 2, dando a real dimensão que atualmente representa o transporte de baterias de lítio no transporte aéreo e

consumo desde tipo de componente no mundo moderno. No mesmo sentido, a tabela 3 mostra o número total de volume de baterias de íons de lítio transportados no Brasil, ano de 2015, no período de janeiro a agosto. Estes números reforçam ainda mais a preocupação e a necessidade de buscar meios de mitigar os possíveis impactos de eventos críticos envolvendo baterias de lítio. É possível ainda prever qual seria o impacto econômico que uma proibição definitiva no transporte destas baterias causaria se as ações mitigatórias de segurança em desenvolvimento não sejam suficientes para reduzir o risco de eventos relacionados ao transporte aéreo de baterias de lítio a um nível aceitável.

Tipo de Bateria	Importadas [kg]	Exportadas [kg]	Total [kg]
Metal de Lítio	1.293.895	706.137	2.000.032
Íons de Lítio	6.758.066	1.762.909	8.520.975
Total	8.051.961	2.469.046	10.521.007
% do total de Commodities	0,19%	0,08%	0,14%

Tabela – 2: Levantamento da Quantidade de Transporte de Baterias nos EUA em 2016.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	Total acumulado
Total de UN 3480 (aeronave de passageiro e cargueira)	14252	7052	8180	6780	14619	6721	7254	2164	67022
Total de UN 3480 em PAX (aeronave de passageiro)	541	676	716	613	391	233	518	72	3760
Total de artigos perigosos	164411	152935	155691	132268	129974	139015	139051	82873	1096218
UN 3480 em PAX por total de UN 3480	3,80%	9,59%	8,75%	9,04%	2,67%	3,47%	7,14%	3,33	5,61%
UN 3480 em PAX por total de artigo perigoso	0,33%	0,44%	0,46%	0,46%	0,30%	0,17%	0,37%	0,09	0,35%

Tabela 3: Relatório Consolidado de Transporte de Baterias de Íon Lítio (UN3480) Realizadas em 2015 até o Mês de Agosto no Brasil Considerando Voos Domésticos e Internacionais.

7 DESENVOLVIMENTO DO ASSUNTO

Foram consideradas quais ações mitigatórias poderiam ser adotadas no âmbito das baterias para a reduzir o risco no transporte. Desta forma, as seguintes considerações foram apresentadas:

Composição química das baterias: Certas composições químicas reagem com menor violência em caso de falha do que outras. Estudos indicam que o uso de compostos de óxidos de metais de transição litiados, como os à base de níquel (LiNiO₂) e eletrólitos aquosos (mistura de solventes orgânicos apróticos e sais de lítio) se mostram mais instáveis termicamente e portanto mais perigosos do que outros a base de Cobalto (LiCoO₂) ou Manganês (LiMnO₂) e eletrólitos não aquosos (Binotto, 2011).

Projeto das células/baterias: Células/baterias podem conter em seus projetos dispositivos de segurança que minimizam os efeitos externos em caso de falhas, contendo grande parte dos produtos da reação internamente a célula/bateria, limitando a propagação dos efeitos em caso de falha para as adjacências. Podemos citar como exemplo de dispositivos de proteção: (1) controladores de corrente e tensão, (2) dispositivo de gerenciamento de temperatura e (3) redução do SOC. Estes dispositivos podem limitar consideravelmente o problema da emissão de gases explosivos, assim como reduzir os efeitos térmicos e os outros tipos perigos gerados pelo fogo em caso de superaquecimento da célula/bateria. No entanto, esse tipo de aplicação ainda encontra a barreira de viabilidade econômica para células/baterias de pequeno porte e baixo valor de mercado (a grande maioria dos casos).

Nível energético (SOC): Os resultados indicam que com o aumento do SOC, as baterias tendem a ter estabilidade térmica drasticamente reduzidas, favorecendo o início do processo de auto aquecimento (Binotto, 2011).

Mitigações nos sistemas da aeronave (proteção): a seguir são mostradas os dois grandes grupos nos quais é possível separar os tipos de barreiras nos quais esforços vem sendo empregadas a fim de mitigar o risco quanto do transporte de baterias de Lítio, são eles:

Barreiras de proteção passivas: incluem o uso de materiais não combustíveis ou auto extingüíveis, uso de separadores, isoladores, ventilação, aterramento, etc. Dentre estas destaca-se os containers de carga resistente a fogo e as capas de contenção de chamas/fogo, conforme abaixo descritas:

- Containers de carga resistente a fogo (SAE AS6278, 2013 e ISO 19281:2016(E), 2016): Estão sendo desenvolvido por algumas empresas e operadores containers que tem demonstrado efetividade contra fogo comum oriundo de materiais combustíveis, porém testes realizados com baterias de metal e íons de lítio resultaram em explosão do container devido a formação e acúmulo de gases inflamáveis. Ressalta-se ainda, que a utilização deste tipo de container dificulta a penetração do agente supressor de fogo Halon 1301 no caso de compartimento de carga classe C. A temperatura dentro do container é superior a 200°C, o que, em caso de fogo externo, não evita o início e a propagação do processo de Thermal Runaway de embalagem contendo baterias de lítio não envolvidas inicialmente com a causa do fogo. Estes containers podem aumentar significativamente o tempo entre a surgimento da chama e a detecção da fumaça pelos sensores do sistema de supressão de fogo da aeronave.
- Capas de contenção de chamas/fogo: Estas capas estão sendo desenvolvidas para serem colocadas sobre uma carga paletizada (SAE AS6543, 2013 e ISO 14186:2013(E), 2016). Foi comprovado que as capas são efetivas contra fogo comum oriundo de materiais combustíveis, porém não são efetivas para conter fogo oriundo de baterias de metal de lítio. Testes demonstraram que essas capas tiveram algum sucesso em conter fogo oriundo de baterias de íons de lítio.

Barreiras ativas: incluem sistemas mais rápidos e específicos de detecção de incêndio, sistemas melhorados de supressão de fogo, controle de temperatura, meios de fechamento da ventilação e parada automática de sistemas críticos para o voo.

Mitigações nas embalagens: Desenvolvimento de embalagens que garantam que não haverá propagação do evento de Thermal Runaway entre células/baterias dentro da embalagem, não haverá emissão de gases inflamáveis e tóxicos em quantidades significantes para o exterior da embalagem, não haverá fogo externo a embalagem e que a temperatura externa da mesma será inferior a 200°C.

Prevenção da propagação do calor: Acreditava-se até pouco tempo que a contenção do fogo dentro da embalagem seria suficiente para mitigar/reduzir os riscos no transporte deste tipo de bateria, porém testes recentes conduzidos pelo FAA (Office of Security and Hazardous Materials Safety”, 2016) demonstraram que uma pequena concentração dos gases emitidos podem ocasionar uma explosão. A prevenção da propagação resolve o problema dos gases inflamáveis e minimiza significativamente os outros perigos gerados em caso de superaquecimento. A necessidade de mitigação da propagação torna-se muito mais crítica à medida que o número baterias despachadas nos carregamentos aumenta.

Contenção/confinamento do fogo gerado pela célula/ bateria dentro da embalagem: Para carregamentos contendo apenas um pequeno número de pequenas células/baterias, a contenção do fogo dentro da embalagem poderia ser uma ação mitigatória eficaz, com a utilização de termo gel no resfriamento das mesmas, evitando a progressão do evento de superaquecimento e limitando a emissão de gases. No entanto, a eficácia do termo gel depende da manutenção da integridade da embalagem, o que não ocorre em caso de fogo proveniente de agente externo.

Proteção contra fogo externo: Carregamentos de grande quantidade de células/baterias (quantidade que irá depender do tipo da bateria e da sua condição SOC), há a necessidade de proteger esses carregamentos de fonte externas de fogo ou de calor. Os números de artigos transportados devem ser restringidos. Esta restrição deve ser dependente do tamanho do compartimento de carga ou container em que serão despachadas. Em compartimentos de carga classe C, que possuem sistema de supressão com Halon 1301, supõem-se que não haverá chamas fora da embalagem após o acionamento do sistema. No entanto, esta condição só pode ser assumida se a temperatura do carregamento não exceder a requerida para desencadear o processo de superaquecimento ou que a embalagem seja capaz de conter o risco internamente, sem que haja emissão de eletrólitos e gases inflamáveis em quantidade suficientes para comprometer a segurança de voo. Os compartimentos de carga classe E, que não possuem um sistema ativo de supressão de fogo, que dependem exclusivamente da decompressão da cabine para suprimir o fogo deverão possuir um sistema auxiliar de supressão. As temperaturas do fogo neste tipo de compartimento podem ser muito maiores quando comparadas com os compartimentos da classe C, pois há a intensificação do fogo a medida que a aeronave reduz a altitude (decida de emergência) devido ao aumento da concentração de oxigênio disponível na cabine.

Desenvolver requisitos e normas para testes de performance para as baterias e embalagens para mitigar e manter confinado o perigo gerado no transporte em condições normais, sem depender exclusivamente do sistema de supressão de fogo da aeronave.

Cuidados no transporte: A ICAO proibiu no início de 2015 o transporte de baterias de metal de lítio em todos os tipos de aeronaves comerciais de passageiros e cargueiros.

No final de 2015, o Conselho Internacional de Coordenação de Associações das Indústrias Aeroespaciais (ICCAIA) e a Federação Internacional da Associações de Pilotos de Linha Aérea (IFALPA) propuseram a proibição do transporte de baterias/células de íons de

Lítio nas aeronaves de passageiros e cargueiros até que seja desenvolvido meios de mitigação do risco para uma faixa tolerável, pois as aeronaves não estão preparadas para suportar um evento de fogo envolvendo esses tipos de baterias. Esta solicitação foi endossada pelos 4 maiores fabricantes de aviões (Boeing, Airbus, Bombardier e Embraer). Desta forma, o Conselho da Organização da Aviação Civil Internacional – OACI, em decisão proferida em 22 de fevereiro de 2016, instituiu internacionalmente a proibição do transporte aéreo de baterias de íons de lítio sob o número “UN 3480 – *Lithium Ion Batteries*” em aeronaves de passageiro e restringiu as regras para aeronaves cargueiras até que meios de controle de risco sejam estabelecidos afim de assegurar um nível aceitável de segurança.

8 CONCLUSÃO

Com base no exposto anteriormente quanto as ações mitigatórias que poderiam ser adotadas no âmbito das baterias para a reduzir o risco no transporte, as que se mostraram mais efetivas foram: a redução do nível energético (SOC) de células/baterias para o transporte; e a prevenção da propagação do efeito do superaquecimento entre células e/ou baterias dentro das embalagens, evitando assim a propagação dos efeitos térmicos para fora das mesmas. Estas barreiras mitigatórias, apesar de efetivas ainda não são capazes de eliminar o risco, levando à necessidade de continuidade no desenvolvimento e melhoramento das barreiras até então vislumbradas, para que seja possível estabelecer um nível mínimo aceitável de segurança no transporte de células/baterias de lítio.

9 STATUS ATUAL E PROXIMOS PASSOS

Em decorrência da proibição, diversas ações foram tomadas pelas Autoridade de Aviação Civil dos diversos países membros da ICAO, a fim de reduzir os perigos relacionados ao transporte de baterias de Lítio em Aeronaves de Passageiros e de Carga. Assim, pode-se citar:

Revisão das Instruções Técnicas para o Transporte Seguro de Artigos Perigosos pelo Modal Aéreo - DOC. 9284-AN/905 (ICAO) com vistas a restringir o transporte de baterias de íons lítio em aeronaves cargueiras, proibindo consolidação de embalagens contendo esse tipo de artigo em um único volume (paletização) ou utilização de sobre-embalagens (overpacks).

Recomendação de revisão dos procedimentos e treinamentos de pessoal, assim como a publicação de uma guia das melhores práticas no tratamento dos riscos envolvidos no transporte de baterias de lítio.

Desenvolvimento de ações para o desenvolvimento de sistemas de detecção e supressão de fogo que rapidamente identifiquem o fogo proveniente de células/baterias de lítio independente se estejam acondicionadas dentro de containers ou pallets.

Criação do grupo de trabalho G-27 junto a SAE Internacional para o desenvolvimento da norma SAE AS6413 “Performance based package standard for lithium batteries as cargo on aircraft”. Esta norma visa fornecer um método de teste para demonstrar e documentar a mitigação dos perigos potenciais de células/baterias de metal de lítio (UN 3090) e íons de lítio (UN 3480) quando transportados como carga em aeronaves devendo abordar a necessidade de controlar os perigos que podem surgir de

Uma falha de uma célula individual, de forma que contenha os perigos dentro da embalagem, evitando assim incêndios incontroláveis e pulsos de pressão que podem comprometer os sistemas atuais de supressão de incêndio dentro do compartimento de carga. Os trabalhos no desenvolvimento desta norma já encontram-se bastante avançados e a estimativa mais otimista é que ela seja publicada já no início de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus que nos iluminou e nos guiou com sua sabedoria, aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes, a nossa família pela compreensão da ausência e pelo incentivo, à ANAC pelo apoio Institucional, ao Instituto de Pesquisas e Ensaio em Voo (IPEV) pela iniciativa em difundir aspectos da segurança de voo na execução das atividades de pesquisa, desenvolvimento, certificação e qualificação de novos produtos aeronáuticos, através da realização do 10º Simpósio de Segurança de Voo (SSV 2017) e pela oportunidade oferecida de disseminarmos conhecimento relativo aos perigos decorrente do atual transporte de baterias de metal e íons de lítio em aeronaves de passageiros e de carga.

REFERÊNCIAS

- BINOTTO, G. et al. **Review thermal runaway reactions mechanisms**. HELIOS - High Energy Lithium-Ion Storage Solutions, 2011.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **Lithium Batteries & Lithium Battery-Powered Devices**. Office of Security and Hazardous Materials Safety, Washington. 2016.

- HEWSON, J. C.; DOMINO, S. P. **Thermal runaway of lithium-ion batteries and hazards of abnormal thermal environments**. In: US Sections Section Combustion Institute Meeting. [Exposição oral]. Cincinnati, 2015.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Doc 9284**: Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air. 2017-2018 ed. Montreal, 2017.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Doc 9481**: Emergency Response Guidance. 2017-2018 ed. Montreal, 2017.
- INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Doc 9859**: Safety Management Manual (SMM). 3 ed. Montreal, 2013. ISBN 978-92-9249-214-4.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14186:2013(E)**: Air cargo — Fire containment covers - Design, performance and testing Requirements, 2013. 26p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19281:2016(E)**: Air cargo - Fire resistant containers - Design, performance and testing Requirements, 2016. 20p.
- PONCHAUT, N.; MARR, K.; COLELLA, F.; SOMANDEPALLI, V.; HORN, Q. **Thermal Runaway and Safety of Large Lithium-Ion Battery Systems**. In: International Stationary Battery Conference, Orlando, FL, 2015.
- RECHARGE AISBL. **Safety of Lithium-ion batteries**. [S.l.], 2013. 25p.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE AS 6278**: Fire Resistant Container - Design, Performance and Testing Requirements, 2013.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE AS 6413**: Performance based packaging standard for lithium batteries as cargo on aircraft, 2016.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE AS 6453**: Fire Containment Cover - Design, Performance and Testing Requirements, 2013.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE J2464**: Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing. 2009. 33p.
- WANG, P.; ZHAO, C.; SUN, C. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. **Journal of Power Sources** **208**. 2012. p 210–224.