



CICLO ALIMENTADO POR BOMBA ELÉTRICA VERSUS CICLO GERADOR DE GÁS: MODELAGEM, ANÁLISE COMPARATIVA E ANÁLISE DE MERCADO

Alexia Paola Sato Castense^a; Loreto Pizzuti^a;

[a] Universidade Federal do ABC, Alameda da Universidade s/nº - Bairro Anchieta - São Bernardo do Campo - SP.

Resumo: A viabilidade do motor com sistema de alimentação por bomba elétrica como alternativa para o estágio superior dos lançadores espaciais foi analisada. Para isso, uma análise comparativa entre as massas do ciclo proposto e um motor de sistema gerador a gás padrão de mesmas especificações foi desenvolvida, considerando a maturidade tecnológica desse ciclo e o estado da arte do sistema de baterias. E, baseado nisso, uma rotina MATLAB foi desenvolvida para estimar e comparar as massas de cada sistema. Por ser uma solução simplificada em relação ao ciclo convencional e pelo progresso crescente da tecnologia de baterias, a viabilidade econômica e tecnológica dessa solução foi estudada com o intuito de verificar o posicionamento de um lançador com sistema de alimentação acionado por bombas elétricas no mercado atual. A solução proposta é entre 0,95% a 3,64% mais pesada que o ciclo convencional, entretanto ganhos de confiabilidade, redução de custo, um aumento contínuo da energia estocada e melhora da potência de saída podem justificar a escolha desse ciclo para estágios superiores.

Palavras-chave: sistemas de propulsão, motor alimentado por bomba elétrica, ciclo gerador de gás, motor Rutherford.

1. INTRODUÇÃO

A viabilidade do uso de motores com alimentação elétrica como alternativa para motores de foguete com baixo nível de empuxo será analisada, já que é uma alternativa interessante em se tratando de simplicidade e custo por unidade de carga paga. Os sistemas de propulsão aqui analisados serão, o ciclo gerador de gás e o ciclo com sistema de alimentação por bomba elétrica.

O ciclo gerador de gás é um ciclo de potência aberto de um motor de foguete bipropelente, parte do propelente é queimado em um gerador de gás e os gases quentes do produto de combustão são usados para acionar as turbo bombas do motor foguete que irão pressurizar e injetar o par propelente na câmara de combustão. A parte de propelente queimado no gerador de gás posteriormente é expelida em uma tubeira própria.

O ciclo alimentado por bomba elétrica é um ciclo de potência de um motor de foguete bipropelente em que o acionamento das bombas que pressurizará o par propelente não é mais feito por turbinas, mas sim por motores elétricos alimentados por baterias. Aqui a eficiência do ciclo fica por conta da eficiência do motor elétrico, inversores e principalmente, das células de bateria.

2. VANTAGENS DO CICLO COM ALIMENTAÇÃO POR BOMBA ELÉTRICA

No ciclo gerador de gás há uma perda de eficiência devido à necessidade de queimar propelente no gerador para acionar as bombas responsáveis pela mistura do propelente e oxidante na câmara de combustão,

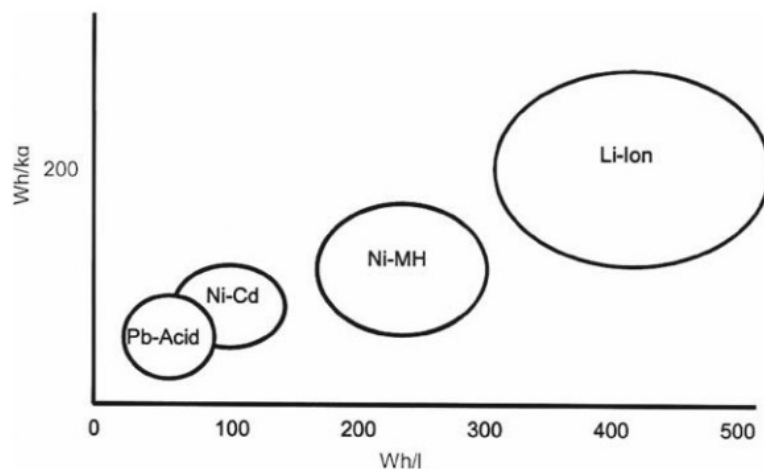
assim sendo, esse ciclo tende a ter um impulso específico menor quando comparado ao ciclo com alimentação por bomba elétrica.

Esse, por sua vez, pelo fato de não necessitar de um gerador de gás, já que essa função é suprida pelas baterias elétricas, todo o aparato que constitui aquela seção – componentes relacionados à turbina como ignitores do gerador de gás, válvulas auxiliares, injetores, parte da tubulação – não tem mais lugar nesse ciclo, o que simplifica significativamente o sistema. Dessa forma todo o propelente contido nos tanques é usado para geração de empuxo e isso, segundo (Kwak et. al, 2018) implica em um ganho de 1.6% a 6.1% para o ciclo alimentado por bomba elétrica em relação ao impulso específico inicial do ciclo gerador de gás.

Outra grande vantagem do ciclo com alimentação elétrica é o progresso da tecnologia das baterias de lítio, empregadas para acionar as bombas de propelente. A crescente melhoria das baterias torna o produto, lançador com alimentação por bomba elétrica, alavancável, uma vez que as baterias a cada ano aumentam sua densidade de energia e/ou energia específica disponível – quantidade de energia estocada útil por volume e quantidade de energia estocada útil por unidade de massa, respectivamente –, tornando-se mais potentes e/ou mais leves.

O gráfico a seguir mostra a densidade de energia (Wh/l) e energia específica (Wh/kg) para os diferentes tipos de bateria recarregáveis desenvolvidas ao longo dos anos, a começar do acumulador de chumbo, Pb-Acid, criada em 1859, até a bateria de ion-lítio, Li-ion, propostas nos anos 70. A seção 4 deste artigo estudará de forma mais detalhada a tecnologia de baterias e seu avanço ao longo do tempo.

Figura 1. Densidade de energia (Wh/l) e energia específica (Wh/kg) para as principais baterias recarregáveis de pequena dimensão. Retirado de: Yoshio et al. (2009)



3. ANÁLISE DE MASSA

A análise de massa será feita baseada no artigo de (Kwak et. al, 2018) e as alterações feitas serão apresentadas na seção Parâmetros Estimados e na seção 4 deste artigo. Será feita uma análise comparativa da massa de ambos os ciclos, o Ciclo Gerador de Gás – Gas Generator Cycle (GG) – e o Ciclo com Alimentação por Bomba Elétrica – Electric Pump Cycle (EP).

As massas de cada sistema são descritas em função da potência da bomba elétrica e do tempo de queima. A massa do ciclo gerador de gás é obtida pela somatória das massas da turbo bomba, gerador de gás, oxidante, combustível, tanque de oxidante, tanque de combustível, sistema de pressurização a hélio:

$$m_{GG} = m_{tp} + m_{gg} + m_o + m_f + m_h + m_{ot} + m_{ft} + m_{ht} \quad (1)$$

Já a massa do ciclo com alimentação por bomba elétrica é descrito pela somatória das massas da bomba do oxidante, do combustível, motor elétrico, inversor do motor, do sistema de baterias – composto pelo invólucro, células de bateria e o sistema de refrigeração –, oxidante, combustível, hélio para pressurização, e tanques de oxidante, combustível e hélio:

$$m_{EP} = m_{op} + m_{fp} + m_{em} + m_{inv} + m_{bp} + m_o + m_f + m_h + m_{ot} + m_{ft} + m_{ht} \quad (2)$$

Já nesse caso, a somatória da massa é função do fluxo de massa, incremento de pressão e do tempo de queima. Nota-se que o cálculo da massa total do ciclo EP considera a massa de combustíveis, oxidantes e os respectivos tanques, uma vez que essas não são as mesmas do ciclo GG. Vale ainda ressaltar que, apesar do ciclo EP ser acionado por bombas elétricas, ainda é necessário um tanque de hélio para prevenir a cavitação dessas bombas.

3.1 Parâmetros estimados

Alguns dos parâmetros aqui usados foram estimados a partir de dados presentes do próprio artigo e na literatura conhecida sobre motores foguete, (Cornelisse et. al, 1979).

A primeira consideração a ser feita é em relação à turbina do ciclo gerador de gás. A temperatura de entrada na turbina usada no artigo estudado é de 900 K para a liga INCONEL 718, no entanto essa liga é empregada na indústria a temperaturas de cerca de 1100 K em que oferece eficiência de até 70% e não 52%. Portanto a temperatura de entrada na turbina analisada aqui será de 1100 K e eficiência de 65%, valores médios comumente achados para esse material quando empregado em foguetes.

O primeiro parâmetro calculado, H, é o incremento de pressão na cabeça da bomba, uma função das pressões de entrada, saída, densidade do par propelente e gravidade padrão ao nível do mar.

$$H = \frac{P_{saída} - P_{entrada}}{\rho g_0} \quad (11)$$

$$H = \frac{P_{entrada}}{\rho g_0} \quad (12)$$

O incremento de pressão na cabeça da bomba de oxidante é considerada pelo autor como sendo 155% da pressão na câmara de combustão e o incremento de pressão na bomba de combustível é 115% da pressão na câmara de combustão. Deve-se ressaltar que a pressão na câmara de combustão varia de 2 a 10 MPa. Logo os valores de incremento de pressão variam de 3,1 MPa a 15,5 MPa para a bomba de oxidante e de 2,3 MPa a 11,5 MPa para a bomba de combustível.

Já para calcular a pressão inicial na cabeça da bomba é necessário considerar as pressões de entrada de 0,25 MPa e 0,4 MPa, para o combustível e oxidante respectivamente, parâmetros conhecidos, e os valores de densidade de 804,2 kg/m³ e 1126,1 kg/m³ para combustível e oxidante e uma aceleração padrão da gravidade de 9,8066 m/s². A partir da equação (12) é possível calcular a pressões iniciais de oxidante e combustível como sendo 36,221 m e 31,700 m respectivamente.

O terceiro parâmetro estimado é o fluxo de massa de oxidante e combustível. Considerando o impulso específico como sendo função do empuxo, gravidade ao nível do mar e fluxo total de propelente, pondo em evidência a massa total de propelente, isto é, a soma do fluxo de massa de oxidante e combustível – parâmetros a serem encontrados.

$$\dot{m}_p = \frac{F}{g_0 I_{sp}} \quad (13)$$

Tomando em conta os dados do motor de terceiro estágio do veículo KLSV-II, (Kwak et. al, 2018), para empuxo como sendo 68,9 kN no vácuo, impulso específico, 326,8 s no vácuo, e a aceleração da gravidade, novamente como sendo 9,8066 m/s², tem-se um fluxo de massa total de 21,499 kg/s. Agora resta estimar quanto desse fluxo de massa é relativo ao propelente e quanto é relativo ao oxidante. Para tal será usada a razão de mistura da câmara de combustão de 2,45. Agora, com o sistema de equações abaixo é possível encontrar o fluxo de massa de cada elemento do par propelente.

$$\begin{cases} \dot{m}_o + \dot{m}_f = \dot{m}_p \\ \frac{O}{F} = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_f} = 2,45 \end{cases} \quad (14)$$

Resolvendo o sistema, encontra-se o fluxo de massa do oxidante, 15,267 kg/s e o fluxo de massa do combustível, 6,231 kg/s.

O quarto parâmetro a ser estimado é o fluxo de massa no gerador de gás. Para isso deve-se considerar a diferença entre os impulsos específicos dos sistemas convencional – com gerador de gás – e não convencional – sem gerador de gás. No caso do segundo sistema mencionado, toda a massa será usada para gerar empuxo. Em contraponto, no primeiro sistema, parte da massa é usada para acionar o gerador de gás e essa porção quase não produz empuxo, sendo responsável por cerca de apenas 1% do empuxo total.

Então, considerando o terceiro estágio de um perfil de missão KSLV-II para um valor de 68,9 kN de empuxo, um ciclo gerador de gás tem 326,8 s de impulso específico e um ciclo alimentado por bomba elétrica tem 341,3 s, 4,437% a mais que o anterior para o mesmo nível de empuxo (Kwak et. al, 2018), esse acréscimo se deve ao fato de toda a massa de propelente ser usada para gerar empuxo. Utilizando a equação (13), obtêm-se um fluxo de massa total de 21,499 kg/s para o ciclo gerador de gás e 20,586 kg/s para o ciclo com alimentação por bomba elétrica. A diferença, 0,91 kg/s representa o fluxo de massa no gerador de gás.

3.2 Análise Computacional

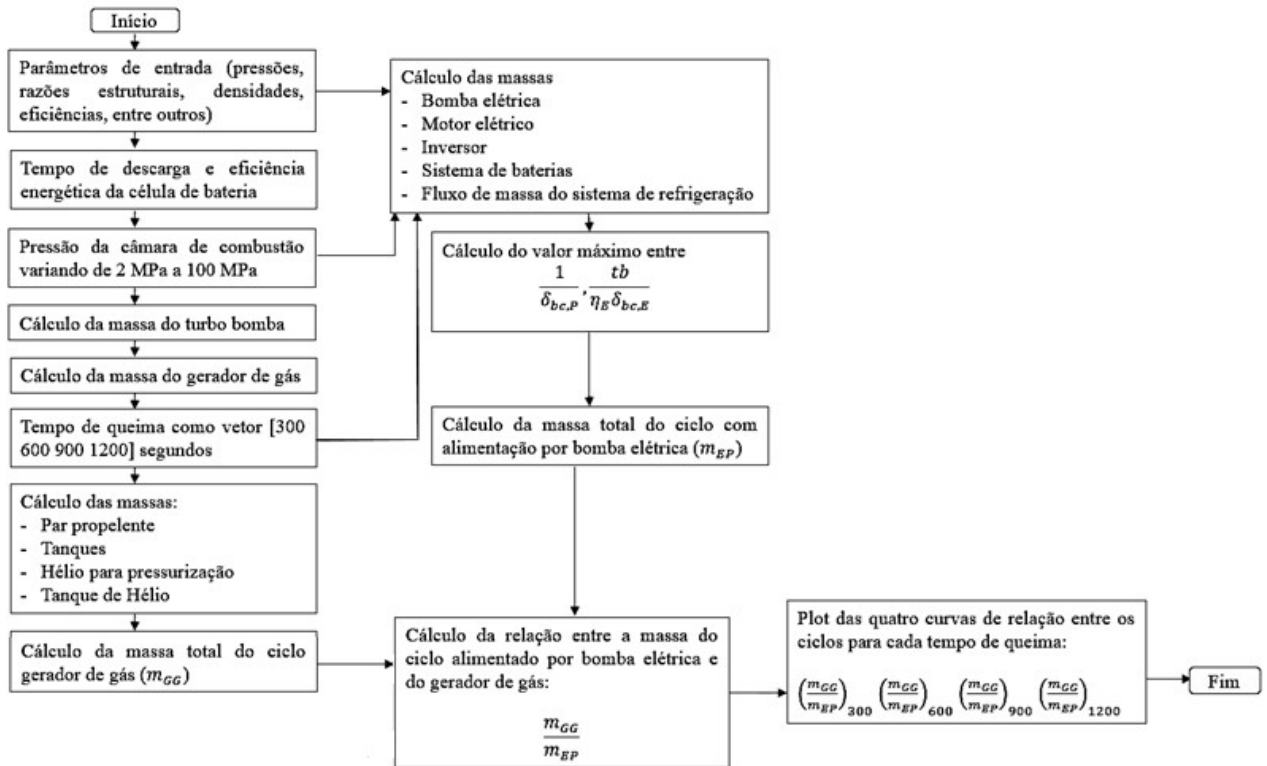
A rotina computacional desenvolvida em MATLAB utiliza parâmetros já estudados por (Kwak et. al, 2018) e parâmetros como temperatura de entrada na turbina, eficiência da turbina e densidade de potência para as células de bateria baseadas em tecnologias atuais conhecidas para calcular as massas de cada ciclo.

Primeiramente é calculado o tempo de descarga da bateria, a eficiência energética da célula de bateria, então a pressão na câmara de combustão é definida como um vetor de 2 a 10 MPa, com passo de 0,1 MPa, em seguida são calculadas as massas da turbo bomba, gerador de gás, propelente, tanques, massa e tanque de hélio e os coeficientes A1 até A5 para, finalmente, calcular a massa do ciclo gerador de gás.

Posteriormente, para calcular a massa do ciclo de alimentação elétrica, calcula-se as massas da bomba, motor elétrico, inversor, sistema da bateria (invólucro, célula de bateria e sistema refrigeração) e o coeficiente B1, para, então calcular a massa do ciclo com sistema de alimentação por bomba elétrica. Uma vez calculadas as massas de ambos os ciclos para os tempos de queima de 300 s, 600 s, 900 s e 1200 s, é feita uma comparação da massa do sistema alimentado por bombas elétricas com o gerador de gás para cada pressão na câmara de combustão e cada tempo de queima. Por fim, as quatro curvas para cada tempo de queima em função da variação da pressão na câmara de combustão são plotadas.

O fluxograma a seguir ilustra o procedimento adotado na rotina computacional desenvolvida.

Figura 2. Fluxograma da rotina computacional desenvolvida para analisar a relação das massas.



4. TECNOLOGIA DE BATERIAS E UMA ESTIMATIVA FUTURA

A tecnologia de baterias que se tem acesso atualmente apresenta valores de densidade de energia elevados, no entanto os valores de densidade de potência são significativamente menores. Em outras palavras, a quantidade de energia estocada é elevada, mas a energia transferida, potência de saída das baterias, faz com que o tempo de descarga ainda seja elevado.

A tecnologia de baterias usada por Kwak é baseada em células de lítio-polímero, uma vez que dentre as baterias por ele estudadas, era o tipo de célula com maior taxa de corrente e, portanto, menor tempo de descarga. Considerando dados retirados do seu grupo de estudos, são apresentadas densidades de potência fornecida pelas baterias li-po para as bombas de combustível e oxidante de, respectivamente, 15 kW/kg e 20 kW/kg. Entretanto os maiores valores encontrados na literatura no cenário atual para densidade de potência é de cerca de 6 kW/kg, considerando o mesmo tipo de bateria (Rachov et. al, 2010).

Dessa maneira, a análise computacional será feita a partir dos dados encontrados na literatura e, posteriormente, será feita uma projeção do desenvolvimento da densidade de potência das baterias para os próximos 20 anos de forma a compreender melhor a tendência similar de progresso do ciclo de motor foguete alimentado por bombas elétricas.

A tecnologia de baterias começou por volta de 1800 com a invenção da pilha voltaica e logo em 1859 Gaston Planté inventou a primeira bateria recarregável, a bateria de chumbo-ácido – lead-acid battery – até hoje usada em automóveis. Com a constante necessidade de armazenar maiores quantidades de energia ocupando menor volume as baterias se desenvolveram e novos tipos de bateria apareceram no mercado. Passando pelas células de chumbo-ácido, níquel-ferro, entre outras até chegar em íons de lítio, como mostra a figura 3.

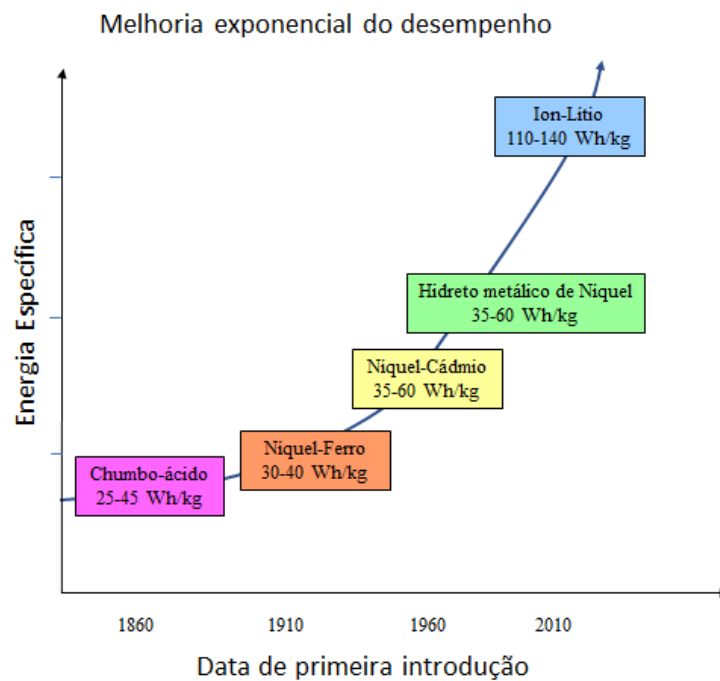
A bateria de íon-lítio consiste em um eletrólito envolvido por um invólucro rígido de metal, composto de um solvente orgânico contendo íons de lítio carregados nele dispersos que se movem entre o

cátodo e o ânodo durante a carga e a descarga. Esse tipo de célula pode ter densidade de energia de até cerca de 200 Wh/kg, mas a densidade de potência fornecida é de cerca de 1,6 kW/kg.

A bateria considerada para análise é a lítio-polímero, a diferença tecnológica dessa em relação àquela anteriormente mencionada é o eletrólito que, nesse caso, tem consistência de gel e é envolvido por uma membrana polimérica, igualmente carregada com íons de lítio. Para esse tipo de célula a densidade de energia fica por volta de até 190 kW/kg, mas a densidade de potência aumenta para 6 kW/kg (Rachov et. al, 2010), (Kwak et. al, 2018).

Outras vantagens da bateria li-po em relação a li-ion concernem à segurança, como maior confiabilidade para impactos e vibração, prevenção contra vazamentos, resistência a incêndios, já que o eletrólito gélido é menos volátil e extinção automática, e também ao design e tamanho que são mais flexíveis e facilitados. Fato que automaticamente eleva a confiabilidade do sistema elétrico baseado em li-po, em relação a um li-ion.

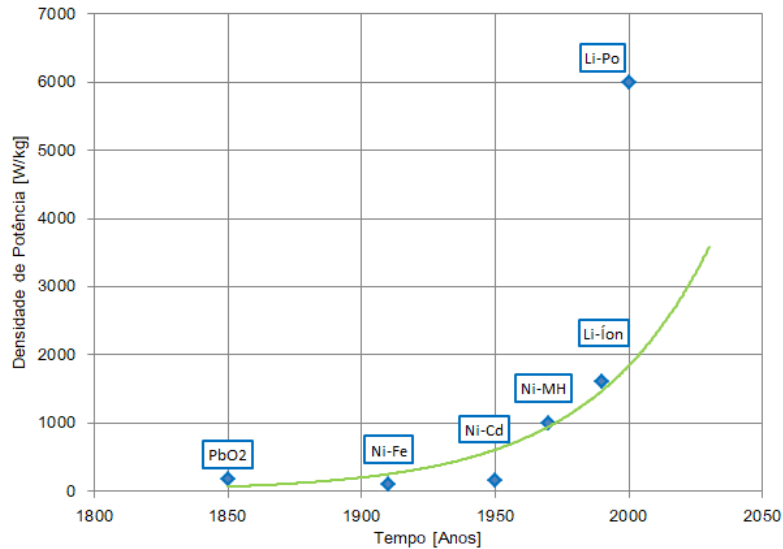
Figura 3. Energia específica das baterias ao longo do tempo. Retirado de: Electric Power Research Institute, (2008)



O espectro em de densidade de potência que dessas baterias é mostrado na tabela a seguir:

Tipo de bateria	Densidade de potência [W/kg]	Densidade de energia [Wh/kg]	Referências
Chumbo-ácido	180	40	(Geoffrey et. al, 2018)
Níquel-ferro (NiFe)	100	25	(Kordesch et. al, 2013)
Níquel-cádmio (NiCd)	150	60	(Lemon et. al, 2013)
Hidreto metálico de Níquel (Ni-MH)	1000	120	(Aditya et. al, 2008)
Íon-lítio	1600	200	(Kwak et. al, 2018)
Lítio-polímero	6000	190	(Kwak et. al, 2018)

Figura 4. Densidade de potência das baterias ao longo do tempo.



Considerando as tecnologias de Ni-Cd 150 W/kg, inserida no mercado por volta dos anos 50 e Ni-MH 1000 W/kg por volta dos anos 70, a densidade de potência sextuplicou. Entre Ni-MH e Li-ion, inserida por volta de 1985, houve uma melhora de 1,6 vezes. E, ainda, no caso de Li-ion e Li-Po, que entrou no mercado logo antes dos anos 2000, o aumento foi de 3,75 vezes. Desde a bateria de NiCd a densidade de potência das baterias aumentou em 40 vezes, nos últimos 50 anos, melhorando em 80% ao ano a potência específica de descarga das baterias.

Logo, se essa tendência se mantiver, nos próximos 20 anos, a densidade de potência triplicará. A densidade de potência do Li-Po considerada, 6000 W/kg poderá ser substituída por uma tecnologia cuja densidade se aproxime de 19440 W/kg.

O gráfico a seguir mostra a densidade de potência e energia específica para os tipos de bateria atualmente no mercado.

Figura 5. Densidade de energia versus densidade de potência para diferentes tipos de bateria. Retirado de: Lemon et al. (2013).

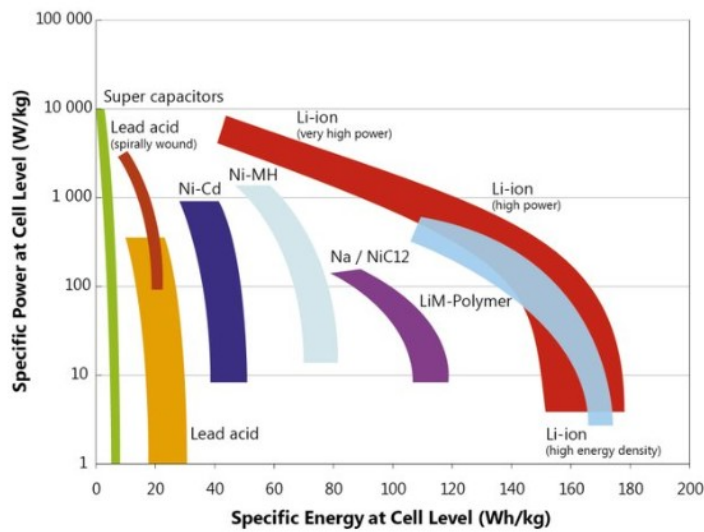
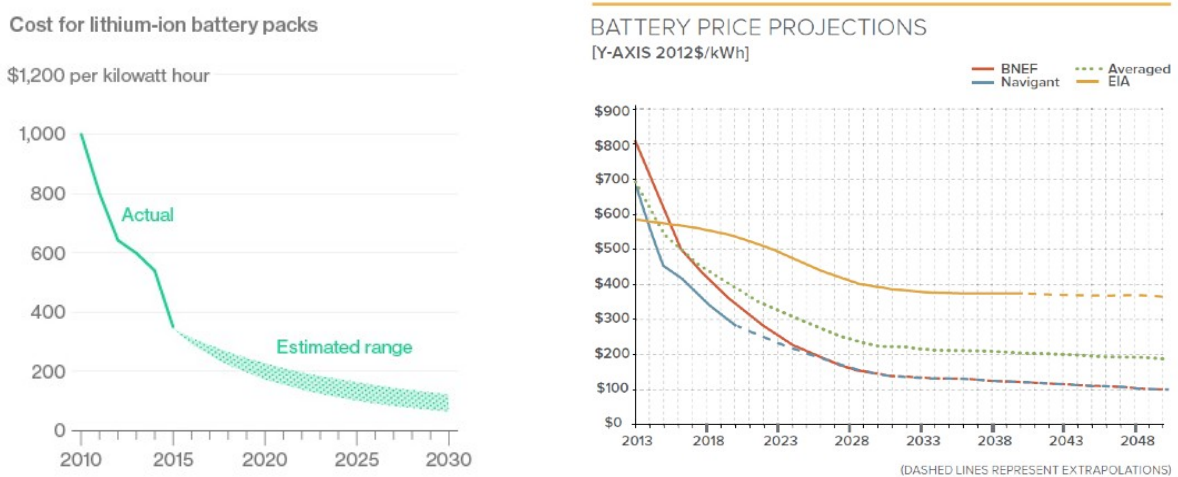


Figura 6. Tendência de custo do kWh. Retirado de: (Bloomberg New Energy Finance, 2016), (Rocky Mountain Institute, 2015).



A partir das análises de tendência de custo de baterias, o custo do kWh atualmente está entre 200 e 300 dólares com tendência de queda exponencial, caindo quase 50% a cada 5 anos. O que pode reduzir uma boa parcela do custo final de um estágio superior, quando esse tipo de tecnologia de alimentação por bombas elétricas for utilizada.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

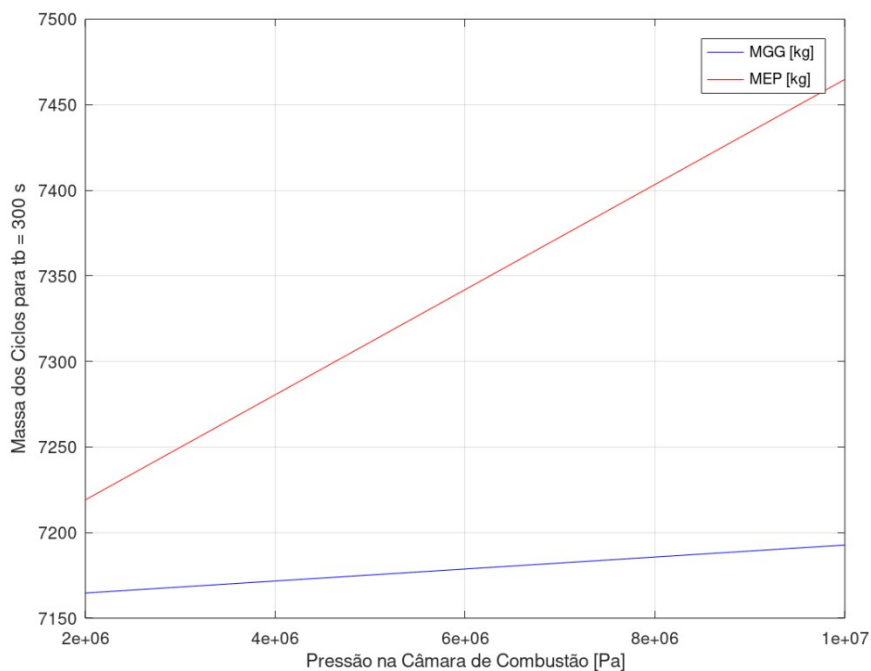
A massa de cada ciclo foi modelada segundo as equações (1) e (2) e, variando a pressão na câmara de combustão de 2 a 10 MPa foram calculadas as massas de cada ciclo para 300 e 1200 segundos de tempo de queima do propelente. As figuras a seguir mostram o resultado dessa análise.

É possível notar que para 300 segundos de tempo de queima a massa total do ciclo alimentado por bomba elétrica, EP, é de 7464,8 kg e a do ciclo gerador de gás, GG, é de 7192,7. O ciclo EP é 3,64% mais pesado do que o GG para tempos de queima pequenos. E ainda, com o aumento da pressão na câmara a

variação do ciclo EP é de 3,29% em relação à sua massa inicial que era de 7219,1 kg. Já no ciclo GG é de 0,39%, uma vez que sua massa inicial era de 7164,7 kg.

Com o aumento de pressão na câmara de combustão há um acréscimo de massa dos ciclos proporcional. Quando o motor trabalha com pressões na câmara altas, o fluxo de massa para entrar na câmara diminui, uma vez que o componente onde esse fluxo de massa será injetado – câmara – já está com alta pressão. Logo, como a densidade de potência da turbo bomba é um parâmetro fixo, é necessário mais potência nas bombas elétricas ou turbo bombas que vão injetar o fluxo de massa de propelente na câmara de combustão, tornando as bombas mais pesadas.

Figura 7. Massa dos ciclos gerador de gás e alimentado por bomba elétrica para tempo de queima de 300 segundos.

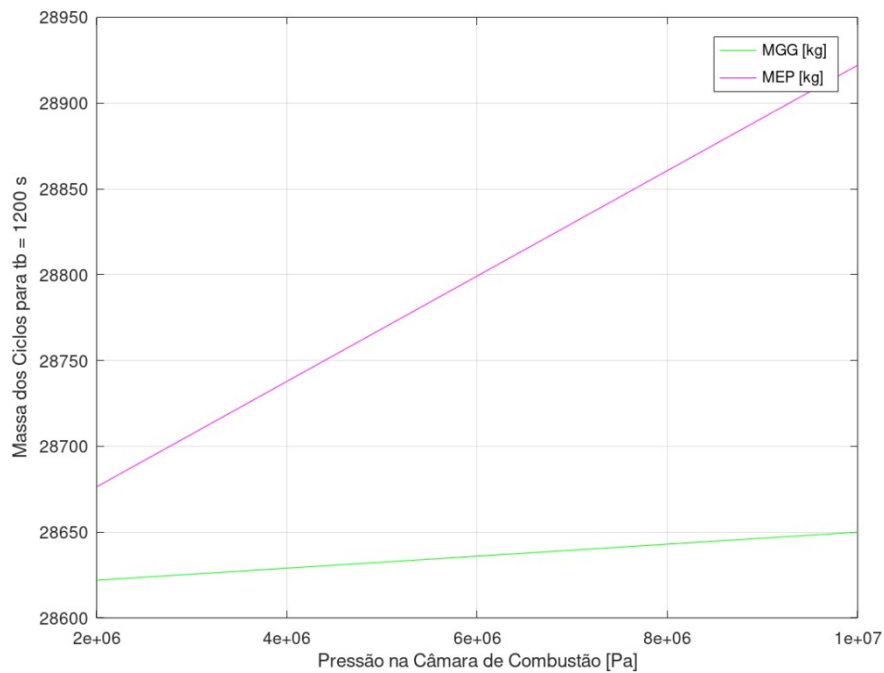


Para o caso de tempos de queima maiores, nesse caso 1200 segundos, as massas inicial e final do ciclo EP são de 28676 kg e 28922 kg, respectivamente. O que implica em um incremento de massa de 0,85% com o aumento de pressão na câmara. E para o ciclo GG as massas são de 28622 kg e 28650 kg, respectivamente, resultando em um acréscimo de 0,1%.

Comparando as massas finais de cada um dos ciclos, o EP é até 0,95% mais pesado que o GG para um tempo de queima de 1200 segundos, considerando o teto de pressão na câmara estabelecido, 10 MPa.

Nesse caso, novamente, o aumento de pressão na câmara implica em ter que aumentar a potência e, conseqüentemente, a massa da turbo bomba ou bomba elétrica.

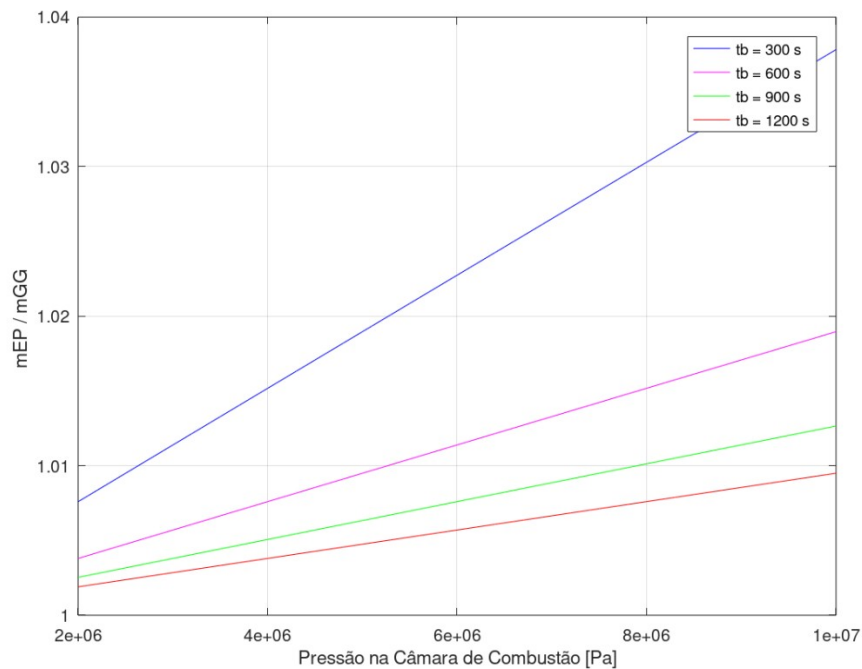
Figura 8. Massa dos ciclos gerador de gás e alimentado por bomba elétrica para tempo de queima de 1200 segundos.



A seguir, a relação entre a massa dos dois ciclos para diferentes tempos de queima – 300, 600, 900 e 1200 segundos – e diferentes pressões na câmara de combustão. É possível notar que para tempos de queima maiores a diferença entre as massas é menos evidente. Considerando 10 MPa de pressão na câmara de combustão, para 300 segundos a diferença entre as massas é de 3,64%, enquanto que para um tempo de queima de 1200 segundos essa relação cai para 0,95%.

Em um sistema elétrico a bateria descarrega para fornecer energia para o motor elétrico e, posteriormente, acionar as bombas. Tal fato gera um aumento de temperatura no pack de baterias, criando a necessidade de um sistema de refrigeração. No caso de motores foguete, o sistema de refrigeração é o feito com um trocador de calor forçado utilizando o próprio propelente como fluido refrigerante, e quanto mais brusca a variação de temperatura no pack, maior deve ser esse fluxo de propelente para conter o aumento de temperatura. Portanto, para tempos de queima maiores a bateria do motor elétrico sofre uma descarga mais lenta, esquentando menos e demandando menos fluxo de massa para resfriar. Com menos fluxo de massa passando pelo pack de baterias para resfriar, menor é o acréscimo de massa do fluxo EP em relação ao GG, isto é, menor é a diferença entre as massas do ciclo alimentado por bombas elétricas em relação ao ciclo gerador de gás.

Figura 9. Relação entre a massa do ciclo alimentado por bomba elétrica e do ciclo gerador de gás para tempos de queima variando de 300 a 1200 segundos.



Pela figura 9, o ciclo EP é sempre mais pesado que o GG, no entanto a vantagem de optar por uma alimentação elétrica das bombas pode não estar na redução de massa propriamente dita, mas sim na confiabilidade desse (Loureda et. al, 2014).

Atualmente a família de lançadores Soyuz é uma das mais confiáveis do mundo usando um motor líquido convencional, ela foi criada nos anos 60 e opera até hoje. Um exemplo é o veículo Soyuz-FG que opera desde 2001 e só teve sua primeira falha em 2018, após mais de 60 lançamentos.

Entretanto o ciclo gerador de gás é uma tecnologia já considerada madura, ao contrário do ciclo EP, atualmente em desenvolvimento, mas que conta com uma vantagem, um sistema propulsivo que não conta com um subsistema de ignição, elo fraco do sistema propulsivo. O ciclo EP usa um motor elétrico para acionar as bombas do par propelente, logo não há sistema de ignição e tampouco os componentes a ele associados, como tubulação e válvulas. Com a supressão desse subsistema de ignição há um acréscimo de confiabilidade no ciclo.

A solução mais simplificada proposta por um ciclo alimentado por bomba elétrica, em que as baterias têm se desenvolvido cada vez mais, aumentando sua capacidade de armazenamento de energia e descarga e reduzindo seu custo de fabricação – como visto na seção 4 –, pode justificar a escolha de uma tecnologia como essa.

6. CONCLUSÃO

A análise de Kwak faz duas considerações que restringem a análise a um caso mais particular, a primeira, uma temperatura de entrada na turbina de 900 K, quando o usualmente utilizado é cerca de 1100 K para esse tipo de material, INCONEL 718. Essa consideração reduz consideravelmente a eficiência desse componente, reduzindo a eficiência global do ciclo gerador de gás. Já a segunda é a densidade de potência das bombas elétricas além do que a tecnologia atual consegue prover, aqui a densidade de potência

considerada para a análise foi de 6000 W/kg, resultando em um ciclo alimentado por motor elétrico mais pesado do que o equivalente convencional.

Segundo a análise aqui realizada, levando em conta a tecnologia atual de motores elétricos e baterias e analisando o ciclo gerador de gás nas condições de projeto, é possível notar que a massa do sistema com alimentação por bombas elétricas ainda é superior à do sistema convencional. Por outro lado, a confiabilidade de um sistema de bombas elétricas pode se tornar muito superior a um sistema de turbo bombas justamente por eliminar componentes com maior probabilidade de falha como o sistema de ignição e operar com uma menor quantidade de componentes a ele relacionados.

Além da questão de um acréscimo da confiabilidade geral do estágio em que empregar essa solução, outra vantagem da alimentação elétrica de bombas é o custo cada vez mais reduzido das células de bateria e a melhora constante dos sistemas de bateria que, a cada ano, conseguem armazenar mais energia e descarregar mais energia por unidade de tempo para acionar as bombas de combustível e oxidante.

Portanto o ciclo proposto alimentado por bomba elétrica não é uma solução com mais potência que os ciclos gerador de gás atuais, entretanto são uma alternativa para estágios superiores justamente pela simplicidade, constante redução de custos de manufatura e potencial tecnológico crescente das baterias.

7. REFERÊNCIAS

- Kwak, H. D., Kwon, S. e Choi, C. H., 2018. "Performance assessment of electrically driven pump-fed LOX/kerosene cycle rocket engine: Comparison with gas generator cycle". Aerospace Science and Technology. Daejeon, Coreia do Sul.
- Yoshio, M., Brodd, R. J. e Kozawa, A., 2009. *Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies*. Springer, Nova York, EUA.
- Cornelisse, J., Schoyer, H. F. R. e Wakker, K. F., 1979. "Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics".
- Louerda, O.B., 2014. "Estudo de uma Bomba Elétrica de Alto Desempenho para Propelentes, Trabalhando em Regime de Imersão Criogênica". CIMATech - Congress of Industrial Management and Aeronautical Technology. São José dos Campos, Brasil.
- Lemon, S., Miller, A., 2013. "Electric Vehicles in New Zealand: Technologically Challenged?". EEA Conference & Exhibition. Auckland, Nova Zelândia.
- Chau, A. T. e Thangavelu, M., 2013. "Surrogate Astronaut Robotic Avatars: Co-Robotics for Safe, Economic Space Operations". AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. Los Angeles, EUA.
- Geoffrey, J. M., Davidson, A. e Monahov, B., 2018. "Lead batteries for utility energy storage: A review". Journal of Energy Storage. Reino Unido.
- Aditya, J. P. e Ferdowsi, M., 2008. "Comparison of NiMH and Li-ion batteries in automotive applications". Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin, China
- Kordesch, K., 2013. "Electrochemical Energy Storage". Graz, Austria.