

OTIMIZAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO DE CARGAS ELÉTRICAS EM AERONAVES

Augusto Marasca de Conto, augustodeconto@gmail.com

Cairo Lúcio Nascimento Júnior, cairo@ita.br

Instituto Tecnológico da Aeronáutica – São José dos Campos – Brasil

Resumo. No projeto dos sistemas de uma aeronave o dimensionamento correto de seus componentes e do sistema como um todo são essenciais para a competitividade do produto. No projeto do sistema elétrico, um dos parâmetros utilizados é a corrente máxima que o sistema deve ser capaz de suportar. Quando um conjunto de cargas elétricas é acionado existe um consumo de corrente muito maior que o consumo normal de operação. Esta demanda deve ser suportada pelo sistema. O acionamento das cargas em uma sequência pré-determinada reduz a exigência de corrente elétrica do sistema em relação a um acionamento desordenado, reduzindo a demanda do sistema e resultando no seu dimensionamento mais adequado. É proposto um algoritmo eficiente para determinar a sequência de acionamento das cargas em um sistema elétrico que minimize a corrente máxima exigida e que obedeça a restrições na ordem do acionamento das cargas. Este algoritmo pode ser utilizado como uma ferramenta no projeto do sistema elétrico de uma aeronave. Vários testes foram realizados avaliar o desempenho do algoritmo em vários cenários de dimensão e complexidade do problema. Foram investigadas várias propostas para a geração de solução inicial e os resultados dos testes apontam que a melhor forma para gerar esta solução é uma ordenação descendente do sobrepasso das cargas.

Palavras-chave: otimização, sistema elétrico, sequência de acionamento, startup

1. INTRODUÇÃO

No projeto de uma aeronave o dimensionamento correto dos sistemas é um fator crucial para o sucesso do produto. Sistemas superdimensionados implicam em custos desnecessários de fabricação e operação, enquanto o subdimensionamento acarreta na necessidade de reprojeção ou em restrições operacionais da aeronave.

O projeto do sistema elétrico exige igual atenção. Este sistema é responsável pela geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica na aeronave, assim como o acionamento de algumas cargas elétricas de acordo com comandos externos ou em lógicas pré-definidas.

Se o sistema for projetado para uma carga muito maior que a consumida pela aeronave (superdimensionado) teremos geradores e cablagem maiores e mais pesados que o necessário, afetando diretamente nos custos de produção (aquisição de componentes mais caros) e nos custos operacionais. Em última instância, um sistema superdimensionado é mais pesado e por consequência teremos uma aeronave mais pesada, que implica em um consumo maior de combustível, afetando diretamente no desempenho e nos custos de operação da aeronave.

Quando uma aeronave está sendo ligada uma série de cargas elétricas precisam ser acionadas como luzes, computadores, bombas hidráulicas. Cada carga elétrica possui uma característica consumo transitório de corrente durante seu acionamento. Normalmente, as cargas possuem um consumo de corrente mais elevado no seu acionamento (*regime transitório* ou *transiente*), e depois de um tempo o consumo de corrente passa para uma região mais baixa, entrando em um estado de *regime permanente* (ou simplesmente *regime*).

O sistema elétrico, por sua vez, tem que ser capaz de suportar estes transientes de corrente. Projetar um sistema que suporte o acionamento simultâneo de todas as cargas não é uma boa solução, pois implica em um sistema capaz de suportar a corrente somada do transiente de todas as cargas, que é bem maior que a corrente normal de operação da aeronave e só será utilizada em uma pequena parcela de seu tempo de operação, resultando em um sistema superdimensionado.

Uma solução melhor em termos de corrente que o sistema deve suportar consiste no acionamento das cargas em uma sequência pré-definida. Desta maneira a capacidade de carga máxima do sistema pode ser reduzida, pois apenas quando passar o transiente de uma dada carga comandamos o acionamento de outra, mantendo o consumo de corrente combinado das cargas em um nível menor que seu acionamento simultâneo.

1.1. Objetivos

Quando temos um conjunto de cargas elétricas alimentadas por um mesmo fornecedor de energia, a corrente fornecida é a soma das correntes individuais consumidas por cada carga elétrica (Nilsson, 1996). Um dos parâmetros utilizados para o dimensionamento do sistema elétrico é a maior corrente consumida durante a operação do sistema, pois esta corrente, mesmo que de pequena duração, deve ser suportada pelo sistema. Chamemos este parâmetro de *corrente de pico* de um sistema elétrico. Este conceito também pode ser empregado a uma parte do sistema, como o conjunto de cargas em um barramento.

A corrente de pico influencia diretamente na dimensão dos geradores e cablagem. Estamos considerando que no transiente de acionamento de cada carga elétrica o consumo de corrente tende a ser maior ou igual que no seu regime. Assim, durante o acionamento combinado de uma série de cargas temos o maior consumo da corrente total do sistema.

Problema atacado: Determinação da ordem de acionamento de um conjunto de cargas elétricas de maneira que a corrente de pico do sistema seja minimizada. A determinação desta ordem está sujeita a restrições de precedência nas cargas, isto é, temos restrições para que uma dada carga só possa ser acionada após outras cargas específicas o terem sido. Também estamos considerando que o acionamento é sequencial, ou seja, uma carga só é acionada após as correntes das cargas já ligadas anteriormente terem atingido o seu valor de regime.

As restrições de precedência são importantes quando para um subconjunto das cargas temos que obedecer a uma ordem de acionamento. Por exemplo, uma servo-válvula só poder ser acionada após a bomba que alimenta a linha hidráulica estar em funcionamento; ou só é interessante ligarmos um consumidor de um sinal (computador) após seu produtor (sensor) estar em funcionamento.

Este algoritmo deve ser utilizado como uma ferramenta para auxiliar o projeto do sistema elétrico. Como a resolução do problema de determinar esta ordem de acionamento consiste em apenas um passo do projeto, mais importante que a obtenção da melhor solução possível é obtermos uma boa solução em um tempo razoável, pois podemos ter que resolver instâncias deste problema várias vezes. Se, por exemplo, for empregada uma técnica de MDO (Multidisciplinary Design Optimization - Projeto com Otimização Multidisciplinar) (Alexandrov, 1997) no projeto do sistema, pode ser necessário que este problema seja resolvido milhares de vezes.

Por se tratar de um problema de ordenação com estrutura não-linear descontínua, optamos por desenvolver um algoritmo ao invés de empregarmos algoritmos tradicionais de otimização. Buscamos tirar proveito da estrutura do problema para obter um método eficiente de resolução e assim atingir nosso objetivo de tempo de cômputo razoável.

2. REPRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Consideramos que o sistema elétrico possui N cargas enumeradas $\{1, \dots, N\}$, conectadas a uma fonte comum de energia. Esta fonte pode ser, por exemplo, um gerador, um grupo de geradores, uma bateria ou um barramento. A configuração do sistema em estudo constitui em apenas uma fonte de energia e nas cargas elétricas conectadas a ela. Geralmente sistemas elétricos aeronáuticos reais possuem mais de uma fonte de energia, devido principalmente a aspectos de segurança. A restrição de nossa abordagem não implica necessariamente em perda de representatividade, pois os sistemas reais podem ser divididos em subsistemas com esta característica e então tratando a parte como se fosse o todo.

Chamamos a curva que representa o fluxo de corrente elétrica no tempo de *perfil de corrente*. Aplicamos este conceito sobre as cargas e sobre o sistema como um todo. Para uma dada carga n , seu perfil de corrente no tempo é representado pela função $l_n(t)$.

$$\begin{cases} l_n(t) = 0, & t \leq 0 \\ l_n(t) > 0, & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

O instante $t = 0$ representa o momento em que a carga é acionada, sendo que não existe nenhum consumo de corrente anterior a ele. Note que em nossa representação a carga sempre consome potência, e que em nosso sistema a carga não pode ser desligada ($l_n(t) > 0, t > 0$). Estamos considerando que o perfil de corrente $l_n(t)$ das cargas são independentes entre si, isto é, o perfil da carga no sistema não se modifica se outras cargas tiverem sido acionadas.

De acordo com a lei de Kirchoff (Nilsson, 1996) a corrente total consumida no sistema será a soma das correntes individuais de cada carga. Então o perfil de corrente do sistema $l(t)$ em uma representação contínua no tempo é dado por

$$l(t) = \sum_{n=1}^N l_n(t - \theta_n) \quad (2)$$

onde θ_n é o instante de acionamento de uma carga n a partir de $t = 0$.

Buscamos determinar a ordem em que as cargas devem ser acionadas, então fazemos uma simplificação na representação do perfil de corrente das cargas, abstraindo o tempo da nossa expressão. Em nossa formulação consideramos que uma carga só terá seu acionamento comandado após a carga que foi comandada anteriormente ter atingido seu regime em corrente. Então, se uma carga m deve ser acionada após a carga n , temos que $\theta_m \geq \theta_n + \varphi_n$, onde φ_n é o tempo de acomodação da carga n , tempo decorrido após o acionamento da carga para ela ser considerada em regime.

Simplificamos a representação das cargas em três parâmetros: o tempo de acomodação φ_n , seu pico de corrente p_n e seu valor de regime permanente de corrente r_n . O pico de corrente p_n de uma carga n é seu maior valor de consumo

$$p_n = \max_t l_n(t) \quad (3)$$

Evidentemente estamos considerando que este pico de corrente ocorre no transiente da carga, então $\text{argmax}_t l_n(t) \leq \varphi_n$ e $p_n \geq r_n$.

O valor da corrente de regime r_n da carga n pode ser obtido por $r_n = \lim_{t \rightarrow \infty} l_n(t)$. Como nosso problema é de minimização da soma das correntes das cargas devemos considerar o pior caso, e admitindo que a acomodação da corrente deve ocorrer pouco depois de seu acionamento (não no infinito), utilizamos a corrente de regime de acordo com a expressão

$$r_n = \max_{t > \varphi_n} l_n(t) \tag{4}$$

Na Fig. 1 mostramos o perfil de corrente $l_n(t)$ para uma carga n e seus parâmetros φ_n , p_n e r_n .

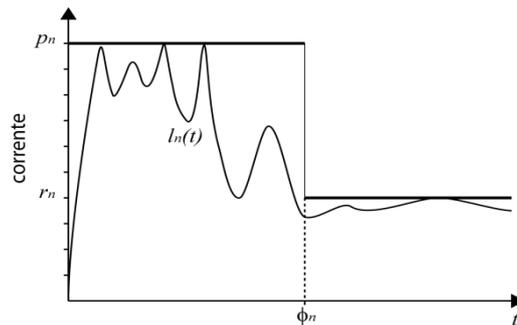


Figura 1. Parâmetros de um perfil de corrente $l_n(t)$

Para representarmos a restrição de precedência, utilizamos uma notação com um grafo $G = (V, E)$ que deve ser *direcionado acíclico*. Os vértices do grafo são as próprias cargas do sistema, $V(G) = \{1, \dots, N\}$. As arestas do grafo indicam a precedência das cargas. Uma aresta (i, j) representa que uma carga j só pode ser acionada após a carga i ter atingido seu estado de regime.

Desejamos obter uma *ordenação* para as cargas que minimize a corrente de pico do sistema. Então, chamemos de $S = (s_1, \dots, s_N)$ a sequência que representa uma ordem de acionamento em que as cargas serão ativadas. Temos então que s_1 é a primeira carga a ser acionada, s_2 a segunda, e assim sucessivamente até s_N .

O acionamento das N cargas de acordo com a sequência definida em S resultará em um perfil de correntes do sistema $I = (i_1, \dots, i_k, \dots, i_{N+1})$ para cada instante de tempo k . Em cada instante $k = 1, \dots, N$ uma carga s_k é acionada, implicando em uma corrente total consumida do sistema i_k . No instante $k = N + 1$, o valor de i_k representa a corrente de regime do sistema. A corrente do sistema em cada instante k é dada pela soma das correntes das cargas ativadas até então. Como estamos considerando que a carga em k só é acionada após a corrente da carga imediatamente anterior a ela entrar em regime, quando a carga em k é acomodada, a corrente do sistema é dada pela soma das correntes de regime de todas as cargas anteriores a k e a corrente de pico da carga em k .

Para ilustrar, utilizamos o seguinte exemplo: Considere uma instância do problema em que temos $N = 4$ cargas, com valores de correntes (p_n, r_n) das cargas $(1, 2, 3, 4)$ respectivamente $(5, 1), (4, 1), (5, 3)$ e $(2, 1)$. Considere também que as cargas serão acionadas em uma ordem inversa a de seus índices $S = (4, 3, 2, 1)$.

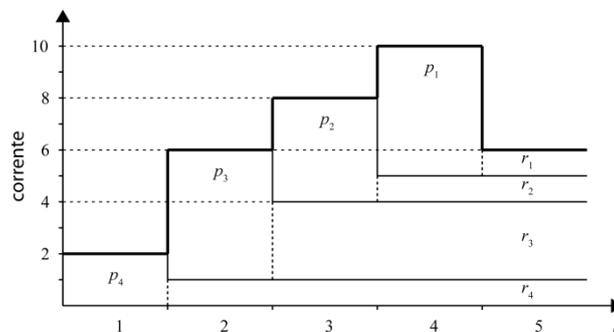


Figura 2. Exemplo de perfil de correntes para uma sequência S

A Fig. 2 ilustra o perfil de corrente do sistema de acordo com a ordem de acionamento S . Observe que no instante $k = 1$, apenas a carga 4 é acionada e temos sua corrente de pico $i_1 = p_{s_1} = p_4 = 2$. No instante $k = 2$, em que admitimos que a carga $s_1 = 4$ já atingiu seu regime e a segunda carga é acionada, temos uma corrente combinada no sistema $i_2 = p_{s_2} +$

$r_{s1} = p_3 + r_4 = 5 + 1 = 6$. Em $k = 3$ e $k = 4$ temos raciocínios semelhantes, e por fim, em $k = N + 1 = 5$ temos que $i_5 = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 1 + 1 + 3 + 1 = 6$. Assim, o perfil de corrente do sistema é $I = (2,6,8,10,6)$. Em um caso geral, cada elemento i_k de I pode ser obtido pela expressão

$$i_k = p_{s_k} + \sum_{l=1}^{k-1} r_{s_l}, \quad k = \{1, \dots, N\} \quad (5)$$

$$i_{N+1} = \sum_{l=1}^N r_l$$

Para tratar das restrições de precedência utilizamos a seguinte definição:

Definição 1 A função $\kappa_S(n) = [k \mid S_k = n]$ nos dá o valor da posição k de uma dada carga n em uma sequência S .

Podemos então escrever formalmente a restrição de precedência

$$\kappa_S(j) > \kappa_S(i) \quad \forall (i, j) \in E(G) \quad (6)$$

Do exemplo apresentado, se desejarmos restringir que a carga 4 seja acionada sempre antes que a carga 1, temos $E(G) = \{(4,1)\}$, que nos induz a restrição $\kappa_S(1) > \kappa_S(4) \Rightarrow 4 > 1$, que é verdade.

Observe que a sequência I nos dá o valor da corrente em cada instante k . Nosso objetivo é reduzir a corrente de pico global do sistema, isto é, a maior corrente consumida pelo sistema em seu acionamento completo. Portanto estamos interessados em reduzir o maior valor de I , independente dos outros valores.

Com auxílio da Eq. (5) e Eq. (6) podemos escrever a formulação do nosso problema utilizando programação matemática:

$$\min_S \left(f(S) = \max_{k \in \{1, \dots, N\}} \left\{ i_k = p_{s_k} + \sum_{l=1}^{k-1} r_{s_l} \right\} \right) \quad (7)$$

sujeito a: $\kappa_S(j) > \kappa_S(i) \quad \forall (i, j) \in E(G)$

3. ALGORITMO

Iniciamos com algumas definições que irão nos auxiliar na apresentação do algoritmo:

- $i_{max} = \max(I)$ é o valor da corrente de pico do sistema;
- k_{max} é o instante em que ocorre o pico, $i_{k_{max}} = i_{max}$. Caso mais de um elemento de I possuam valores máximos iguais $i_k = i_l = i_{max}$, $k < l$, é utilizado o elemento de I mais a direita $k_{max} = l$;
- $s_{max} = s_{k_{max}}$ é a carga de pico, que é a carga ativada no instante em que ocorre o pico de corrente do sistema;
- $S_< = \{s_k \mid k < k_{max}\}$ é o conjunto das cargas que são acionadas antes de s_{max} , chamemos os elementos deste conjunto de cargas da *esquerda*;
- $S_> = \{s_k \mid k > k_{max}\}$ é o conjunto das cargas que são acionadas depois de s_{max} , chamemos os elementos deste conjunto de cargas da *direita*.

Do exemplo apresentado na Fig. 2 temos que $i_{max} = 10$, $k_{max} = 4$, $s_{max} = 1$, $S_< = \{4,3,2\}$ e $S_> = \emptyset$.

Podemos reescrever a Eq. (5) para obtermos o valor de i_{max} como

$$i_{max} = p_{s_{max}} + \sum_{l \in S_<} r_l \quad (8)$$

O valor da corrente máxima do sistema i_{max} , que é o nosso objetivo de otimização, depende de qual é a carga s_{max} , e da ordem das cargas nos conjuntos $S_<$ e $S_>$. Se a ordem das cargas do lado direito for alterada é possível que tenhamos um pico de corrente do sistema diferente do anterior, modificando qual é a carga de pico s_{max} , a composição dos conjuntos $S_<$ e $S_>$ e em consequência, o valor de i_{max} .

Conceito do algoritmo: Para reduzir o valor de i_{max} , retiramos as cargas que estão do lado esquerdo do pico e as movemos para o lado direito. Ao retirarmos uma dada carga c do lado esquerdo, o valor da corrente de todo o perfil a direita de c , incluindo o valor i_{max} , será subtraído de r_c . Devemos então posicionar a carga c ao lado direito de s_{max} de maneira que a nova corrente de pico do sistema seja inferior a i_{max} . Quando não for mais possível mover cargas do lado esquerdo para o lado direito, o algoritmo atingiu seu ótimo local.

Para cada uma das cargas c que estão do lado esquerdo é feita uma busca no lado direito para verificar se existe uma nova posição para c que reduza a corrente de pico. As cargas do lado esquerdo podem ser verificadas em qualquer ordem. Propomos como heurística que elas sejam avaliadas em uma ordem formada de maneira decrescente dos valores de suas correntes de regime r_n , pois o maior valor de r_n resultará em uma maior redução de i_{max} (Eq. (8)).

Evidentemente, esta não será necessariamente a redução do valor da função objetivo, pois é possível que uma nova carga assuma a posição de pico.

Movimentos do perfil: Durante cada iteração do algoritmo em que movemos uma carga c de uma posição k_1 da esquerda para uma posição k_2 a direita do pico. Ocorrem três movimentos no perfil de correntes do sistema:

1. *Redução do pico:* com a remoção da carga candidata, as correntes do perfil que estão nas posições (k_1+1, \dots, N) são subtraídas do valor de r_c ;
2. *Translação:* as cargas em (k_1+1, \dots, k_2) são transladadas um passo à esquerda para (k_1, \dots, k_2-1) , ocupando a posição inicial k_1 da carga c para que ela possa ser inserida em k_2 ;
3. *Inserção de c :* a carga candidata c é inserida na posição k_2 . As correntes do perfil nas posições (k_2+1, \dots, N) são adicionadas de r_c , retomando o valor que possuíam antes de executar o primeiro movimento.

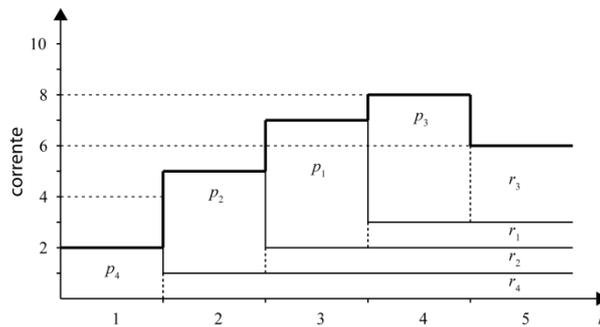


Figura 3. Exemplo de perfil de correntes após reposicionamento de carga

Para exemplificar partimos da sequência $S_1 = (4,3,2,1)$ (veja figura 2) e vamos mover a carga $c = 3$ da posição $k_1 = 2$ para o lado direito em $k_2 = 4$. Observe que devido ao segundo movimento do perfil, a carga de pico $s_{max} = 1$ vai ser movida para a posição 3, assim c vai estar a direita do antigo pico. Após esta movimentação, teremos uma nova sequência $S_2 = (4,2,1,3)$, com valores de corrente $I = (2,5,7,8,6)$. A Fig. 3 apresenta o novo perfil de corrente do sistema.

Com esta reordenação no acionamento das cargas, o valor total da corrente do sistema no acionamento da carga 1 reduziu de 10 para 7 unidades de corrente, com a diferença igual ao valor de regime da carga movida para o lado direito $r_3 = 3$. A carga do pico s_{max} deixou de ser 1 e passou a ser 3 na mesma posição $k = 4$. Principalmente, nesta iteração, reduzimos a corrente de pico de 10 para 8 unidades de corrente, gerando uma sequência S com um valor da função objetivo menor, como descrito na Eq. (7), pois $\max\{2,5,7,8\} = 8 < \max\{2,6,8,10\} = 10$.

A seguir, apresentamos o algoritmo em pseudo-código. Detalhes sobre sua formulação, assim como a justificativa, podem ser pesquisados em (Conto, 2009).

```

OrdenaCargas( )
1   $S = (s_1, \dots, s_N) \leftarrow \text{geraSoluçãoVálida}()$ 
2  faça
3    novaSolução  $\leftarrow$  falso
4     $I = (i_1, \dots, i_{N+1}) \leftarrow \text{geraPerfil}(S)$ 
5     $(i_{max}, k_{max}) \leftarrow \max[I]$ 
6     $C \leftarrow \text{geraListaDeCandidatos}()$ 
7    faça para cada  $c \in C$ 
8       $k' \leftarrow 0$ 
9       $i'_{max} \leftarrow i_{max}$ 
10     faça para cada  $k \in \{k_{max}, \dots, N\}$ 
11        $i'_k \leftarrow i_k - r_c - p_{\kappa_S(k)} + r_{\kappa_S(k)} + p_c$ 
12       se  $\max\{i'_k, (i_{max} - r_c), i_{k+1}, \dots, i_N\} < i'_{max}$ 
13         e  $\kappa_S(j) > k \forall (c, j) \in E(G)$ 
14            $k' \leftarrow k$ 
15            $i'_{max} \leftarrow \max\{i'_k, (i_{max} - r_c), i_{k+1}, \dots, i_N\}$ 
16       fim se
17     fim faça
18     se  $k' > 0$ 
19        $s_{k-1} \leftarrow s_k \quad \forall k \in \{\kappa_S(c)+1, \dots, i_N\}$ 
    
```

```

20          $s_k \leftarrow c$ 
21         novaSolução  $\leftarrow$  verdade
22         interrompe laço faça para cada  $c$ 
23         fim se
24         fim faça
25     enquanto novaSolução = verdade
26     retorne  $S$ 
    
```

Este algoritmo trata das restrições de precedência mantendo a solução sempre válida. Para cada modificação na ordem das cargas em S , o algoritmo verifica primeiro se a nova solução não irá ferir alguma restrição de precedência. Caso $E(G) = \emptyset$, i.e. não existe nenhuma restrição de precedência, qualquer solução inicial é válida, como por exemplo gerar uma sequência que ordene as cargas de acordo com seus índices $S = (1, \dots, N)$. Caso $E(G)$ não seja vazio, S pode ser gerado utilizando um algoritmo de ordenação topológica (Cormen, 2001).

4. IMPACTO DA SOLUÇÃO INICIAL NO ALGORITMO

Nesta seção estudaremos os efeitos de diferentes soluções iniciais de uma mesma instância do problema sobre o comportamento do algoritmo. Buscamos avaliar o impacto de heurísticas simples de geração da solução inicial no número de iterações do algoritmo para fornecermos um ponto de partida que leve o mais rapidamente para o ótimo.

Comparamos as seguintes possibilidades:

1. *Sem ordenação*: Primeiro executamos o algoritmo sobre o problema sem nenhum tratamento, para termos um caso base de comparação dos resultados. Utilizamos como solução inicial as cargas uma sequência de acordo com seus índices;

2. *Regime ascendente*: A solução inicial é gerada ordenando as cargas em uma sequência ascendente de acordo com seus valores de regime. Assim, se $E(G) = \emptyset$, $r_{s1} \leq r_{s2} \leq \dots \leq r_{sN}$;

3. *Regime descendente*: Ordenamos as cargas de maneira descendente em seus valores de regime. Então, se $E(G) = \emptyset$, $r_{s1} \geq r_{s2} \geq \dots \geq r_{sN}$;

4. *Pico ascendente*: As cargas são ordenadas com seus valores de pico p_n crescentes;

5. *Pico descendente*: As cargas são ordenadas com seus valores de pico p_n decrescentes;

6. *Sobrepasso ascendente*: Desta vez consideramos o sobrepasso, que para uma dada carga n , é a diferença entre seu valor de pico e de regime $p_n - r_n$. Em uma ordenação ascendente, se $E(G) = \emptyset$, $(p_{s1} - r_{s1}) \leq (p_{s2} - r_{s2}) \leq \dots \leq (p_{sN} - r_{sN})$;

7. *Sobrepasso descendente*: Consideramos também a ordenação inversa da apresentada no item anterior. Se $E(G) = \emptyset$, $(p_{s1} - r_{s1}) \geq (p_{s2} - r_{s2}) \geq \dots \geq (p_{sN} - r_{sN})$;

Nos casos em que o grafo de precedência não é vazio, obviamente priorizamos que as restrições formuladas a partir do grafo de precedência sejam atendidas, para obtermos uma solução válida. Ainda assim, buscamos uma solução que seja o mais próxima possível às ordenações. Empregamos o algoritmo para geração de solução inicial apresentado em (Conto, 2009), utilizando estas ordenações como critério secundário.

Para a avaliação realizamos uma série de experimentos, comparando o número de iterações do algoritmo para cada um dos critérios de geração de solução inicial. Cada instância testada foi gerada aleatoriamente da seguinte maneira:

1. Os valores da corrente de pico foram distribuídos uniformemente até um limite de 100 unidades de corrente, $0 < p_n \leq 100$, $n = 1, \dots, N$;

2. Um parâmetro de controle $0 < q \leq 1$ do grau de severidade da instância determina qual deve ser a proporção máxima entre o valor de regime e o pico de cada uma das cargas da instância;

3. O valor de regime para cada carga da instância foi gerado aleatoriamente como seu limite superior em função do pico daquela carga e o grau de severidade da instância: $0 < r_n \leq (q \cdot p_n)$, $n = 1, \dots, N$.

Em nossos testes geramos conjuntos de instâncias com 10, 20, 50 e 100 cargas. Cada conjunto possui 1.000 instâncias, com valores de q gerados aleatoriamente com distribuição uniforme entre 0 e 1. Os testes foram realizados com grafos acíclicos também gerados aleatoriamente com densidades $|E(G)| = 0, N, 2N$ e $5N$. Também realizamos testes com densidades do grafo menores que N ($N/8, N/4, N/3, N/2$) e muito maiores que N ($N^2/3, N^2/2$), mas não apresentamos seus resultados nesta dissertação por eles não terem sido significativamente diferentes dos já apresentados. Ao todo foram testadas 40.000 instâncias utilizando as 7 heurísticas de ordenação, resultando em 280.000 chamadas do algoritmo de otimização.

Para gerar um grafo direcionado acíclico aleatório seguimos o seguinte procedimento: dado uma sequência de trocas $T = (t_1, \dots, t_N)$ formada por uma ordenação aleatória dos índices $\{1, \dots, N\}$, para cada aresta que desejamos inserir no grafo, geramos aleatoriamente com distribuição uniforme dois valores $i \in \{1, \dots, N-1\}$ e $j \in \{i+1, \dots, N\}$ e inserimos no grafo a aresta (t_i, t_j) . Como $i < j$, temos necessariamente que o grafo vai atender às precedências.

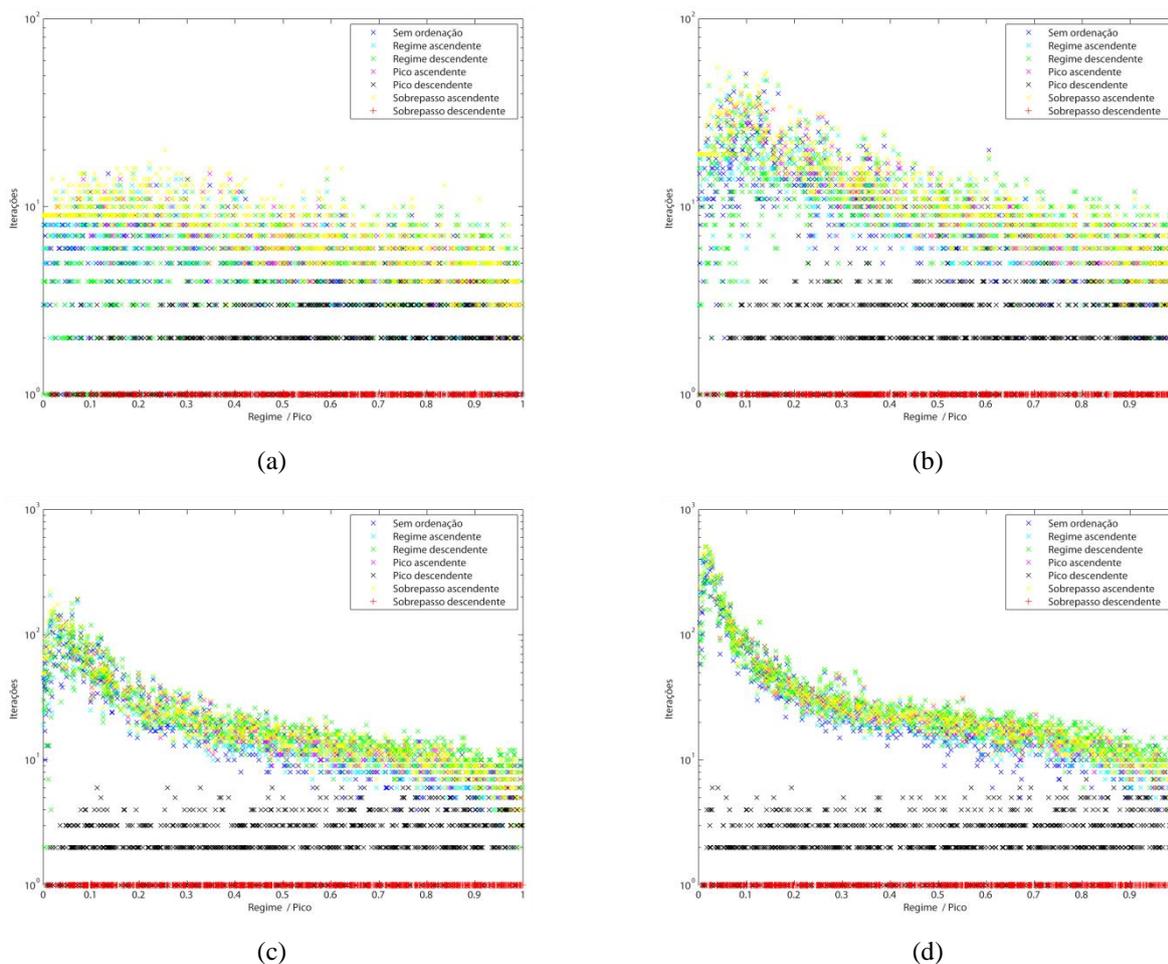


Figura 4. Impacto da solução inicial no número de iterações. 1.000 instâncias, $|E(G)| = 0$,
 (a) 10 cargas, (b) 20 cargas, (c) 50 cargas, (d) 100 cargas.

Na Fig. 4 apresentamos o número de iterações em cada categoria de solução inicial com o problema sem a restrição de precedência ($E(G) = \emptyset$) para instâncias com 10, 20, 50 e 100 cargas. Nos gráficos representamos o número de iterações que o algoritmo executou para cada critério de geração de solução inicial de cada instância do problema em relação à proporção dos valores de regime e pico da instância q . Assim para cada instância do problema, que possui um grau de severidade q , executamos o algoritmo 7 vezes, cada uma usando um critério de ordenação. Cada ponto do gráfico representa o número de iterações de uma chamada do algoritmo.

Podemos observar que em todos os casos testados, foi executada apenas uma iteração quando as cargas foram inicialmente ordenadas em uma sequência decrescente de seus valores de sobrepasso ($p_n - r_n$). A ordenação decrescente usando os valores de pico p_n também apresenta bons resultados em relação às outras heurísticas estudadas. O efeito destas ordenações é mais significativo em instâncias com mais cargas (compare os resultados com 10 e 100 cargas dos gráficos (a) e (d)). Outro aspecto é a influência da característica das cargas (razão q) no número de iterações do algoritmo. Observamos uma dificuldade maior (número de iterações) para resolver problemas em que o valor da corrente pico das cargas é muito maior que o valor de seu regime ($q < 0,3$). Chamamos a atenção ao fato de que instâncias desta natureza representam apenas um aspecto teórico, pois dificilmente teremos cargas com valores de sobrepasso tão elevados em um sistema real.

Em seguida, analisamos o impacto da solução inicial em instâncias com restrições de precedência ($|E(G)| = 0, N, 2N$ e $5N$). Apresentamos os resultados das instâncias com 100 cargas, pois os efeitos das ordenações são mais visíveis, entretanto estes efeitos também podem ser observados nos problemas de outras dimensões.

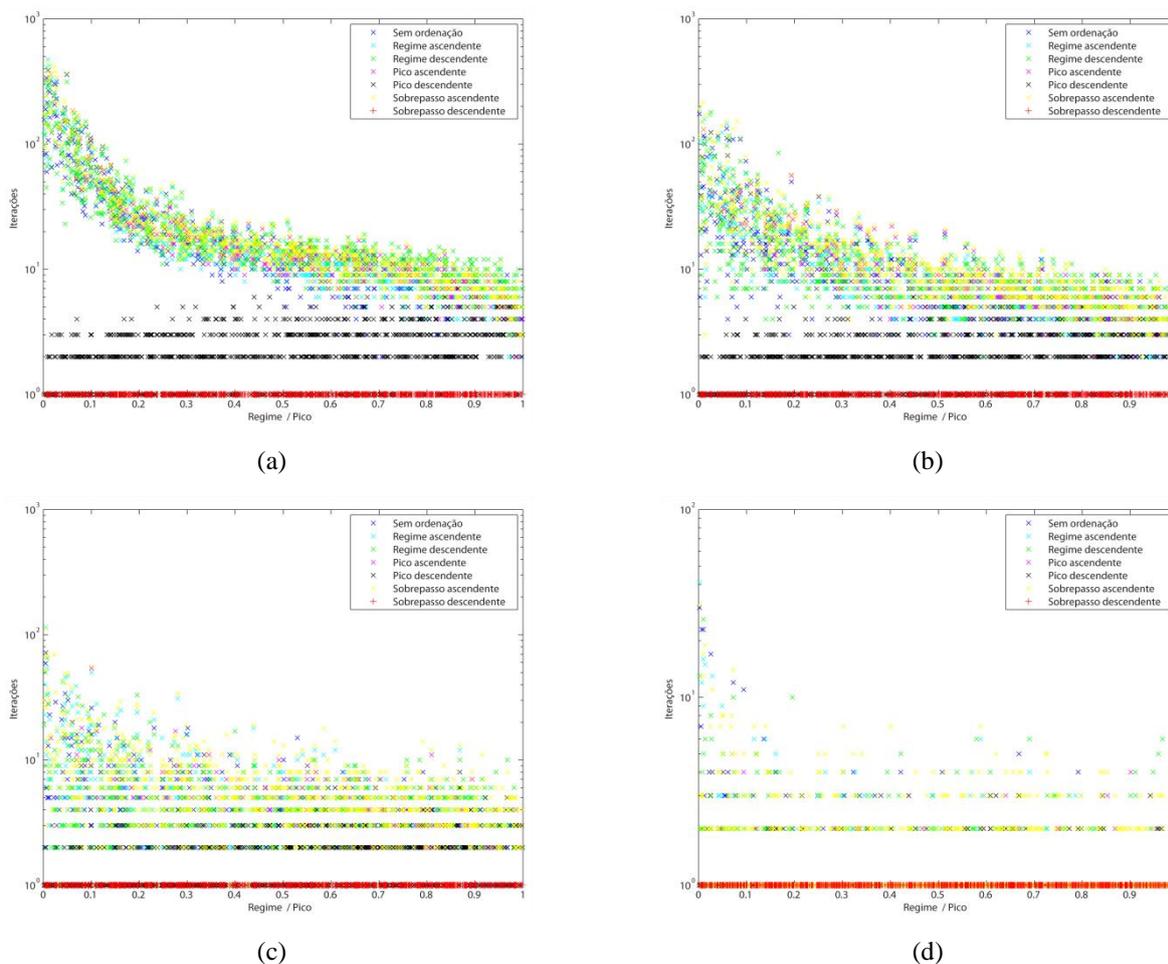


Figura 5. Impacto da solução inicial no número de iterações. 1.000 instâncias, 100 cargas.
 (a) $|E(G)| = 100$, (b) $|E(G)| = 200$, (c) $|E(G)| = 300$, (d) $|E(G)| = 500$

Na Fig. 5 apresentamos o número de iterações em cada categoria de solução inicial para 4 densidades no grafo de restrições de precedência: 100, 200, 300 e 500 arestas. Podemos observar que as conclusões tiradas a partir das observações com o grafo vazio sobre o efeito das ordenações no número de iterações do algoritmo se mantêm nas instâncias do problema com restrições de precedência. A ordenação decrescente pelo valor de sobrepasso gerou soluções ótimas em todas as instâncias testadas e a mesma ordem aplicada utilizando o valor de pico nos leva a soluções que necessitam de poucas iterações para atingir o ótimo. Podemos observar também que conforme a densidade do grafo aumenta, há uma redução significativa no número de iterações do algoritmo. Isto ocorre porque com grafos muito densos no número de arestas não existem muitas alternativas soluções, e o algoritmo não entra em ramos de soluções inválidas. No caso extremo, um grafo com $(N^2 - N)/2$ arestas apresenta apenas uma solução que atende a todas as restrições.

Os testes nos mostraram que em *todas* as 40.000 instâncias avaliadas, se colocarmos as cargas em uma ordem decrescente de seus valores de sobrepasso ($p_n - r_n$), o algoritmo executa apenas *uma* iteração, que consiste apenas em verificar que a solução inicial já é um ótimo local. Isto nos permite acreditar que possivelmente apenas esta heurística para gerar a solução nos leve a uma solução ótima local.

Outro aspecto importante observado durante os testes é que em todas as 40.000 instâncias testadas, independente da solução inicial aplicada ao algoritmo, o valor da corrente de pico do sistema na solução ótima foi exatamente o mesmo. Isto nos leva a crer que em todos os testes executados a solução gerada pelo algoritmo é um ótimo global.

Portanto, podemos acreditar que em um sistema elétrico o acionamento de um conjunto de cargas em uma sequência gerada a partir de uma ordenação decrescente de seus valores de sobrepasso, respeitando as restrições de precedência, nos leva a um perfil de corrente no sistema em que o pico de consumo seja globalmente mínimo em relação a outras sequências de acionamento de cargas.

5. CONCLUSÃO

Desenvolvemos um algoritmo eficiente para determinar a sequência de acionamento das cargas em um sistema elétrico de maneira que a corrente máxima consumida seja mínima. O algoritmo também permite impor restrições na ordem de acionamento destas cargas, que chamamos de restrições de precedência.

Este desenvolvimento consiste em uma ferramenta que pode ser usada durante o projeto de uma aeronave. Durante as fases iniciais de projeto pode auxiliar outras ferramentas para a tomada de decisões, como na escolha dos componentes do sistema. Mais à frente, pode ser usado para auxiliar a determinação o procedimento de energização da aeronave.

O algoritmo de otimização desenvolvido consiste em, a partir de uma solução válida, determinar quais são as cargas que são acionadas antes do pico de corrente do sistema, e movê-las para o lado direito do pico, eliminando assim o efeito da corrente de regime permanente daquela carga no pico de corrente do sistema. Durante esta operação, o algoritmo verifica continuamente as restrições de precedência para que a solução se mantenha sempre válida. Este algoritmo se mostrou bastante eficiente para a resolução do problema.

Testes foram realizados sobre o desempenho do algoritmo abrangendo várias características de severidade do pico de corrente das cargas, dimensões do problema e densidades do grafo de restrições de precedência. Em todos os casos testados, uma solução inicial gerada com um critério secundário de ordenação das cargas em uma sequência decrescente de seus valores de sobrepasso fez com que o algoritmo executasse apenas uma iteração para verificar que aquela solução já é ótima local. Nestes testes também observamos que em todos os casos a corrente de pico do sistema é a mesma, independente da condição inicial.

Temos então fortes indícios para acreditar que a simples ordenação decrescente do sobrepasso das cargas é uma solução ótima global para o problema que nos propusemos a resolver.

6. REFERÊNCIAS

- Alexandrov, N.M., Hussaini, M., 1997, "Multidisciplinary Design Optimization: State of the Art", SIAM, 455 p.
Conto, A.M., 2009, "Algoritmo para Otimização da Sequência de Acionamento de Cargas Elétricas em Aeronaves",
Dissertação Mestrado – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 90 p.
Cormen, T.H. et al., 2001, "Introduction to Algorithms", 2. ed., MIT Press, Cambridge, 1180 p.
Nilsson, J.W., Riedel, S.A., 1996, "Electric Circuits", 5. ed., Addison-Wesley, 983 p.

7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluso neste artigo.