



SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO E CONTROLE DE UM MOTOR A REAÇÃO

P.E.C.S.Magalhães

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte-MG, CEP 31270-901
pecsm@terra.com.br

V.V.R.Silva

Departamento de Eletricidade, Fundação de Ensino Superior de São João Del Rei, Praça Frei Orlando 170, Centro, São João Del-Rei-MG, CEP 36300-000
vvrsvilva@funrei.br

Resumo. *A propulsão a jato é um dos pilares do transporte aéreo atual. Ao longo dos anos, várias inovações foram incorporadas, aumentando a confiabilidade e melhorando o desempenho desse tipo de motor. Uma das mais recentes e marcantes inovações foi o uso de controle eletrônico, seja ele simples (EEC) ou de autoridade total (FADEC). No presente trabalho, modelou-se um motor turbojato de único spool em ambiente computacional, considerando-se sua operação em regime permanente e transiente, baseando-se em considerações de equilíbrio termo-fluidodinâmico. Cada componente foi modelado individualmente e os modelos resultantes reunidos para a obtenção do modelo final do motor completo. Em seguida, o modelo matemático obtido foi implementado em ambiente computacional, testado e validado. Após uma análise detalhada dos parâmetros do motor sob o ponto de vista do controle, passou-se à implementação do controlador e seu acoplamento ao modelo do motor. Implementado o controlador, este foi testado sob condições críticas de operação, seguindo-se sua validação e otimização através de um algoritmo genético. Os resultados revelaram que o uso do controlador permite uma operação mais suave e eficiente do motor, conjugada a um tempo de resposta menor.*

Palavras-chave: *Engenharia Aeroespacial – combustão e propulsão, Robótica e Controle – algoritmos de controle.*

1. INTRODUÇÃO

Desde a sua introdução há quase seis décadas, os motores a jato têm aumentado significativamente seu desempenho de maneira a suprir as crescentes necessidades da indústria aeronáutica, aliando alta eficiência de consumo com elevado empuxo específico. Várias gerações de motores desse tipo incorporaram evoluções a partir de soluções inovadoras, tornando possível o transporte aéreo como é hoje. Uma das principais e mais recentes evoluções incorporadas é o uso de um sistema de controle automático. Tais sistemas foram inicialmente introduzidos nos motores *turbofan* utilizados nas aeronaves produzidas no início da década de 1980 (por exemplo, os motores do Boeing 767), como uma iniciativa conjunta entre os fabricantes das aeronaves e de motores e os operadores dos aviões (linhas aéreas).

Estes sistemas de controle são de dois tipos básicos: FADEC (*Full Authority Digital Engine Control*, ou controle digital total do motor) e EEC (*Electronic Engine Control*, ou controle eletrônico do motor). Estes sistemas de controle operam de forma similar: um computador digital monitora e atua sobre certos parâmetros do motor, mantendo seu funcionamento regular e nas condições desejadas. Nos modelos mais simples (EEC's), são feitas leituras da pressão e

temperatura na entrada do compressor, rotação do conjunto de alta pressão (N2), razão de pressão do motor (EPR – *Engine Pressure Ratio*) e posição da manete de potência (*thrust lever*) na cabine. A leitura destas variáveis permite aos controles tipo EEC gerenciar precisamente o funcionamento do motor, de modo a produzir e manter o nível de empuxo selecionado, atuando apenas na unidade controladora de combustível (FCU – *Fuel Control Unit*). A atuação é feita normalmente por um servo sistema eletro-hidráulico. Isto evita disparos no conjunto móvel (*overspeed*) e temperaturas excessivas na turbina.

Nos modelos FADEC, um número maior de parâmetros do motor pode ser lido (cerca de 15 parâmetros distintos). O sistema também atua sobre mais de uma variável: além da vazão de combustível também são atuadas a posição das aletas guias de entrada (IGVs – *Inlet Guide Vanes*), válvulas de sangria de ar para a cabine e sistema de ar condicionado, aquecimento de combustível/resfriamento de óleo, dentre outras, dependendo do modelo de controlador. Além disso, nos sistemas FADEC há também a redundância de sinais, tanto na entrada como na saída, além da comunicação cruzada entre eles (*crosstalk*), visando o aumento da segurança na operação. Para funcionamento, são utilizados magnetos ligados diretamente ao motor, o que dispensa baterias, aumentando portanto a confiabilidade. Como este sistema de controle atua sobre mais de um parâmetro e é capaz de auto-calibração, dificilmente precisa ser inspecionado e aferido, o que não acontece com os sistemas de controle EEC. Além disto, modelos mais novos apresentam capacidade de armazenar dados da operação entre calibrações, o que facilita e reduz o tempo gasto em aferição.

Projetar um controlador para uma turbina pode se tornar uma tarefa difícil, visto que envolve medição e manipulação de um grande número de parâmetros com largas faixas de variação. Um exemplo seria o controle realimentado do empuxo. Deseja-se que este parâmetro seja constante para uma determinada condição de operação. Mas durante a operação do motor, em vôo, o empuxo produzido não pode ser medido diretamente. Desta forma seu valor deve ser estimado através de outro parâmetro com dinâmica semelhante. Isso implica na busca de correlações entre as variáveis que se deseja controlar e as que podem ser medidas.

2. OBJETIVO E METODOLOGIA

Neste trabalho, foi proposta a simulação de um motor a reação aeronáutico em ambiente computacional e a criação de um sistema de controle tipo EEC para este modelo, seguido de sua implementação, teste e otimização de seus parâmetros.

Para a consecução deste objetivo, foi adotada a seguinte metodologia:

- pesquisa de dados operacionais dos motores a reação de uso consagrado em aeronaves civis;
- revisão bibliográfica dos processos termo-fluidodinâmicos de projeto e de funcionamento dos motores a reação;
- desenvolvimento de um modelo matemático abrangente, considerando-se operação em regime permanente e transiente;
- avaliação dos recursos computacionais disponibilizados pelas linguagens de programação mais comuns e escolha da mais adequada ao trabalho proposto;
- implementação em ambiente computacional e validação do modelo obtido;
- análise do modelo sob o ponto de vista de controle, com vistas a se determinar quais parâmetros do motor devem ser lidos, monitorados, atuados e realimentados;
- escolha da estratégia de controle adequada;
- implementação e validação do controlador e avaliação dos resultados obtidos com seu acoplamento ao motor;
- análise de técnicas de otimização, buscando-se a mais adequada para o presente controlador;
- otimização dos parâmetros do controlador, com base em suas características e nas características desejadas para o motor;
- avaliação dos resultados e conclusões.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO MOTOR

O desenvolvimento do modelo matemático do motor considerado envolveu a obtenção de equações que permitissem uma descrição do mesmo em condições de operação em regime permanente e em condições transitórias.

3.1. Regime permanente

Para modelar a operação em regime permanente do motor a reação, foram considerados balanços de massa, energia e quantidade de movimento em cada um dos componentes do motor. As equações obtidas para cada componente foram acopladas para se chegar a um conjunto de equações que descrevesse o motor completo. O procedimento se baseia nas indicações de Oates (1998), de Mattingly et alli (1987) e de Carère (1994). Foram feitas considerações com relação a rendimentos dos componentes e do conjunto completo, condições do ar nos diversos componentes e poder calorífico do combustível. No modelo obtido, os componentes são considerados como caixas pretas, com entrada e saída relacionadas por um conjunto de equações simples. Não foram considerados, em detalhe, aspectos intrínsecos dos componentes como, por exemplo, aspectos aerodinâmicos no compressor e na turbina (como convecção, sustentação e turbulência). Tais pormenores foram avaliados na estimativa dos rendimentos de cada um dos componentes.

3.2 – Transiente

A situação de operação em transiente do motor ocorre quando uma nova demanda de potência é feita pelo piloto no *cockpit* da aeronave e o motor acelera (ou desacelera) até atingir o nível de operação desejado. Isso ocorre da seguinte forma: um valor diferente é fixado para a vazão de combustível, o que acarreta um momentâneo excesso (ou falta) de entalpia na câmara de combustão, com conseqüente aumento (queda) da temperatura na entrada da turbina. Esse aumento de temperatura se traduz em uma variação da rotação da turbina que, estando ligada ao compressor, leva-o a uma nova condição de operação, isto é novos valores de rendimento, velocidade, razão de compressão e vazão. Em um instante seguinte, essa nova vazão de ar chegará à câmara de combustão, podendo acentuar ou diminuir o efeito da temperatura causada pelo aumento na vazão de combustível. Portanto, o modelo da operação transiente deverá ser capaz de prever se o motor atingirá outro ponto de equilíbrio ou incorrerá em disparos.

Para modelar esta operação em transiente com o nível de complexidade desejado, foi admitido que a razão de expansão na turbina e seu rendimento não se alteram de forma significativa para a faixa possível de variações da vazão de combustível. Com isso, as alterações resultaram apenas em mudança da sua rotação. Conjugado a isso, foi adotado um mapa de rendimentos, razões de pressão e velocidades para o compressor (Bathie, 1995).

Finalmente, a aceleração do conjunto pôde ser determinada através da variação de energia no conjunto através do cálculo conjugado das entalpias e energias cinéticas do compressor e da turbina (entalpia, segundo Dixon, 1998).

4. IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DO MOTOR

Para a implementação do modelo matemático em ambiente computacional foi feita inicialmente uma análise das linguagens de programação disponíveis e os recursos disponibilizados em cada uma. Das alternativas avaliadas (Pascal, Fortran, C++, Matlab™), o ambiente de programação do software MATLAB™ apresentou as vantagens de disponibilizar um grande número de rotinas e funções úteis já prontas, e os recursos do módulo SIMULINK® para simulação em tempo real do modelo matemático gerado para a turbina. Além disso, este módulo oferecia ferramentas para a implementação e simulação de controladores e avaliação rápida de seus resultados.

Feita a escolha do ambiente de programação, o modelo completo foi implementado e testado. A figura (1) mostra uma representação esquemática do modelo matemático obtido:

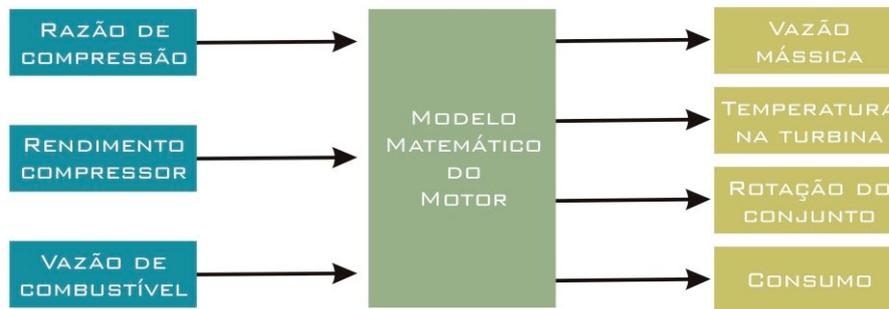


Figura 1. Modelo matemático para o motor

Para teste do modelo, foram escolhidos parâmetros diversos de motores de portes diferentes (de modelos em miniatura para aeromodelos até os motores em aeronaves tipo *wide body*), visando avaliar também a versatilidade do modelo obtido. Os resultados obtidos com o modelo se mostraram coerentes com os dados empíricos obtidos para os motores testados.

Para que se pudesse trabalhar com uma referência física real para a segunda parte deste trabalho, na qual se propõe um sistema de controle para motores a jato, foi necessário adotar um motor que já tenha sido construído e operado e cuja faixa nominal de trabalho pudesse ser facilmente verificada por simulação com o modelo. Foi escolhido o motor CJ610 da General Electric, cujos parâmetros (consumo de combustível, empuxo, dimensões, rendimentos) foram testados no modelo, mostrando excelente concordância com os valores empíricos citados por Müller, (1988) e Treager (1996).

5. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

O propósito de um sistema de controle automático em um motor a jato é se obter uma operação suave sob condições transientes (aceleração e desaceleração), independentemente da habilidade do piloto. Além disso, obtém-se uma redução expressiva no consumo de combustível (cerca de 1 a 2%, conforme Kroes et alli, 1992) em virtude do gerenciamento da unidade de controle de combustível (FCU) por parte do controlador, evitando sua abertura ou fechamento inadequados.

A implementação de um controlador para o presente modelo matemático envolveu um estudo de quais parâmetros seriam medidos e quais seriam atuados, seguindo-se uma avaliação da estratégia de controle a ser usada (PID, H-infinito), implementação, validação e otimização do controlador.

5.1 – Análise de Parâmetros

Nas condições reais de operação de um motor a jato, é deseja-se variar o empuxo seja variado, atuando-se sobre a vazão de combustível. No entanto, não se consegue medir diretamente o empuxo em condições reais de operação com o avião em vôo. É necessário, desta forma, que se busque correlações com outras variáveis mais facilmente mensuráveis. Uma sugestão interessante é dada pela própria maneira pela qual o piloto interage com os motores da aeronave: a avaliação do empuxo dos motores é feita através de indicadores da velocidade dos conjuntos móveis dos motores (*spools*) colocados no painel de comando da aeronave.

Avaliando-se o modelo matemático proposto, foi verificado que este é de fato o parâmetro mais fácil de se correlacionar com o empuxo, face às simplificações feitas com relação à operação da turbina. Além disso, as manipulações necessárias nas equações do modelo seriam mínimas, o que levou à escolha deste parâmetro.

Além da rotação, outros parâmetros do motor devem ser monitorados, tendo-se em mente a operação do motor real na aeronave: a temperatura dos gases na entrada da turbina (para se evitar o comprometimento de sua resistência mecânica) e as razões de pressão e rendimentos do compressor (visando se evitar condições de *stall* e *surge*).

Dessa forma, o controlador deve não somente controlar a vazão de combustível para o interior do motor mas também verificar se a vazão ajustada não implica em condições inadequadas de operação do conjunto. A figura (2) mostra como foi montado o sistema de controle:

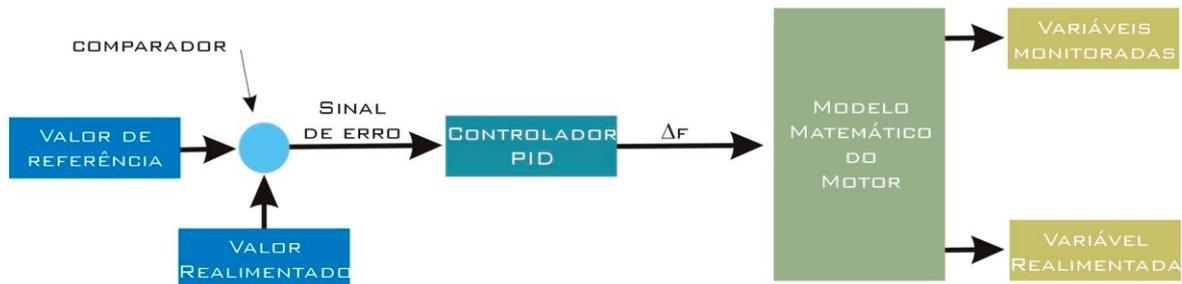


Figura 2. Conjunto motor e sistema de controle

5.2 – Considerações de controle

Para a implementação de um sistema de controle para o motor proposto, foram avaliadas duas estratégias de controle: o controle através de um sistema PID (proporcional-integral-derivativo) e o controle através de sistemas tipo H-infinito.

Em função do nível de complexidade desejado para o presente trabalho, o uso do controlador PID se mostrou mais adequada e este foi, portanto, implementado no módulo SIMULINK® do motor. O controlador assim obtido, com realimentação da rotação do motor, atua sobre a vazão de combustível. Os valores da temperatura na turbina, rendimento e razão de pressões no compressor foram monitoradas paralelamente de modo a se obter a operação satisfatória do motor.

5.3 – Teste do sistema de controle

Num primeiro momento, os parâmetros do controlador (constantes K_P , K_I e K_D) foram escolhidos arbitrariamente. Estes valores foram testados no conjunto motor-controlador e sua validação foi feita simplesmente com base na ocorrência de instabilidades na operação do motor, refletidas em oscilações bruscas e não cíclicas da rotação, e na capacidade do controlador de levar o motor a condição desejada.

6. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

A otimização do controlador do motor a reação mostrou-se um problema desafiador. Isso porque não é possível a descrição do conjunto motor-controlador por uma função (ou funções) simples que pudesse ser implementada nos algoritmos de otimização mais usuais como o método de gradientes conjugados, por exemplo.

Uma vez que não se tem disponível um conjunto de funções para descrever diretamente o controlador e o motor juntos, não se pode avaliar, também, se seu comportamento é fortemente multimodal (com vários máximos e mínimos locais). Este fato influenciou a escolha do algoritmo de otimização a ser usado. Optou-se por se utilizar um algoritmo genético simples para busca dos

valores ótimos para o controlador, em razão desse tipo de algoritmo ter menor propensão a ficar preso em pontos de máximos e mínimos locais (Soares, 1997; Penny e Lindfield, 1995).

Para se avaliar a eficiência dos parâmetros obtidos para o controlador, foi adotado o tempo de acomodação do sistema como variável a ser otimizada. Este parâmetro pode ser entendido como o tempo necessário para que a velocidade (rotação) demandada seja atingida, dentro de uma tolerância desejada, sem que ocorram instabilidades a partir desse ponto. O algoritmo para otimização dessa variável simularia o sistema motor-controlador para cada conjunto de valores de K_P , K_I e K_D e mediria o valor do tempo de acomodação como “resultado” dos parâmetros escolhidos.

O algoritmo genético de otimização foi implementado, então, tendo o número de gerações como critério de terminação. Foram considerados os mecanismos de reprodução, cruzamento e mutação e faixas de valores independentes para a pesquisa de cada um dos parâmetros do controlador, apesar de o número de bits considerado ser o mesmo para todos eles. Os valores iniciais usados baseiam-se nos sugeridos por Soares (1997) e Ferreira (1998): população de 60 indivíduos, 60% de cruzamento e 0,5% de possibilidade de mutação a cada geração. O número de gerações foi avaliado com base na condição de convergência dos resultados obtida (mais rápida ou mais lenta), lembrando-se que uma convergência muito rápida pode indicar um ponto de máximo/mínimo local. Chegou-se à conclusão que 30 a 40 gerações seriam suficientes para garantir, dada população inicial proposta, que o algoritmo não se prenderia a máximos/mínimos locais.

Na otimização realizada dessa forma, foi observado que os tempos de processamento envolvidos eram significativos: considerando-se o uso de um computador pessoal de última geração, cálculos com os parâmetros listados anteriormente e precisão de 5 bits implicavam em aproximadamente 5 horas de processamento. Além disso, a cada execução verificou-se que os resultados obtidos eram diversos, o que pode ser indicativo de um comportamento fortemente multimodal. Para solucionar o empasse, duas alternativas eram possíveis: a utilização de um algoritmo genético híbrido, que permitisse a utilização de maior precisão e de parâmetros mais abrangentes para se escapar dos máximos e mínimos locais; e a obtenção de resultados sem a modificação do algoritmo e o teste destes resultados no controlador para condições de simulações mais críticas (degraus maiores e variações em outros parâmetros de operação do motor, como as condições do ar na admissão), sendo que os valores finais seriam escolhidos com base no menor tempo de acomodação obtido. Optou-se pela segunda possibilidade, uma vez que se deseja manter a simplicidade no projeto do controlador e do algoritmo genético. Foram selecionados os 10 melhores conjuntos de valores para os parâmetros do controlador (com base no tempo de acomodação) e estes valores foram usados para simulação de condições mais críticas.

7. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A utilização de um sistema de controle para motores a reação apresentou benefícios, com base no modelo matemático e na simulação propostos. Foi observado que o motor apresenta comportamento mais estável (variações mais suaves nos parâmetros chave) quando operado com o controlador, além da vantagem adicional de se obter a velocidade final desejada em menor tempo, conforme ilustrado pela figura (3).

No procedimento de otimização, observou-se que, dentre os 10 conjuntos de valores pré-selecionados para os parâmetros do controlador, o conjunto 5 (K_P), 0,67(K_I) e 5(K_D) mostrou-se mais adequado à operação do motor.

Não foi observada nenhuma variação no consumo de combustível, nem aumento nem diminuição, ao contrário do que era esperado (esperava-se uma ligeira redução). Acredita-se que a não verificação desta expectativa se deve ao fato de o modelo descrever apenas o motor, sem modelos complementares para representar válvulas e demais acessórios do sistema de combustível.

Como sugestão para trabalhos futuros, algoritmos genéticos híbridos podem ser testados para verificar se existe algum ganho no tempo computacional (redução) e aumento na precisão dos resultados.

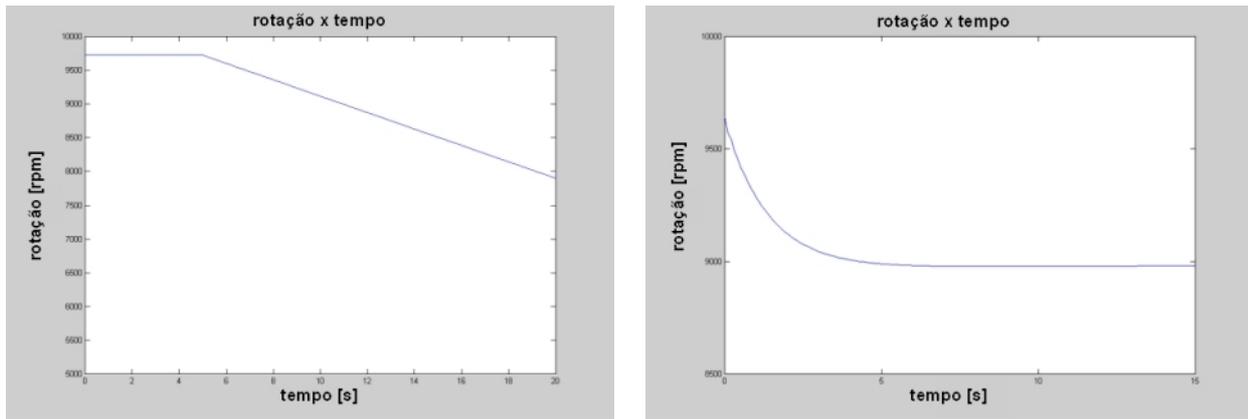


Figura 3. Comportamento da rotação do motor durante uma desaceleração (degrau) sem o controlador (esquerda) e com o uso do controlador (direita)

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a suas entidades de origem: à FUNREI – Fundação de Ensino Superior de São João Del Rei e ao DEMEC-UFMG – Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

9. REFERÊNCIAS

- Bathie, W.W. (1996). *Fundamentals of gas turbines – 2nd Edition*. Willey, New York, EUA.
- Bolton, W. (1995). *Engenharia de Controle*. Makron Books, São Paulo, Brasil.
- Carrère, A. (1994). *Éléments de propulsion*. École Nationale Supérieure de L’Aéronautique et de L’Espace, Sup’Aero, Toulouse, França.
- Dixon, S.L. (1998). *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery – 4th Edition*. Butterworth-Heinemann, Woburn, EUA.
- Ferreira, R.P.M. (1998). *Um algoritmo genético híbrido para otimização global – Dissertação de mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG – DEMEC-EEUFMG, Belo Horizonte – Brasil.
- von Gersdorff, K., Grasmann, K. and Schubert, H. (1995). *Flugmotoren und Strahltriebwerke*. Bernard & Graefe Verlag, Bonn, Alemanha.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing, Inc., Reading, EUA.
- Kroes, M.J, WILD, T.W., BENT, R.D., MCKINLEY, J.L.. (1992). *Aircraft Powerplants – 6th Edition*. Glencoe - McGraw-Hill, New York, EUA.
- Lindfield, G. and Penny, J. (1995). *Numerical methods using Matlab*. Ellis Horwood, Hemel Hempsted, Inglaterra.
- Luenberger, D.G. (1989). *Linear and nonlinear programming – 2nd Edition*. Addison-Wesley Publishing, Inc., Reading, EUA.
- Macintyre, A.J. (1997). *Equipamentos industriais e de processo*. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Mattingly, J.D., Heiser, W.H. and Daley, D.H. (1987). *Aircraft Engine Design – AIAA Education Series*. AIAA, Washington, EUA.
- Müller, R. (1997) *Luftstrahltriebwerke – Grundlagen, Charakteristiken, Arbeitsverhalten*. Vieweg, Braunschweig, Alemanha.
- Oates, G. (1998). *Aerothermodynamics of gas turbines and rocket propulsion – AIAA Education Series – 3rd Edition*. AIAA, Washington, EUA.

- Ogata, K. (1998). *Engenharia de controle moderno – 3ª edição*. Prentice-Hall do Brasil, São Paulo – Brasil.
- Soares, G.L. (1997). *Algoritmo genético: estudo, novas técnicas e aplicações – Dissertação de mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG – CPDEE-EEUFMG, Belo Horizonte – Brasil.
- Treager, I. (1996) *Aircraft Gas Turbine Engine Technology – 3rd Edition*. Glencoe – McGraw-Hill, New York – EUA.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SIMULATION OF AN AIRCRAFT ENGINE OPERATION AND CONTROL

Abstract. *An aircraft jet engine is modeled in a suitable way for computational implementation, considering both steady state and transient operation, based on mass, energy and momentum balances. The engine model is computer coded and tested under critical operating conditions. A thorough analysis is performed with a view to providing the engine with an electronic control. Engine parameters are analyzed, resulting in the choice of speed and fuel flow as controlled and actuated parameters respectively. Other parameters such as turbine inlet temperature and air flow are monitored in order to obtain proper engine operation. The controller is implemented, tested and validated. The control system parameters are then optimized with a simple genetic algorithm (SGA). Results show that a smoother operation of jet engines is obtained when control systems are used.*

Keywords. *Aerospace Engineering – combustion and propulsion, Robotics and control – control algorithms.*