

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área de Propulsão Aeroespacial e Energia.

Ronaldo Chaves Reis

FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROJETO PRELIMINAR DE TURBINAS AXIAIS

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:

Prof. Dr. Jesuíno Takachi Tomita
Orientador

Prof^ª. Dr^a. Doralice Serra
Coorientadora

Prof. Dr. John von Neumann
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Reis, Ronaldo Chaves

Ferramenta de Otimização de Projeto Preliminar de Turbinas Axiais / Ronaldo Chaves Reis.
São José dos Campos, 2021.

26f.

Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Área de Propulsão Aeroespacial e Energia – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021. Orientador: Prof. Dr. Jesuíno Takachi Tomita. Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Doralice Serra.

1. Turbina Axial. 2. Algoritmo Genético. 3. Otimização. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REIS, Ronaldo Chaves. **Ferramenta de Otimização de Projeto Preliminar de Turbinas Axiais**. 2021. 26f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ronaldo Chaves Reis

TÍTULO DO TRABALHO: Ferramenta de Otimização de Projeto Preliminar de Turbinas Axiais.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2021

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Ronaldo Chaves Reis

Rua República do Líbano, 314

12.216-590 – São José dos Campos – SP

FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROJETO PRELIMINAR DE TURBINAS AXIAIS

Ronaldo Chaves Reis

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Alan Turing	Presidente	-	ITA
Prof. Dr.	Jesuíno Takachi Tomita	Orientador	-	ITA
Prof ^a . Dr ^a .	Doralice Serra	Coorientadora	-	OVNI
Prof. Dr.	Linus Torwald	Membro externo	-	UXXX
Prof. Dr.	Richard Stallman		-	UYYY
Prof. Dr.	Donald Duck		-	DISNEY
Prof ^a . Dr ^a .	Minie Mouse		-	DISNEY

ITA

Aos amigos da Graduação e Pós-Graduação do ITA por motivarem tanto a criação deste template pelo Fábio Fagundes Silveira quanto por motivarem a mim e outras pessoas a atualizarem e aprimorarem este excelente trabalho.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Dr. Donald E. Knuth, por ter desenvolvido o T_EX.

Ao Dr. Leslie Lamport, por ter criado o L^AT_EX, facilitando muito a utilização do T_EX, e assim, eu não ter que usar o Word.

Ao Prof. Dr. Meu Orientador, pela orientação e confiança depositada na realização deste trabalho.

Ao Dr. Nelson D'Ávila, por emprestar seu nome a essa importante via de trânsito na cidade de São José dos Campos.

Ah, já estava esquecendo... agradeço também, mais uma vez ao T_EX, por ele não possuir vírus de macro :-)

*"If I have seen farther than others,
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

Resumo

Aqui começa o resumo do referido trabalho. Não tenho a menor idéia do que colocar aqui. Sendo assim, vou inventar. Lá vai: Este trabalho apresenta uma metodologia de controle de posição das juntas passivas de um manipulador subatuado de uma maneira subótima. O termo subatuado se refere ao fato de que nem todas as juntas ou graus de liberdade do sistema são equipados com atuadores, o que ocorre na prática devido a falhas ou como resultado de projeto. As juntas passivas de manipuladores desse tipo são indiretamente controladas pelo movimento das juntas ativas usando as características de acoplamento da dinâmica de manipuladores. A utilização de redundância de atuação das juntas ativas permite a minimização de alguns critérios, como consumo de energia, por exemplo. Apesar da estrutura cinemática de manipuladores subatuados ser idêntica a do totalmente atuado, em geral suas características dinâmicas diferem devido a presença de juntas passivas. Assim, apresentamos a modelagem dinâmica de um manipulador subatuado e o conceito de índice de acoplamento. Este índice é utilizado na sequência de controle ótimo do manipulador. A hipótese de que o número de juntas ativas seja maior que o número de passivas ($n_a > n_p$) permite o controle ótimo das juntas passivas, uma vez que na etapa de controle destas há mais entradas (torques nos atuadores das juntas ativas), que elementos a controlar (posição das juntas passivas).

Abstract

Well, the book is on the table. This work presents a control methodology for the position of the passive joints of an underactuated manipulator in a suboptimal way. The term underactuated refers to the fact that not all the joints or degrees of freedom of the system are equipped with actuators, which occurs in practice due to failures or as design result. The passive joints of manipulators like this are indirectly controlled by the motion of the active joints using the dynamic coupling characteristics. The utilization of actuation redundancy of the active joints allows the minimization of some criteria, like energy consumption, for example. Although the kinematic structure of an underactuated manipulator is identical to that of a similar fully actuated one, in general their dynamic characteristics are different due to the presence of passive joints. Thus, we present the dynamic modelling of an underactuated manipulator and the concept of coupling index. This index is used in the sequence of the optimal control of the manipulator.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Fluxograma do processo de design ótimo.	19
--	----

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas e Siglas

CTq	computed torque
DC	direct current
EAR	Equação Algébrica de Riccati
GDL	graus de liberdade
ISR	interrupção de serviço e rotina
LMI	linear matrices inequalities
MIMO	multiple input multiple output
PD	proporcional derivativo
PID	proporcional integrativo derivativo
PTP	point to point
UARMII	Underactuated Robot Manipulator II
VSC	variable structure control

Lista de Símbolos

a	Distância
\mathbf{a}	Vetor de distâncias
\mathbf{e}_j	Vetor unitário de dimensão n e com o j -ésimo componente igual a 1
\mathbf{K}	Matriz de rigidez
m_1	Massa do cumpim
δ_{k-k_f}	Delta de Kronecker no instante k_f

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	15
1.2	Motivação	15
1.3	Organização do trabalho	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Turbinas	17
2.1.1	Modelos de Perdas	17
2.2	Algoritmo Genético	17
2.2.1	NSGA-II	18
2.3	Otimização	18
2.3.1	Variáveis de Projeto	18
2.3.2	Função Objetivo	18
2.3.3	Restrições	19
2.3.4	Limites das Variáveis de Projeto	19
2.3.5	Modelagem	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Definição do problema	21
4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	22

5	CONCLUSÃO	23
	REFERÊNCIAS	24
	APÊNDICE A – TÓPICOS DE DILEMA LINEAR	25
	A.1 Uma Primeira Seção para o Apêndice	25
	ANEXO A – EXEMPLO DE UM PRIMEIRO ANEXO	26
	A.1 Uma Seção do Primeiro Anexo	26

1

Introdução

1.1 Objetivo

O objetivo deste projeto de mestrado é desenvolver uma ferramenta computacional para otimização de projeto preliminar de turbinas axiais, com enfoque em maximização da relação de pressão e da eficiência ao longo do seu envelope de operação.

1.2 Motivação

Turbinas desempenham papel importante quando se trata de sistemas propulsivos (aeronáuticos e espaciais) e também sistemas de geração de energia. Assim sendo, diversas nações incluindo seus milhares de cientistas e engenheiros já dedicaram recursos financeiros, temporais e computacionais ao desenvolvimento de turbinas, buscando sobretudo melhoria de sua eficiência.

É sabido que qualquer ganho na eficiência de uma turbina tem efeitos diretos na redução do consumo de combustível e uma consequente economia financeira. Tal benefício pode ser obtido também se as ferramentas utilizadas nas fases iniciais do projeto sejam mais eficientes e acelerem o anti-projeto da turbina. Surge então a demanda e a necessidade por ferramentas desse tipo.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 1 contém a introdução do trabalho, onde são expostos o objetivo e a motivação do mesmo, afim de embasar e justificar a necessidade desse trabalho.

No capítulo 2 traz a revisão da literatura em duas frentes, ao longo da apresentação da nomenclatura utilizada. A primeira é a física que descreve a turbina e seu projeto que inclui basicamente conceitos de fluido e termodinâmica enquanto que a segunda apresenta uma descrição dos algoritmos genéticos e sua metaeurística que tenta mimetizar os conceitos de evolução natural e genética.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento da ferramenta computacional, com a definição do processo de otimização.

É também apresentado no capítulo 4 os resultados obtidos para as simulações, considerando como caso de validação a turbina XX.

O capítulo 5 e último traz as considerações finais incluindo a conclusão do trabalho.

2

Revisão da Literatura

2.1 Turbinas

Uma modelagem simplificada e uni-dimensional para projetos de turbomáquinas pode produzir informações qualitativas de grande valor aos projetistas nas fases iniciais de desenvolvimento. Como exemplo, tendências específicas sobre o desempenho e funcionamento de uma turbina facilita a determinação da geometria básica da máquina (dimensões e formas), com baixo uso de recursos temporais e computacionais.

A primeira etapa é uma análise criteriosa dos requisitos e parâmetros do projeto. A análise do ciclo do motor vai fornecer informações como condições de entrada, razão de pressão, vazão e rotação.

2.1.1 Modelos de Perdas

2.2 Algoritmo Genético

De acordo com a [ref] Optimization for Engineering Design Algorithms and Examples, Algoritmos Genéticos (AG, daqui em diante) permitem uma maneira fácil de encontrar múltiplas soluções ótimas simultaneamente em uma única rodada de simulação. Em se tratando de problemas de otimização multiobjetivo, surge um conjunto de soluções ótimas conhecida como Soluções Ótimas de Pareto ou Fronteira de Pareto. Também, AG demonstra um maneira de lidar com múltiplos objetivos e ajuda a encontrar multiplas

soluções ótimas de Pareto simultaneamente.

2.2.1 NSGA-II

2.3 Otimização

[ref] Optimization for Engineering Design Algorithms and Examples

Procedimento de formulação do problema tem o propósito de criar um modelo matemático do problema de design ótimo, a fim de que possa ser solucionado usando um algoritmo de otimização.

Inicialmente, deve-se perceber a necessidade de usar uma otimização nesse problema específico de projeto. Posto isso, deve-se escolher as variáveis de projeto associadas ao problema de projeto da Turbina. Em seguida, envolver outras considerações como restrições, função objetivo e intervalo das variáveis. A figura 2.1 traz um fluxograma típico para boa definição de um problema de otimização. Uma vez definido e declarado o problema, escolhe-se qual algoritmo de otimização será usado.

2.3.1 Variáveis de Projeto

Sensibilidade de variáveis de projeto: O quão ‘importante’ é uma variável com relação a uma função objetivo. É possível que a mesma variável seja mais sensível em um aspecto do que em outro.

2.3.2 Função Objetivo

É interessante evitar, por questão de simplificação do processo computacional, o problema de otimização com várias funções objetivos. Usualmente, escolhe-se a principal delas como função objetivo e modifica-se as outras em formas de restrições do problema, deixando elas em certo um intervalo.

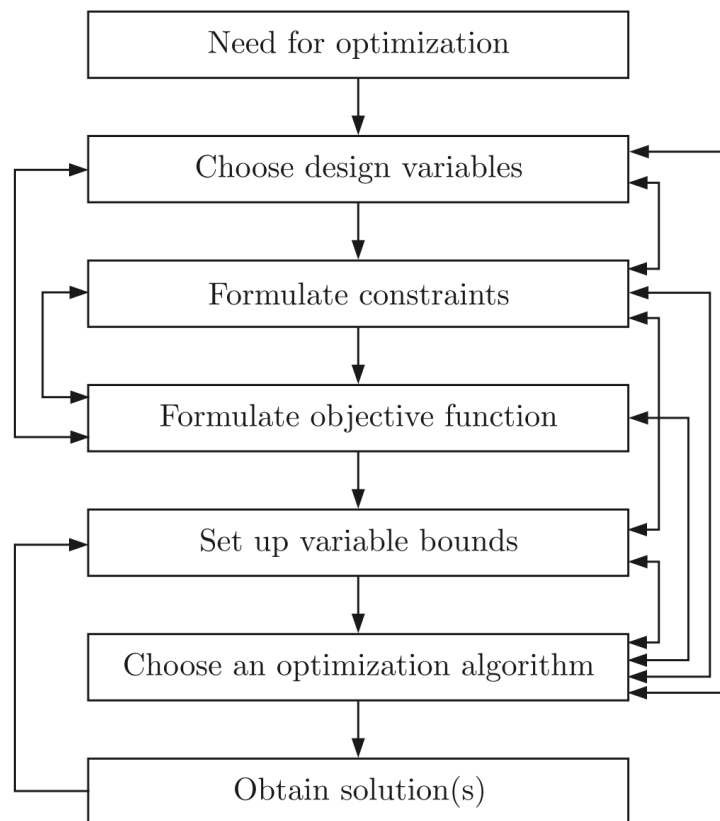


Figure 1.1 A flowchart of the optimal design procedure.

FIGURA 2.1 – Fluxograma do processo de design ótimo.

2.3.3 Restrições

2.3.4 Limites das Variáveis de Projeto

Usa-se uma primeiro chute dos limites das variáveis, considerando que a solução ótima está dentro desse intervalo. Em seguida, analisa-se o resultado da primeira simulação do algoritmo de otimização. A partir daí, faz-se os ajustes necessários no intervalo.

2.3.5 Modelagem

Normalmente, a modelagem matemática do problema de otimização não é facilmente atingível. Uma alternativa é fazer uma modificação nas equações governantes, principalmente quando se possui valores experimentais e observáveis do sistema. Assim, a formulação vai levar em consideração valores simulados *versus* valores observados, onde cria-se variáveis de projeto de maneira auxiliar (espaço de busca β , nesse caso), sendo a

função objetivo $f(\beta)$ da equação 2.1, a qual deve ser minimizada. Tal processo tem muita similaridade com a metodologia de regressão linear, onde f representa o erro.

$$f(\beta) = (E_{observado} - E_{simulado})^2 \quad (2.1)$$

De acordo com [ref] Optimization for Engineering Design Algorithms and Examples, a inclusão de variáveis de projeto artificiais frequentemente com que o entendimento do problema seja simplificado, incluindo sua modelagem matemática.

3

Metodologia

3.1 Definição do problema

A tarefa de otimização será cumprida com o uso de algoritmos genéticos, enquanto que o projeto preliminar da turbina será simplificado e uni-dimensional.

Pretende-se utilizar um estudo de caso mais simples com o objetivo de entender o funcionamento da ferramenta de otimização e familiarização do método. Tal exemplo base pode ser feito considerando apenas uma variável de projeto. Após essa fase, o processo formulado como um todo deverá ser resolvido. Pretende-se limitar a quantidade de variáveis de projeto para 3, sendo estas facilmente adimensionalizadas para fim de comparação.

4

Discussão de Resultados

Validação da metodologia utilizada com um caso mais simples

Discussão dos resultados

5

Conclusão

Conclusão

Referências

Apêndice A -

Tópicos de Dilema Linear

A.1 Uma Primeira Seção para o Apêndice

se necessário

Anexo A -

Exemplo de um Primeiro Anexo

A.1 Uma Seção do Primeiro Anexo

Algum texto na primeira seção do primeiro anexo.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO: DM	2. DATA: 25 de Março de 2015	3. DOCUMENTO Nº: DCTA/ITA/DM-018/2015	4. Nº DE PÁGINAS: 26
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Ferramenta de Otimização de Projeto Preliminar de Turbinas Axiais			
6. AUTOR(ES): Ronaldo Chaves Reis			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Cupim; Cimento; Estruturas			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Cupim; Dilema; Construção			
10. APRESENTAÇÃO: ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Área de Propulsão Aeroespacial e Energia. Orientador: Prof. Dr. Jesuino Takachi Tomita. Coorientadora: Prof ^a . Dr ^a . Doralice Serra. Defesa em 12/02/2021. Publicada em 25/03/2015. <div>(X) Nacional () Internacional</div>			
11. RESUMO: Aqui começa o resumo do referido trabalho. Não tenho a menor idéia do que colocar aqui. Sendo assim, vou inventar. Lá vai: Este trabalho apresenta uma metodologia de controle de posição das juntas passivas de um manipulador subatuado de uma maneira subótima. O termo subatuado se refere ao fato de que nem todas as juntas ou graus de liberdade do sistema são equipados com atuadores, o que ocorre na prática devido a falhas ou como resultado de projeto. As juntas passivas de manipuladores desse tipo são indiretamente controladas pelo movimento das juntas ativas usando as características de acoplamento da dinâmica de manipuladores. A utilização de redundância de atuação das juntas ativas permite a minimização de alguns critérios, como consumo de energia, por exemplo. Apesar da estrutura cinemática de manipuladores subatuados ser idêntica a do totalmente atuado, em geral suas características dinâmicas diferem devido a presença de juntas passivas. Assim, apresentamos a modelagem dinâmica de um manipulador subatuado e o conceito de índice de acoplamento. Este índice é utilizado na sequência de controle ótimo do manipulador. A hipótese de que o número de juntas ativas seja maior que o número de passivas ($n_a > n_p$) permite o controle ótimo das juntas passivas, uma vez que na etapa de controle destas há mais entradas (torques nos atuadores das juntas ativas), que elementos a controlar (posição das juntas passivas).			
12. GRAU DE SIGILO: <div>(X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO</div>			