



AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA NUMA PÁ DE TURBINA DESTINADAS A GERAÇÃO DE ENERGIA

D. C. Araújo

cardim.danillo@outlook.com

Universidade de Brasília. Faculdade do Gama - CEP 72444-240 – Gama – DF – Brasil

M. V. G. Morais

mvmorais@unb.br

Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia - CEP 70910-900 – Asa Norte – DF – Brasil

S. M. Ávila

M. A. M. Shzu

avilas@unb.br

maura@unb.br

Universidade de Brasília. Faculdade do Gama (FGA) - CEP 72444-240 – Gama – DF – Brasil

Resumo. *A demanda elétrica vem crescendo a passos acelerados e as fontes alternativas de pouco impacto ambiental são opções mais atraentes sob o ponto de vista ambiental. No entanto, o custo de investimento é um fator que pesa na escolha destas novas tecnologias para a geração de energia. Desta forma, visando contribuir com as questões econômicas de projeto, o presente trabalho propõe o emprego e avaliação de técnicas de otimização para a minimização do peso de uma pá de turbina variando-se parâmetros geométricos. Para isto, será conduzida uma análise por elementos finitos no ANSYS em uma viga biapoada com o objetivo de validar a metodologia aplicada na longarina de uma pá de turbina de liga de alumínio AA6061-T6 extraída do relatório técnico de Neto et al. (2012). Variáveis de projeto serão alteradas na busca da solução ótima por meio de algoritmos de otimização disponíveis no ANSYS e MATLAB. O direcionamento ao MATLAB será conduzido através de uma interface ANSYS x MATLAB, no qual serão buscados algoritmos de programação quadrática sequencial, SQP, e o algoritmo genético, AG. Os resultados ótimos serão comparados entre si com a finalidade de avaliar o desempenho de cada um deles no problema em questão.*

Palavras chave: *Otimização, MATLAB, ANSYS, pá de turbina*

Introdução

O petróleo ainda é o mineral mais utilizado, a nível mundial, para a produção de eletricidade. No entanto, a partir da década de 1970, com a crise do petróleo, diversos países, para diminuir a dependência neste combustível fóssil, procuraram fontes alternativas para produção de energia, entre elas a energia eólica, hidrocínética e a hidroelétrica. Após a década de 1990, a preocupação ambiental levou a aplicação de políticas de incentivo ao desenvolvimento tecnológico em fontes de energias renováveis (SIMAS, 2012). Exemplo deste novo cenário aconteceu em 1997, quando inúmeros países assinaram o Protocolo de Quioto, como objetivo de diminuir a emissão dos gases do efeito estufa (GEE).

Atualmente, a energia gerada por fontes de baixo impacto ambiental tem crescido no Brasil. A eólica, que apresenta um custo de desenvolvimento e implantação elevados, tem recebido cada vez mais incentivos financeiros, (SIMAS, 2012). No cenário nacional, as perspectivas para o ano de 2015 são as melhores. Segundo o Ministério de Minas e Energia, a capacidade eólica instalada no Brasil poderá alcançar no final do ano 7.904MW, expansão de 62% em relação ao ano anterior, (BRASIL, 2015).

A energia hidrocínética, tem crescido devido a novas políticas de descentralização da distribuição de energia. Muitas comunidades, em grande parte na Amazônia, não recebem energia por estarem dispersas em áreas muito extensas e possuem uma baixa demanda, o que acaba por elevar os custos da instalação de uma rede de transmissão (Els, 2008). Nesta problemática, as turbinas hidráulicas do tipo hidrocínéticas aparecem como uma ótima solução. Elas são instaladas em rios e não necessitam de armazenamento de energia potencial em lagos artificiais com emprego de barragens e, conseqüentemente menos impacto ambiental. A primeira turbina experimental instalada no Brasil aconteceu em 1995 no município de Correntina, estado da Bahia, onde dá apoio a um posto médico (Els et al., 2003).

Os custos de implantação de algumas usinas que funcionam através de fontes renováveis ainda são muito caras. Um projeto bem pensado destas estruturas de geração de energia, de forma a garantir uma boa eficiência aliada ao menor custo de fabricação e implantação é o desejo dos especialistas e empreendedores da área. Decerto, tem-se diversas ferramentas que auxiliam na busca do melhor projeto, no entanto cada uma delas tem sua especificidade.

O número de publicações é vasto quanto se trata da aplicação dos métodos de otimização estrutural. Carvalho et al. (2006), por exemplo, comparou o desempenho de três algoritmos de otimização associados a um pacote computacional. Esta avaliação foi feita usando um modelo simples bidimensional de viga, no qual se minimizou o peso tomando-se como parâmetros os valores das frequências naturais.

Monte et al. (2013), modela uma pá de turbina eólica de material compósito no ANSYS utilizando um elemento bidimensional, SHELL91, que comporta várias camadas de materiais diferentes. O elemento tem 6 graus de liberdade em cada nó. Com o objetivo de reduzir o peso e a deformação por empenamento se altera o layout de suas camadas.

Gauchía et al. (2014), utiliza a interação ANSYS e MATLAB para otimizar um projeto de chassi de um ônibus. O objetivo é reduzir o peso das barras que compõem o chassi. Da análise de elementos finitos no ANSYS se obtém parâmetros de tensão, deslocamento, peso que são direcionados para o algoritmo genético de otimização do MATLAB, com o objetivo de minimizar o peso, variando-se as dimensões dos elementos de viga que compõe a estrutura.

Alguns trabalhos comparam o desempenho de diferentes tipos de otimizadores aplicados a um problema estrutural. Antich (2011), por exemplo, compara os resultados obtidos por um Algoritmo Genético com os obtidos pelo SQP em um problema de pressão sonora desenvolvido para sistemas acoplados vibroacústicos. Teles e Gomes (2010) faz um estudo semelhante aplicando em estruturas de treliças planas e espaciais. Souza (2009) usa o SLP e o

Algoritmo Genético em treliças planas e espaciais, impondo restrições de tensão e deslocamento.

O presente trabalho é direcionado à avaliação de cinco métodos numéricos de otimização, tais como, o Algoritmo de Zero Ordem, de Primeira Ordem, de Programação Sequencial Quadrática (SQP) e Algoritmo Genético, aplicados à um modelo de pá de turbina de liga de alumínio AA6061-T6 extraída do relatório de Neto et al. (2012). O objetivo é buscar o menor peso, variando-se parâmetros geométricos da estrutura. Primeiramente, como validação da metodologia proposta, esta avaliação será feita em uma viga bi-apoiada. A mesma avaliação é aplicada na longarina de uma pá de turbina. As influências externas que solicitam a longarina será feita por forças estáticas proposta por Neto et al. (2012). A análise de elementos finitos será conduzida pelo ANSYS, bem como a aplicação dos dois primeiros algoritmos de otimização citados. Os demais algoritmos serão tomados no MATLAB mediante sua interação com o ANSYS.

1 METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho de quatro algoritmos de otimização tomou-se, como ponto de partida, uma viga bi-apoiada de seção transversal quadrada que suporta uma carga pontual. Neste tutorial, a viga é modelada por elementos finitos de viga bidimensional com 3 graus de liberdade por nó, BEAM3, no qual se obtiveram os resultados ótimos de projeto, relacionados ao menor volume da estrutura, utilizando um otimizador de primeira ordem oferecido no pacote computacional ANSYS.

Com a validação dos resultados, partiu-se para uma pá de uma turbina tipo hidrocínética analisada por Neto et al. (2012) que considerou como representação das cargas dinâmicas de sustentação e arrasto, cargas estáticas distribuídas ao longo da estrutura. O referido autor tratou a pá como um elemento sólido, SOLID185, que possui oito nós e três graus de liberdade por nó, no entanto sua proposta não entrava no campo da otimização estrutural.

Para aplicar, no ANSYS, as cargas distribuídas sobre a longarina foi necessário interpolar os valores disponibilizados por Ferreira et al. (2013) com auxílio do Microsoft Office Excel. Os pontos dos gráficos foram aproximados por um polinômio de grau 4 e as equações encontradas foram gravadas em arquivos de extensão “.func”. Estes arquivos são abertos no ANSYS e reconhecidos através da linha de comando SFBEAM.

O presente trabalho modelou a viga e a pá, através de sua longarina, utilizando o elemento finito de viga unidimensional, BEAM188, de aproximação linear e seis graus de liberdade por nó, presente na biblioteca do ANSYS. O elemento abriga a teoria de Timoshenko, e sua escolha baseou-se no fato de ele ser mais adequado para uma modelagem de geometrias mais complexas, além de abranger aspectos da análise estrutural que costumam ser desprezados, embora que com respaldo técnico, pela teoria clássica de Euler-Bernoulli.

A mesma metodologia de análise foi aplicada aos dois modelos estruturais, no qual foram testados os dois otimizadores presentes no ANSYS, o de Zero Ordem, também chamado no software como método de aproximação por subproblema e o de Primeira Ordem; bem como dois otimizadores disponíveis no MATLAB, o SQP e o Algoritmo Genético.

O objetivo esperado é a obtenção do menor volume. Para isto tomou-se como variáveis de projeto as dimensões das seções transversais.

$$\text{Minimizar } f(b, h) = \frac{(b_1 + b_2)}{2} \cdot l \cdot h \quad (1)$$

$$\begin{aligned}\text{Sujeito a } \quad & \sigma_{\min} \leq \sigma \leq \sigma_{\max} \\ & 10 \leq (b, h) \leq 50\end{aligned}$$

Onde b e h são as dimensões da seção transversal e l o comprimento. Os modelos são restritos pela tensão, σ , e pelas dimensões b e h . A viga está sujeita a uma tensão máxima de 200Mpa e mínima de 195Mpa, e b e h devem estar entre 10mm e 50mm. A longarina está sujeita a uma tensão máxima de 207.10^6 Pa, tensão máxima admitida pela liga de alumínio AA6061-T6.

No caso da longarina, uma das dimensões foi tomada como variável de projeto, h , visto que as outras, b_1 e b_2 , estão amarradas ao espaço interno de seu revestimento e, portanto, não há margens de mudança.

Na plataforma Mechanical APDL do ANSYS, no espaço reservado a modelagem do problema de otimização, define-se as variáveis de projeto, restrição e objetivo, bem como o algoritmo que se quer utilizar. É possível também limitar o número de laços que o otimizador realiza para chegar ao resultado ótimo. Como o problema proposto é relativamente simples, poucas interações foram realizadas no processo de busca, por isto o limite de 30 imposto nada interferiu na resposta final

Os algoritmos SQP e o Genético foram buscados no MATLAB utilizando uma interface com o ANSYS. Desta forma, a análise de elementos finitos é redirecionada para o MATLAB a fim de que o otimizador opere na busca de novas variáveis que conduza a um projeto ótimo.

Para que a interação citada seja possível, é necessário criar uma função no MATLAB. Esta função precisa conter o comando “fopen” para criar um arquivo de entrada onde se é definido os valores iniciais das variáveis de projeto, “parameter.inp”. Desta forma, o ANSYS é aberto pelo MATLAB no modo *batch*. No comando responsável por abrir a plataforma ANSYS é necessário identificar o arquivo específico que programa deve executar. O arquivo .txt escolhido deve conter a modelagem de elementos finitos do problema, na linguagem ANSYS, para que seja feita a análise da estrutura.

Dentro do arquivo .txt, citado, é importante a presença do comando “/INPUT” (responsável por abrir e ler o arquivo de entrada das variáveis de projeto, “parameter.inp”) para que os valores encontrados pelo algoritmo sirvam de parâmetros para uma nova análise. E ao fim da análise, antes que o ANSYS seja fechado é necessário gravar os resultados em arquivos, para que o MATLAB possa disponibiliza-los para o usuário. O fluxograma apresentado na Figura 1, ilustra bem todo o procedimento de interface entre os dois programas.

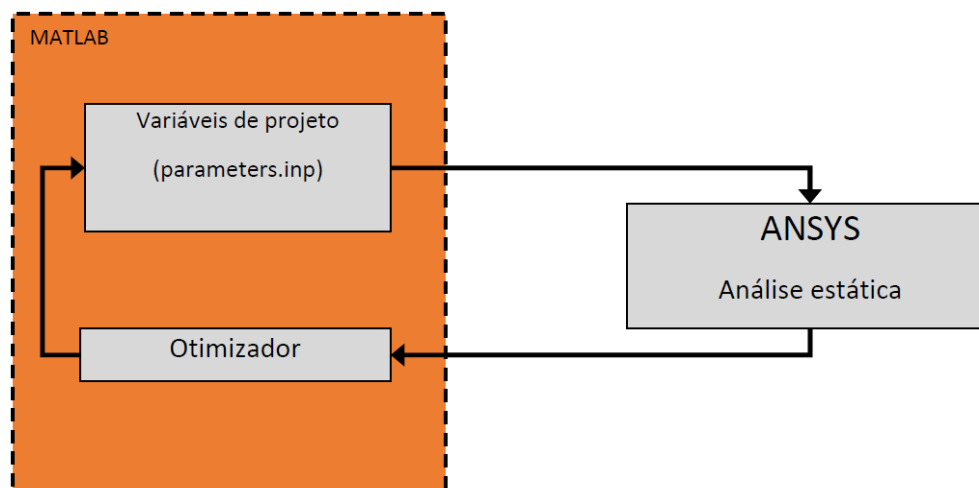


Figura 1 - Interação ANSYS-MATLAB

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O primeiro modelo para a análise proposta trata-se de uma viga bi-apoiada de seção transversal quadrada e com uma carga concentrada como mostra a Figura 2.

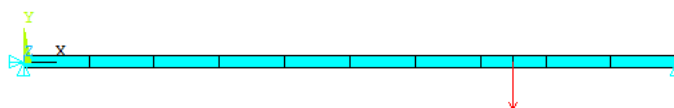


Figura 2 – Modelo 1: Viga bi-apoiada com carregamento concentrado num nó

A viga possui 1 m de comprimento e tem seção transversal com largura e altura de 0,02 m. Uma força concentrada de -2000 N atua à 0,75 m do primeiro apoio. O material tem módulo de elasticidade 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

O segundo modelo representa a pá de uma turbina através da geometria de sua longarina. A pá de liga de alumínio AA6061-T6, foi apresentada por Ferreira et al. (2013). Neto et al. (2012) consideraram, para a pá de Ferreira et al. (2013), a atuação de cargas estáticas para representar as cargas dinâmicas de sustentação e arrasto que surgem durante o movimento das pás. Desta forma, a condução de suas análises estruturais produziram resultados importantes para seu relatório técnico.

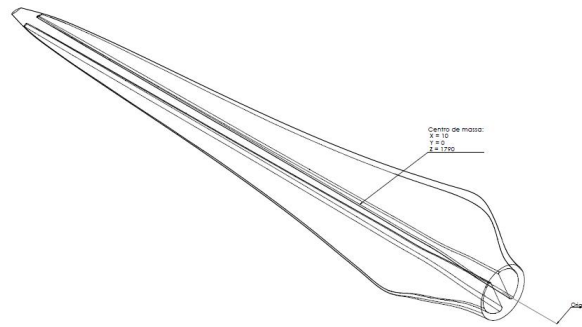


Figura 3 - Pá de turbina tipo (Ferreira et al., 2013)

Ferreira et al. (2013) modelou a pá considerando todos os elementos que formam a estrutura. Aqui, a proposta é trabalhar apenas com a longarina de liga de alumínio, visto que é ela que absorve os grandes esforços.

A longarina tem 4,9 m de comprimento. A seção transversal ao longo da longarina é retangular e possui uma altura constante, h , igual a 0,08 m. No engaste a largura da seção transversal, b_1 , é igual a 0,315m, enquanto na extremidade livre, b_2 , ela é de 0,02 m. As propriedades da liga de alumínio são: módulo de elasticidade de 68,9 GPa, coeficiente de Poisson de 0,33 e tensão de ruptura de 310 MPa, Neto et al. (2012). A Figura 4 ilustra a longarina analisada.

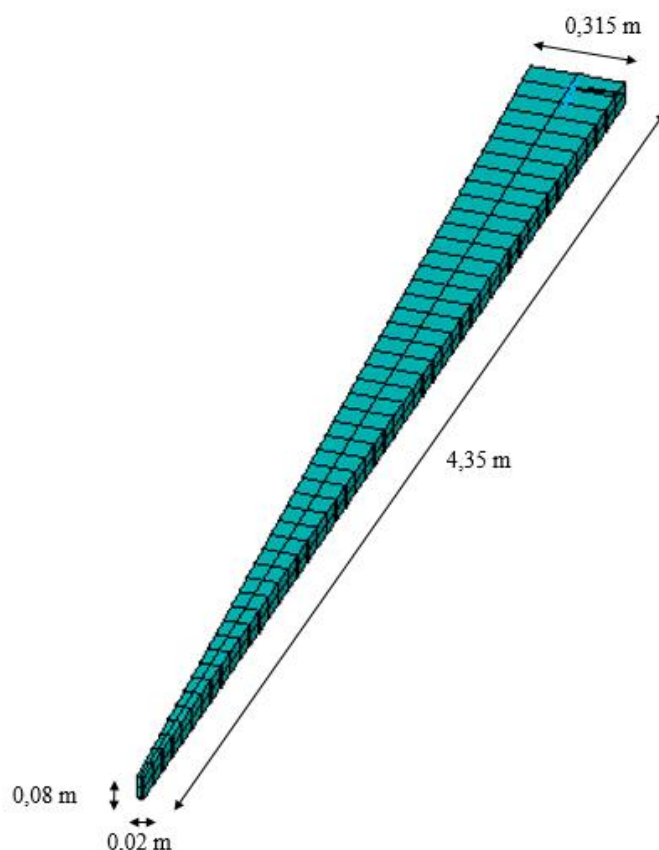


Figura 4 - Modelo simplificado da longarina.

Sendo assim, a longarina foi modelada como uma viga engastada-livre submetida a ação de cargas estáticas distribuídas, na direção normal e tangencial, simulando os esforços de arrasto e sustentação, ao longo de todo o seu comprimento conforme adotado por Ferreira et al. (2013). A Figura 5 exemplifica o problema abordado neste trabalho. Onde B é a dimensão da base da longarina e as setas elucidam as componentes resultantes da carga aerodinâmica atuante na pá. A carga de sustentação é a parcela orientada na direção perpendicular a direção do giro da pá, eixo X, e a carga de arrasto está orientada na direção paralela ao movimento, configurando como uma força de atrito na estrutura, eixo Y.

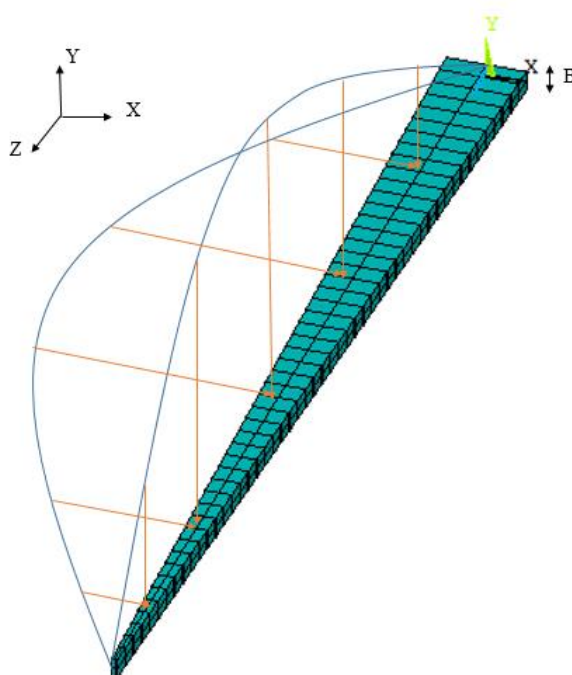


Figura 5 – Problema proposto no trabalho.

A Figura 6 e 7 reproduz as intensidades das cargas utilizadas por Neto et al. (2012).

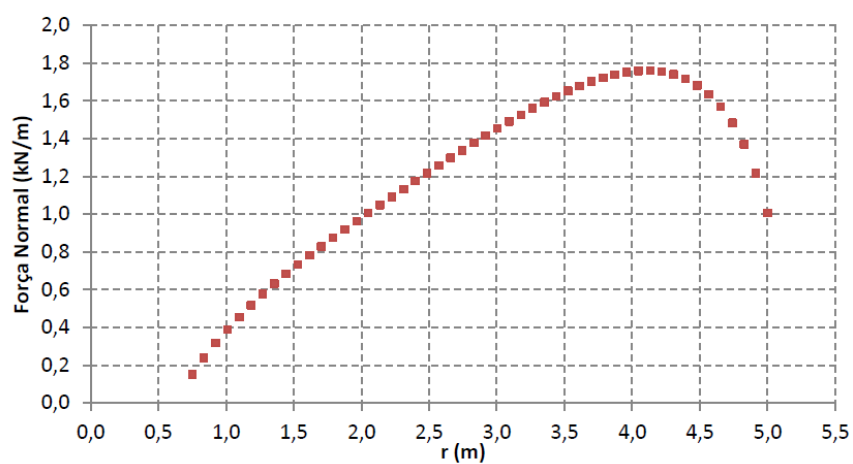


Figura 6 - Força Normal (Neto et al., 2012)

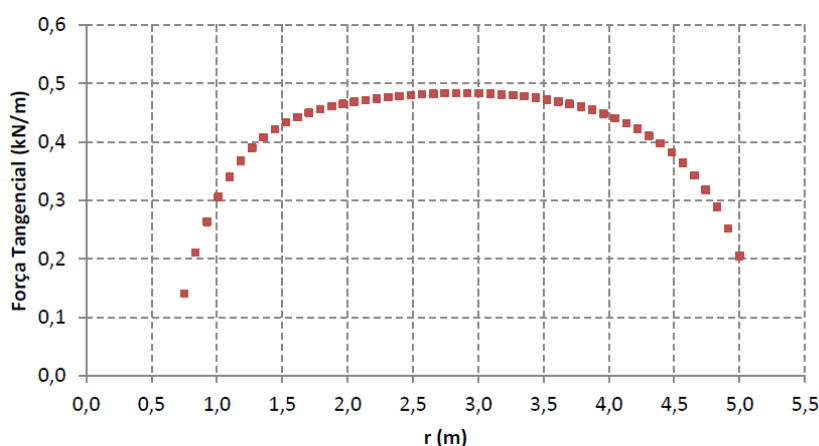


Figura 7 - Força tangencial (Neto et al., 2012)

2.1 Otimizadores

2.1.1 Método de Aproximação por Subproblema

Este método pode ser descrito como um método avançado de ordem zero, que requer apenas os valores das variáveis dependentes, e não as suas derivadas. Existem duas características importantes deste método, tais como, a utilização de aproximações para as variáveis de estado de função e objetivos, e a conversão do problema de otimização restrita em um problema sem restrições. No final de cada ciclo, um cheque de convergência é feita. O resultado final não indica necessariamente que um verdadeiro mínimo global foi obtido. Portanto, é sua responsabilidade determinar se o projeto foi suficientemente otimizado (Ansys Mechanical APDL Element Reference, 2010).

2.1.2 Primeira Ordem

O método de primeira ordem converte o problema para um sem restrição, adicionando funções de penalidade para a função objetivo. No entanto, ao contrário do método anterior, a representação real dos elementos finitos é minimizada e não aproximada. O método de primeira ordem utiliza gradientes das variáveis dependentes no que diz respeito às variáveis de projeto. Para cada iteração, os cálculos dos gradientes (que podem empregar um método de descida mais íngreme ou de direção conjugada) são realizados a fim de determinar a direção de busca, e uma estratégia de busca linear é adotada para minimizar o problema irrestrito (Ansys Mechanical APDL Element Reference, 2010).

2.1.3 Programação Quadrática Sequencial (SQP)

Problemas de otimização podem ser resolvidos através de métodos de programação não-linear baseados em gradientes. O SQP é um desses métodos, o qual, consiste na aproximação sequencial do problema de programação não-linear como um problema de programação quadrática. Como em todos os métodos baseados em gradiente, o SQP, durante o processo de busca da solução ótima, necessita de calcular as derivadas tanto da função objetivo como das restrições (Teles, 2010).

Ao contrário de outros métodos que tentam converter o problema em uma sequência de subproblemas de otimização sem restrições, o SQP tenta resolver o problema de otimização iterativamente, onde a solução em cada passo é obtida pela solução de uma aproximação do problema não-linear onde o objetivo é substituído por uma aproximação quadrática e as restrições não-lineares e são substituídas por aproximações lineares. O método SQP, a cada iteração, resolve o seguinte problema de programação quadrática:

$$\begin{aligned} \min \nabla^T f(x^k)d + \frac{1}{2} d^T H(x^k, \lambda^k, \mu^k) d \\ \text{Sujeito a } \begin{cases} h(x^k) + \nabla^T h(x^k)d = 0 \\ g(x^k) + \nabla^T g(x^k)d = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

para determinar a melhor direção de busca a partir do ponto (x_k) e então proceder a atualização para o próximo ponto $x^{k+1} = x_k + a_k d^k$.

Nas interações principais do método SQP uma aproximação da Hessiana, da função Lagrangeana é obtida utilizando um método de atualização quase-Newton. Logo a Hessiana é usada para gerar um subproblema QP cuja solução serve para formar uma direção de busca num procedimento de procura unidimensional.

2.1.4 Algoritmo Genético

Os métodos baseados em derivadas necessitam que as funções sejam contínuas e diferenciáveis podendo ficar preso a mínimos locais, limitando seu domínio de aplicação. Os Algoritmos Genéticos, por sua vez, podem trabalhar tanto com codificação contínua como variáveis discretas e não necessita que as funções sejam diferenciáveis. Apresentam um conjunto de procedimentos e técnicas baseadas e estruturadas no princípio da evolução genética dos seres vivos observados na natureza, onde os seres evoluem através da reprodução, seleção e mutação (Antich, 2011).

O algoritmo foi proposto pelo biólogo John Holland em 1975 na Universidade do Michigan, e posteriormente foi utilizado por Goldberg e Samtani, em 1986, para otimização estrutural usando variáveis discretas. A idéia básica é transformar uma população inicial de indivíduos em uma nova geração mais apta. Cada indivíduo da população representa uma possível solução do problema de otimização, sendo representado por um conjunto de genes denominado “cromossomo”.

Principais definições sobre o Algoritmo Genético, segundo Goldberg, (1986).

Cromossomo. Cadeia de caracteres representando alguma informação relativa às variáveis do problema. Cada cromossomo representa deste modo uma possível solução do problema

Gene. Unidade básica do cromossomo. Cada cromossomo tem certo número de genes, cada um descrevendo uma variável de projeto.

População. Conjunto de cromossomos ou soluções.

Geração. O número de interações que o algoritmo genético executa.

Operações genéticas. Operações que o algoritmo genético realiza sobre cada cromossomo.

O Algoritmo Genético, primeiramente, gera uma população, na forma de cromossomos, que pode ser considerado o conjunto de possíveis soluções do problema. Então esta população é avaliada, recebendo uma nota, levando-se em consideração sua capacidade de adaptação. Parte dos indivíduos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Os remanescentes da seleção podem sofrer modificações através de mutações e cruzamentos ou recombinação genética gerando descendentes. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada (Souza, 2009).

Este método de otimização difere-se dos demais principalmente por: trabalhar com parâmetros codificados, normalmente em base binária, e não diretamente com os valores destes parâmetros; utiliza um conjunto de indivíduos ou cromossomos para fazer sua busca, diferente de outros métodos que usam um valor único; para gerar a maximização ou minimização é usado diretamente a função objetivo, enquanto outros métodos utilizam gradientes; e usa regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

2.2 Resultados e discussões

Neste item são apresentados os resultados obtidos pelos dois modelos estruturais apresentados. A Tabela 1 mostra os projetos ótimos obtidos pelos quatro otimizadores utilizados para a viga bi-apoiada, onde b e h são as dimensões retangulares da seção transversal da viga.

Tabela 1 - Resultados da viga bi apoiada

Otimizadores	Parâmetros iniciais	Zero ordem	Primeira ordem	SQP	Algoritmo Genético
b (mm)	20	19.968	13.24	10	10.009
h (mm)	20	26.738	29.16	33.5420	33.527
Volume (mm ³)	400000	474028.3	386078.4	330542.0	335557.1

A tabela apresentada mostra um esperado desempenho dos otimizadores utilizados para o referido problema. Os otimizadores disponíveis no ANSYS, zero ordem e primeira ordem, foram pouco eficientes quando comparados com os demais. O algoritmo de zero ordem, em 8 interações, não conseguiu minimizar o volume, seu resultado teve um aumento de 18,5% do valor inicial, no entanto ele conseguiu direcionar o problema para uma região viável. O algoritmo de primeira ordem reduziu o volume em 3,48%, bastando percorrer 25 interações, embora se observe que o otimizador parou num mínimo local.

Estes resultados ratificam o método de busca destes algoritmos, por exemplo, o de zero ordem trabalha com aproximações e não utiliza gradiente, o que significa que o resultado pode não ser o mínimo global do problema. O de primeira ordem mostrou melhores resultados, o que se deve ao fato de aplicar o gradiente nas variáveis dependentes com relação as variáveis de projeto. Este método é mais preciso, embora não ofereça a garantia de atingir um mínimo global, como se observa nos resultados tabelados.

O SQP e o Algoritmo Genético foram os que apresentaram melhores resultados. O SQP reduziu o volume em 17.36%, com cinco interações, e o Algoritmo Genético em 16.11%. O

SQP utiliza gradiente para busca da solução, deste modo teve melhor eficiência. O Algoritmo Genético alcançou resultados próximos, porém o tempo de execução do algoritmo foi consideravelmente maior do que os outros. Foi utilizado uma população de 100 indivíduos e um total de 32 gerações. É importante ressaltar que os resultados do Algoritmo Genético sofrem influência direta do número da população escolhido, o que significa que os resultados podem ficar melhores.

A tabela 2 mostra os resultados referentes a longarina da pá, onde h refere-se a dimensão da altura da longarina. O melhor desempenho observado em todos os algoritmos pode ser atribuído ao fato do problema ter apenas uma variável de projeto, o que se leva a crer que quanto mais complexo for o problemas, maior dificuldade terão os algoritmos de cumprir com precisão seu objetivo.

Tabela 2 - Resultados da longarina da pá

Otimizadores	Parâmetros iniciais	Zero ordem	Primeira ordem	SQP	Algoritmo Genético
h (m)	0.08	0.021	0.020	0.021	0.02
Volume (m ³)	0.058	0.015	0.014	0.015	0.014

O número de interações necessárias no processo de otimização dos algoritmos foi menor do que o observado na estrutura anterior. O algoritmo de zero ordem chegou ao resultado em 5 interações, e o de primeira ordem em apenas 2. O SQP precisou de 4 interações, e o Algoritmo Genético tendo em vista o tempo de execução e a baixa complexidade da função objetivo foi escolhido uma população de 50 indivíduos e um total de 5 gerações.

2.3 Conclusões

O método de zero ordem mostrou uma incapacidade de explorar o espaço de busca, estacionando no primeiro mínimo local encontrado.

O algoritmo de primeira ordem apresentou bons resultados embora sua convergência não garanta a obtenção de um mínimo global.

O SQP, como um método determinístico, e o algoritmo genético, como um método probabilístico, apresentaram um desempenho equivalente.

É importante ressaltar que os resultados do Algoritmo Genético sofrem influência direta do número da população escolhido, o que significa que os resultados podem ficar melhores. No entanto, o algoritmo genético demanda um tempo maior na busca de um projeto ótimo.

ACKNOWLEDGEMENTS

Os autores agradecem pelo apoio do programa Pro-Amazônia: biodiversidade e sustentabilidade - Edital 047/2012 e o apoio financeiro dado pelo CNPq através do projeto Dinâmica de aerogeradores: modelagem e simulação - edital MCTI/N.74/2013 "Capacitação laboratorial e formação de recursos humanos em Energia Eólica (Linha 1)"

REFERENCES

- Ansys Mechanical APDL Element Reference, (2010) Realease 13. Ansys Inc.
- Antich, R. Comparação de métodos genéticos e sqp para otimização de resposta em frequência em sistemas vibroacústicos. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Porto Alegre. 2011.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Acesso a informação. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 27 abr. 2015.
- Carvalho, M., Vale, J., Pinheiro, L. & Neves, M. 2006. Techniques adopted in integrating structural analysis with numerical optimization. 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Porto, Portugal.
- Els, R. 2008. Sustentabilidade de projetos de implementação de aproveitamentos hidroenergéticos em comunidades tradicionais na Amazônia: casos no Suriname e Amapá. Tese, Universidade de Brasília/Brasília.
- Els, R., Belas, C. & Campos, C. 2003. Hydrokinetic turbine for isolated villages. Pch Notícias & Shp News, Itajubá, MG Brasil, v. 19. pp.24-25.
- Ferreira, G. V., Costa D. I. G., Moraes M. V. G., Neto F. L. & Miranda M. 2013. Projeto estrutural e fabricação do país. In: Brasil Junior, Antonio Cesar Pinho (Coord). Aproveitamento de energia hidrocínética em águas vertidas e turbinadas: segundo relatório parcial. [S.l.]: Eletronorte, pp. 165-201
- Gauchía, A., Boada, B., Boada, M. & Díaz, V. 2014. Integration of MATLAB and ANSYS for advanced analysis of vehicle structures.
- Goldberg, D. E., & Samtani, M. P. 1986. Engineering Optimization Via Generic Algorithms. In Proc. of the 9th Conf. Eletronic Computation ASCE, pp. 471-482.
- Monte, A., Castelli, M. & Benini, E. 2013. Multi-objective structural optimization of a HAWT composite blade. Composite Structures. ed. 106. pp. 362-373.
- Neto, F., Costa D. & Moraes, M.. 2012. Aproveitamento de energia hidrocínética em águas vertidas e turbinadas: segundo relatório parcial. [S.l.]: Eletronorte, pp. 158-171.
- Simas, M., 2012. Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada. Dissertação, Universidade de São Paulo/São Paulo.
- Souza, R. 2009. Otimização de treliças com restrições de falha combinado técnicas de programação de algoritmos contínuos e discretos. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Porto Alegre.
- Teles & Gomez. 2010. Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática sequencial para otimização de problemas em engenharia. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 15, pp. 29-39.