



PPG-EM

Faculdade de Engenharia
Depto. de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRE PARA AEROGERADOR UTILIZANDO A INTERFACE MATLAB-ANSYS

Autor:

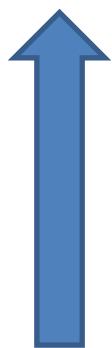
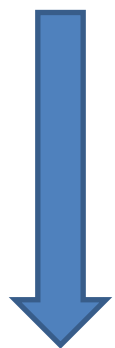
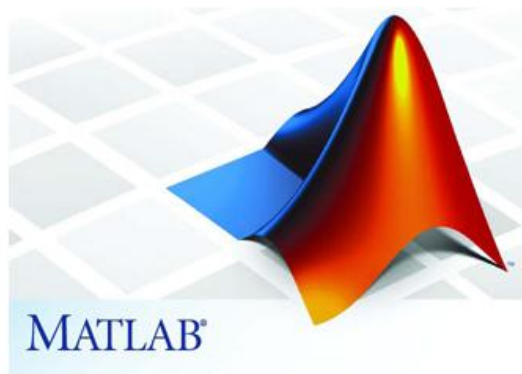
**Fernando Gonçalves
Mendonça**

fgm1991@gmail.com

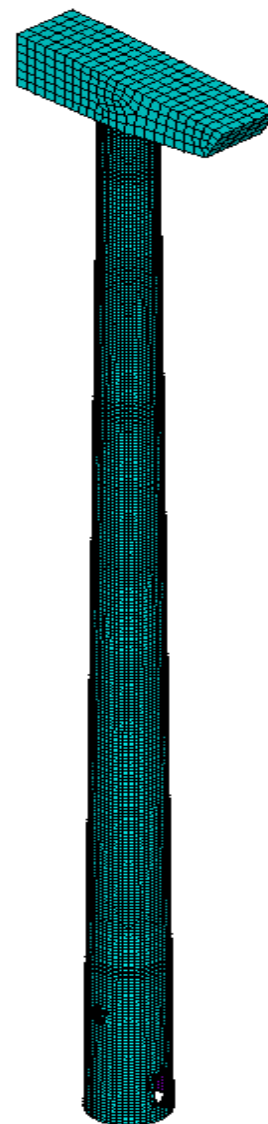
Orientadores:

Prof. Francisco Soeiro

Prof. José Guilherme



ANSYS®



Sumário

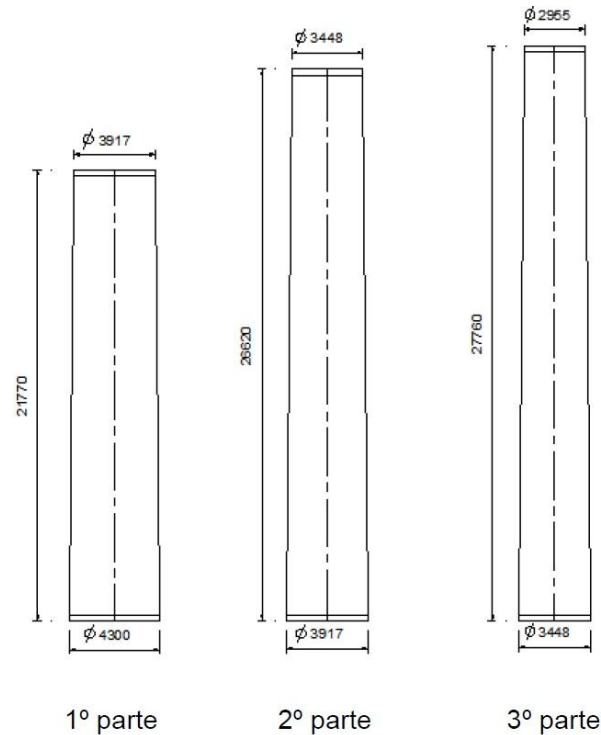
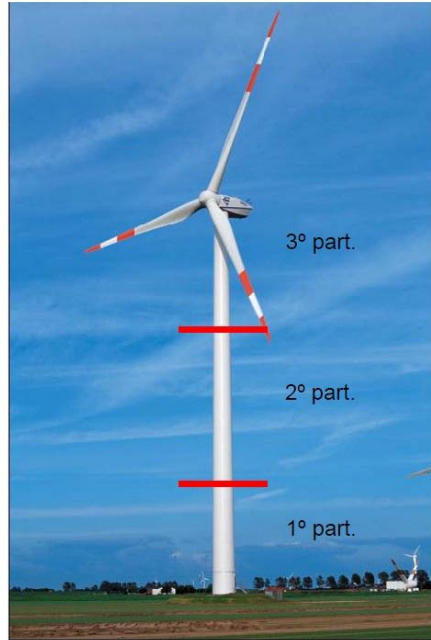
- Introdução
- Modelagem Computacional
- Análise Estática
- Otimização Estrutural
- Algoritmo Genético
- Interface Matlab-Ansys
- Resultados
- Conclusões

Introdução



- A questão energética é um dos assuntos de maior importância na atualidade
- O aproveitamento da energia do vento representa uma fonte de energia promissora
- O custo das torres representa por volta de 20-25% do valor total de uma planta de geração de energia eólica

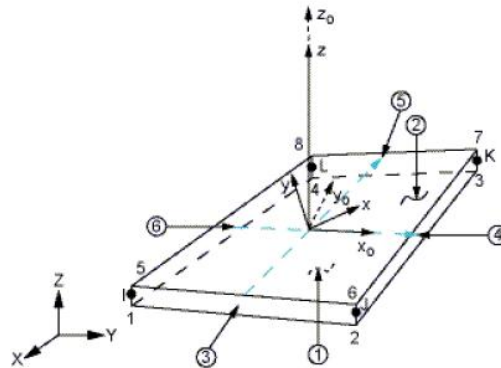
Montagem da Torre:



A torre do modelo MM92 da Repower possui um formato de um tronco cônico vazado dividido em três partes com a finalidade de facilitar o transporte e a montagem. Assim como o diâmetro interno da torre, a espessura também diminui à medida que se aproxima do topo.

Modelagem Computacional

Os modelos numéricos foram elaborados com base no método dos elementos finitos utilizando-se elementos de casca SHELL181 presente na biblioteca de elementos do programa Ansys. Este elemento é adequado para a análise de estruturas compostas por cascas que apresentem espessuras finas e médias.



O elemento SHELL181 é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó: translações nas direções X, Y e Z e rotações em relação aos eixos X, Y e Z.

O modelo da torre adotado foi constituído por 16984 nós e 17010 elementos. As malhas possuem dimensões de 0,5m. Na modelagem das aberturas das portas foram consideradas todas as suas características geométricas e também os enrijecedores. As pás das hélices, o rotor e a nacelle foram representados por um elemento de casca com densidade equivalente aos respectivos pesos.

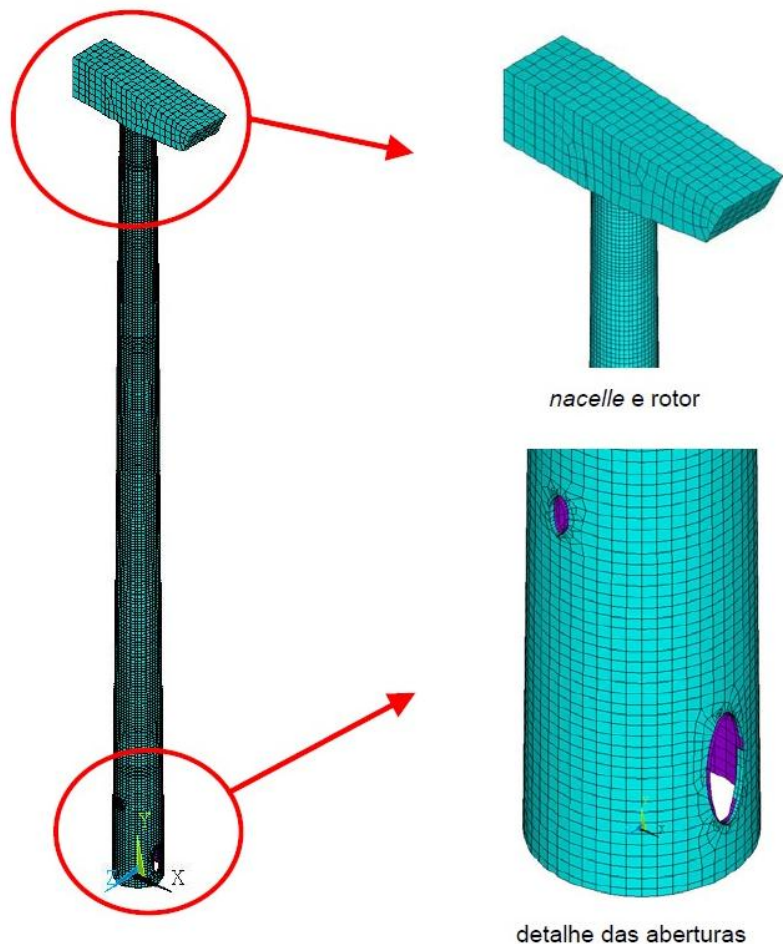
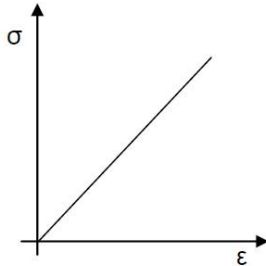


Tabela com os valores do modelo da torre

segment	D [mm]	z [m]	t [mm]
-	4300	0,00	-
1	4257	2,58	30
2	4215	4,91	30
3	4173	7,29	26
4	4147	8,80	27
5	4108	11,00	24
6	4089	12,08	23
7	4043	14,67	22
8	4004	16,88	22
9	3962	19,25	22
10	3917	21,77	21
11	3864	24,75	20
12	3816	27,50	20
13	3768	30,25	20
14	3746	31,48	19
15	3704	33,88	19
16	3671	35,75	19
17	3622	38,50	18
18	3574	41,25	18
19	3535	43,48	17
20	3492	45,88	17
21	3448	48,39	16
22	3400	51,05	15
23	3360	53,31	15
24	3330	55,00	14
25	3280	57,75	14
26	3277	58,12	13
27	3231	60,52	13
28	3182	63,25	13
29	3144	65,34	13
30	3133	66,00	12
31	3083	68,75	12
32	3034	71,50	12
33	3015	72,58	12
34	2971	74,99	14
35	2955	76,15	18

Análise Estática

Na análise estática considera-se o aço da torre como elástico.

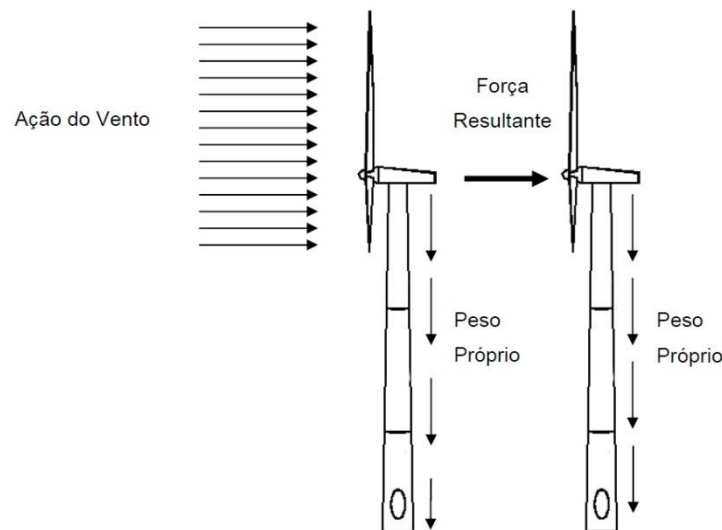


Módulo de Elasticidade: 210GPa

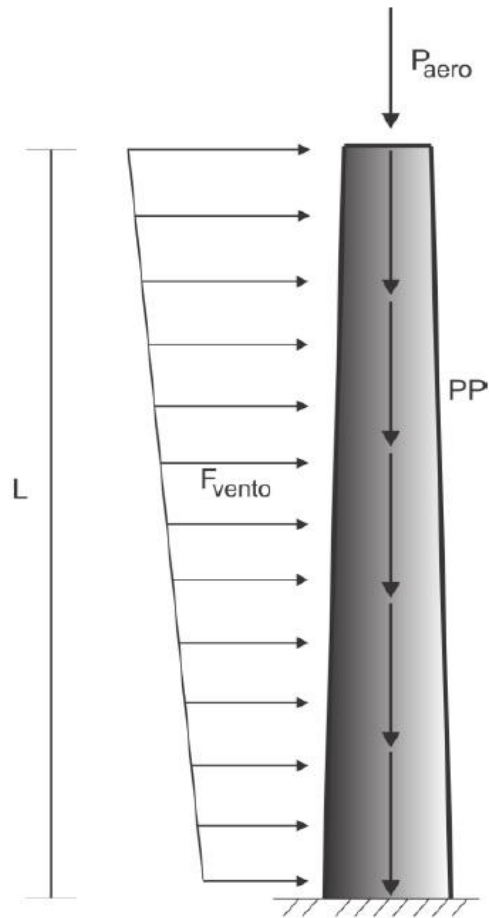
Coef. de Poisson: 0,3

Densidade: 7850kg/m³

O objetivo da análise estática foi determinar o máximo deslocamento ocorrido na torre eólica provocado por uma carga de vento distribuída na torre, e por uma carga concentrada aplicada no centro do rotor, representando a força resultante do vento atuando nas pás da hélice.

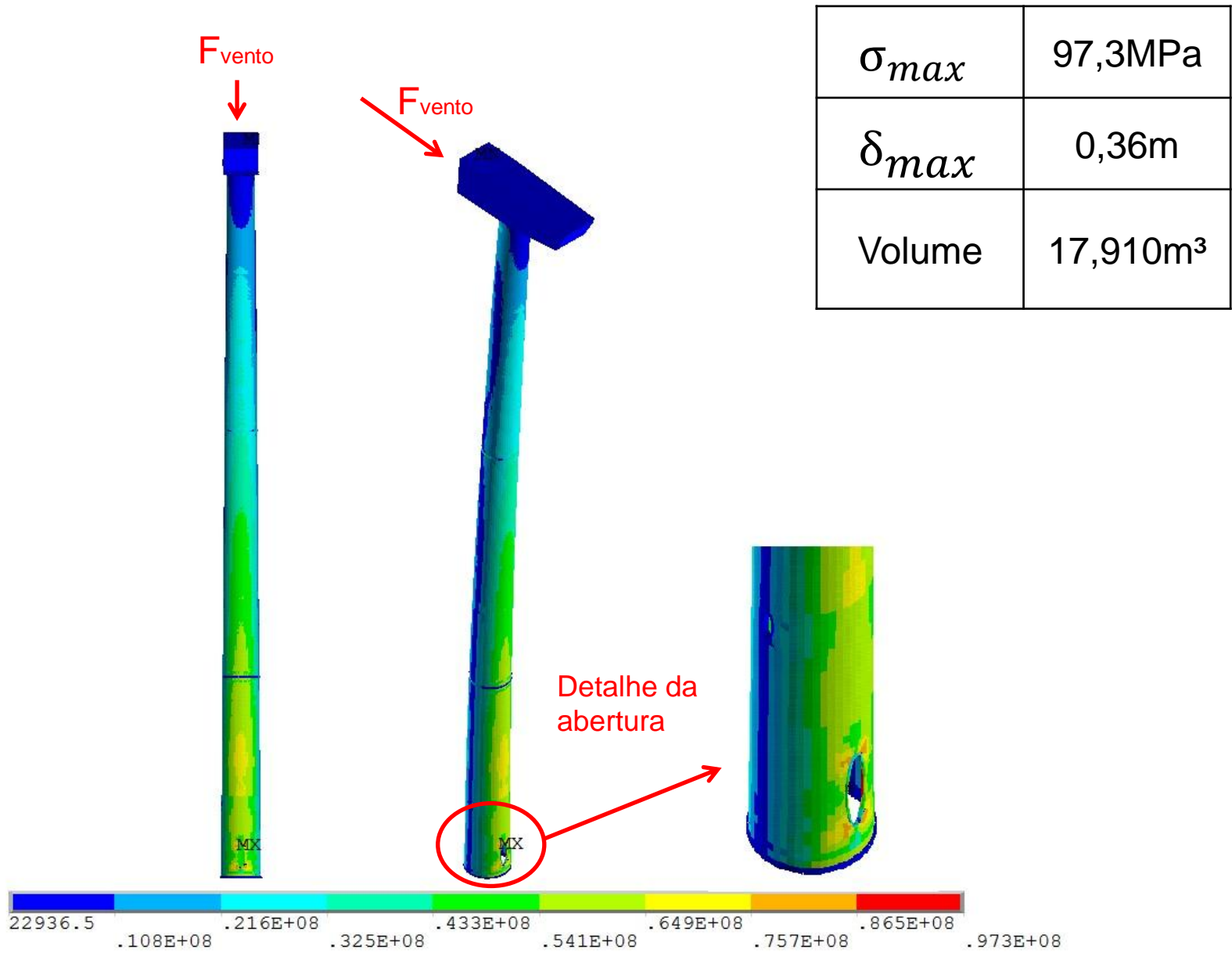


Carga distribuída pelos segmentos da torre devido à ação do vento



Altura z (m)	Diâmetro d (m)	Pressão do vento na torre q (N/m ²)	Carga estática do vento na torre F_l (N/m)
76,20	2,956	669,5	2.108,8
71,4	3,040	657,2	2.129,3
66,7	3,124	641,5	2.150,5
61,9	3,208	625,3	2.166,5
57,2	3,292	608,4	2.176,5
52,4	3,376	590,7	2.179,9
47,6	3,460	576,0	2.177,2
42,9	3,544	556,5	2.166,0
38,1	3,628	535,5	2.144,8
33,3	3,712	512,8	2.111,5
28,6	3,796	492,9	2.074,2
23,8	3,880	465,5	2.010,7
19,1	3,964	440,5	1.942,6
14,3	4,048	403,9	1.826,7
9,5	4,132	357,6	1.657,3
4,8	4,216	290,40	1.378,7
0.0	4,300	0,00	0,00

Resultados da análise estática realizada com o software Ansys



Otimização Estrutural

Otimização pode ser definido como o processo de maximização ou minimização de uma determinada função objetivo ($f(x)$), satisfazendo as restrições existentes ($g(x)$; $h(x)$). Essa função objetivo é expressa em função das chamadas variáveis de projeto (x).

Variáveis de Projeto

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Problema de otimização

minimizar $f(x)$

sujeito a $g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n_g$

e/ou $h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, n_h$

A finalidade deste trabalho foi buscar uma torre com menor volume possível, uma vez que para estruturas em aço, na grande maioria dos casos, o custo está relacionado diretamente com o volume da estrutura.

A função objetivo sendo o volume é dada por:

$$vol(x) = \sum_{j=1}^s AL$$

Onde:

s - número de seção

L - comprimento da seção

A - área da seção transversal tubular

Durante o processo de otimização foi levado em consideração o volume total do modelo estudado. Portanto:

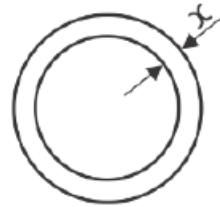
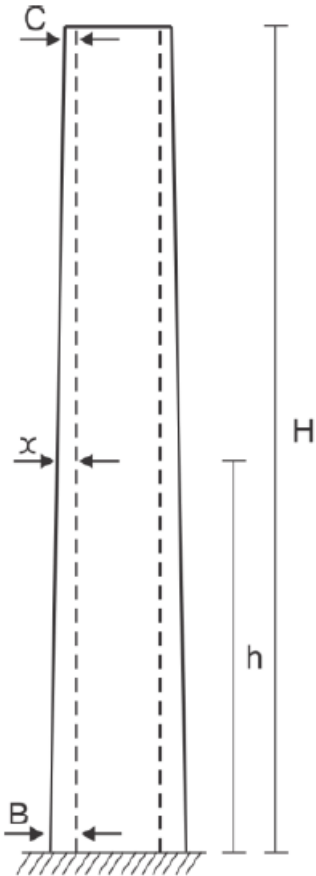
$$Vol_{torre} = Vol_{total} - Vol_{rotor/nacelle}$$

Onde:

$$Vol_{rotor/nacelle} = 43,38m^3$$

Implementou-se no modelo numérico uma função linear, de forma que as dimensões de cada seção fossem compatíveis com a variação que ocorre na estrutura real :

$$\frac{x - C}{H - h} = \frac{B - C}{h} \quad \therefore \quad x = \frac{(B - C)(H - h)}{H} + C$$



Onde:

B – espessura da base da torre

C – espessura do topo da torre

H – altura total da torre

x - espessura da seção

h – altura da seção

Portanto, as variáveis de projeto utilizadas, na otimização do modelo, foram as espessuras da seção transversal da base e do topo da torre, **B** e **C**.

Na forma vetorial: $x = \{B, C\}$

Foram considerados no modelo de otimização as seguintes restrições de desigualdade:

- 1) Restrição de deslocamento horizontal no topo da torre:

$$\delta \leq \delta_{max}$$

A Eurocode 3 recomenda que o deslocamento máximo seja

$$\delta_{max} = \frac{h}{50} \therefore \delta \leq 152cm$$

- 2) Restrição referente à tensão máxima equivalente, que resume todas as tensões multidirecionais:

$$\sigma \leq \sigma_{rd}$$

onde σ é a tensão máxima de von Mises na torre e σ_{rd} representa a tensão resistente no estado limite último segundo a Eurocode 3.

$$\sigma \leq 255MPa$$

Algoritmo Genético

Conceitos

Algoritmos Genéticos (GAs - Genetic Algorithms) são inspirados no princípio Darwiniano da evolução das espécies e na genética. São algoritmos probabilísticos que fornecem um mecanismo de busca paralela e adaptativa baseado no princípio de sobrevivência dos mais aptos e na reprodução.

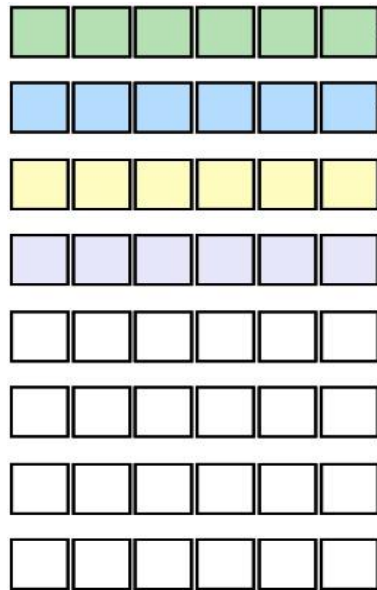
Robustos, genéricos e facilmente adaptáveis, utilizam conceitos provenientes do princípio de seleção natural para abordar uma série ampla de problemas. Basicamente, o que um algoritmo genético faz é criar uma população de possíveis respostas para o problema a ser tratado (inicialização) para depois submetê-la ao processo de evolução, constituído pelas seguintes etapas:



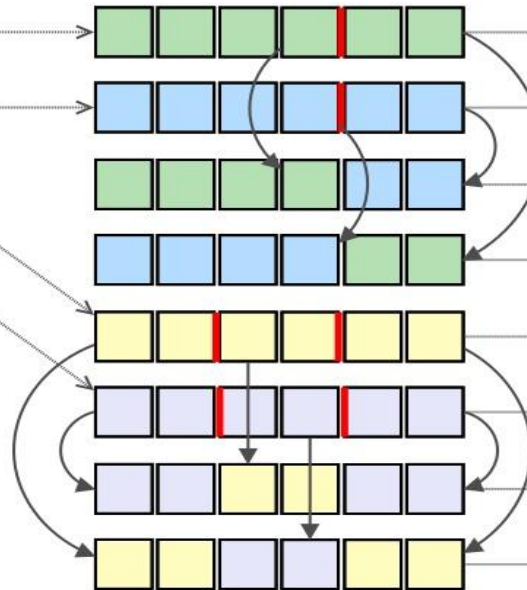
- **Avaliação:** avalia-se a aptidão dos indivíduos da população;
- **Seleção:** indivíduos são selecionados para reprodução. A probabilidade de um indivíduo ser selecionado é proporcional a sua aptidão;
- **Cruzamento:** geração de novos indivíduos através da recombinação das características das soluções escolhidas;
- **Mutação:** características dos indivíduos resultantes do processo de reprodução são alteradas, proporcionando variedade à população;
- **Atualização:** os indivíduos gerados são inseridos na população;
- **Finalização:** verifica-se se as condições ótimas foram atingidas.

Cruzamento, Mutação e Seleção

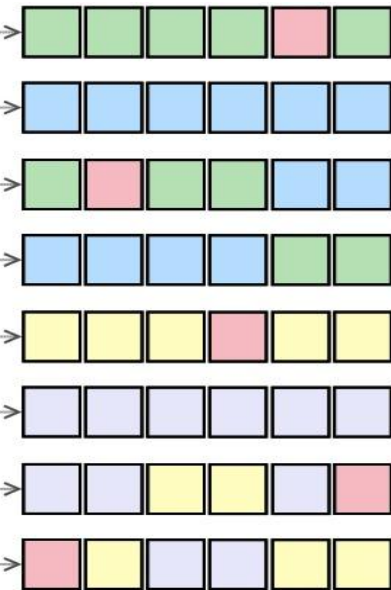
População Inicial



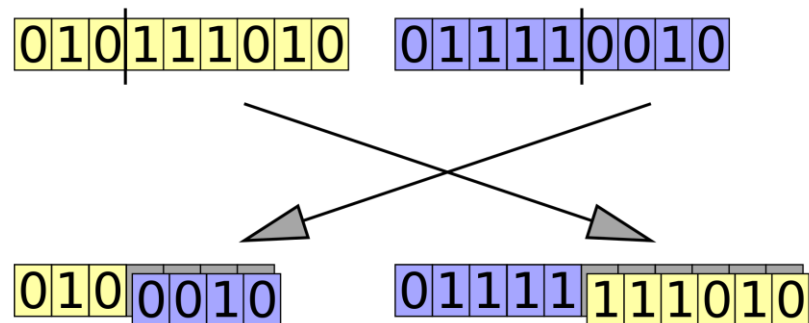
Cruzamento



Mutação



Crossover:



Por que o GA?

- São robustos e aplicáveis a uma grande variedade de problemas.
- Não usam apenas informação local, logo, não ficam presos, necessariamente, a ótimos locais como determinados métodos de busca.
- Seu desempenho não é afetado por descontinuidades na função ou em suas derivadas. Os algoritmos genéticos não usam informações de derivadas na sua evolução nem necessitam de informação dos gradientes da superfície da função objetivo para efetuar a busca.
- Apresentam um bom desempenho para uma grande escala de problemas.
- São de fácil implementação e proporcionam maior flexibilidade no tratamento do problema a ser resolvido.

Parâmetros no Matlab:

O software Matlab possui um código do algoritmo genético integrado em seu sistema. Portanto, os scripts foram programados utilizando os comandos pré-estabelecidos no software.

Número de variáveis = 2

Limite inferior = [0.0001; 0.0001]

Limite superior = [0.05; 0.05]

População = 50

Gerações = 20

Crossover = 0.7

Mutação = 0.1

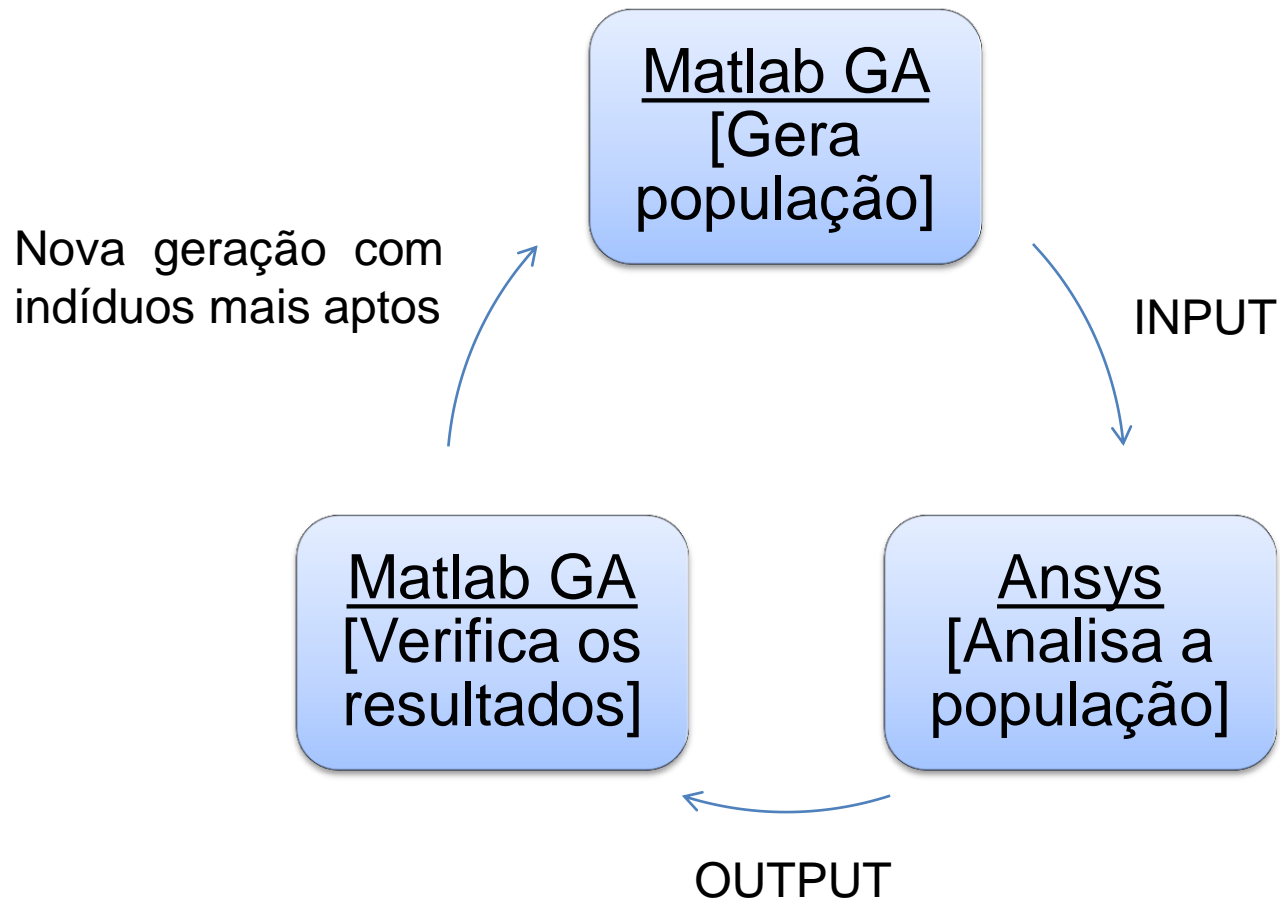
Critério de parada: Tolerância = 10^{-6} (default)

Função objetivo = volume.m

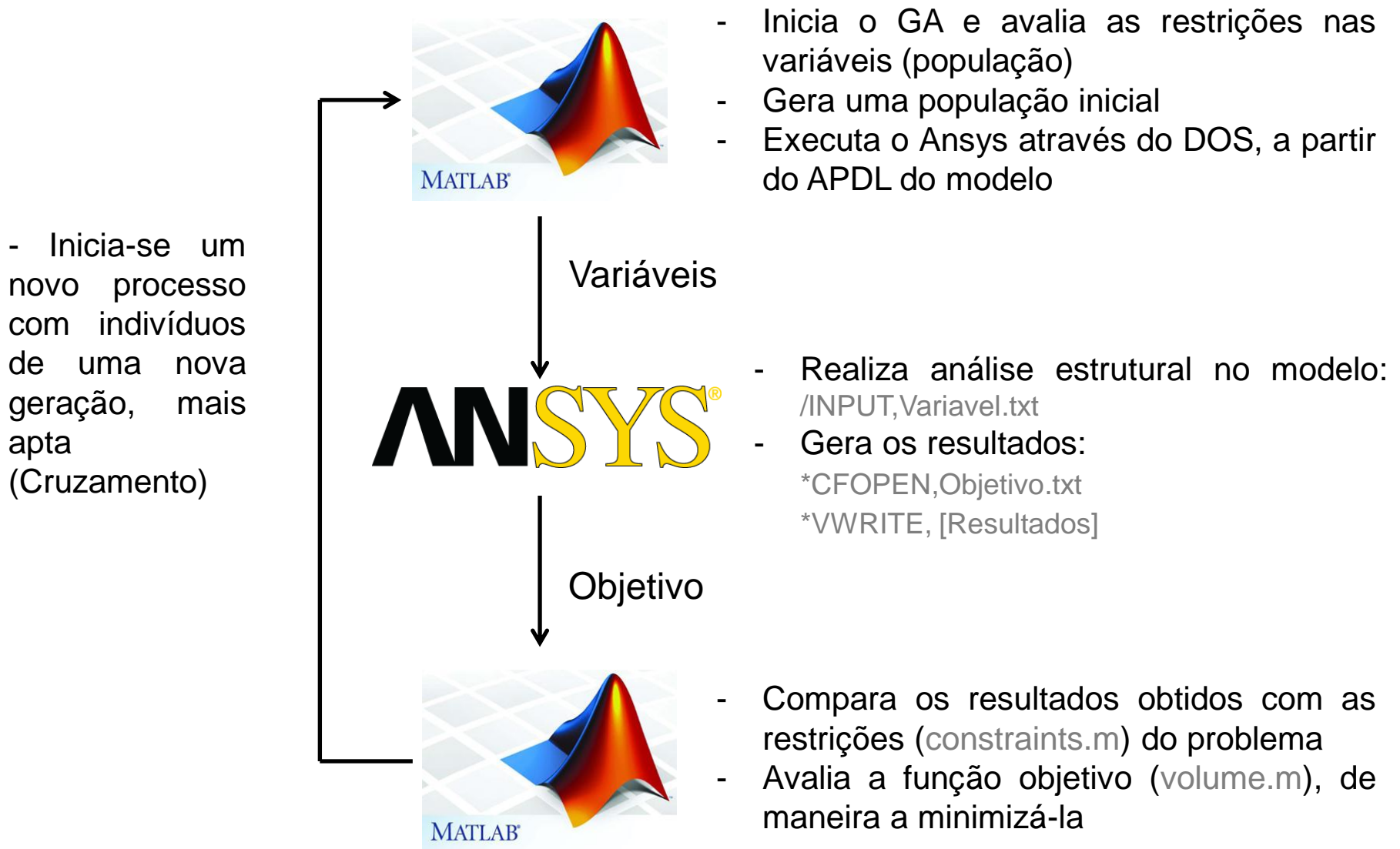
Restrições = constraints.m

Interface Matlab-Ansys

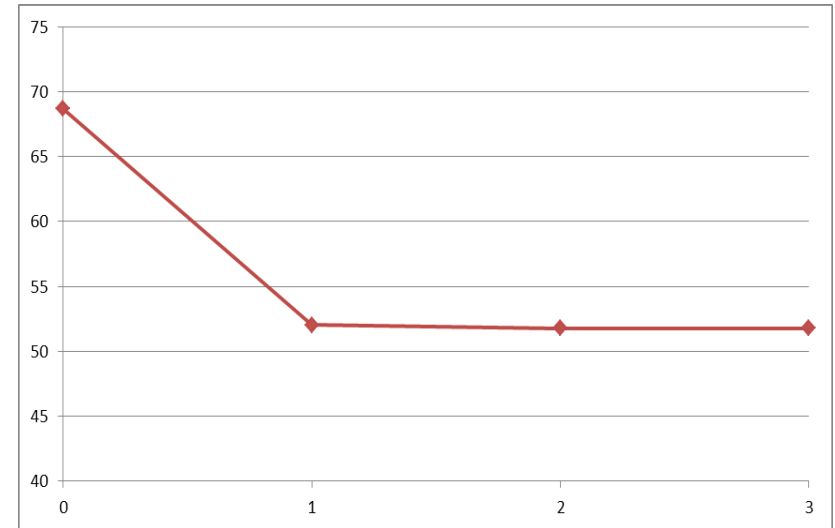
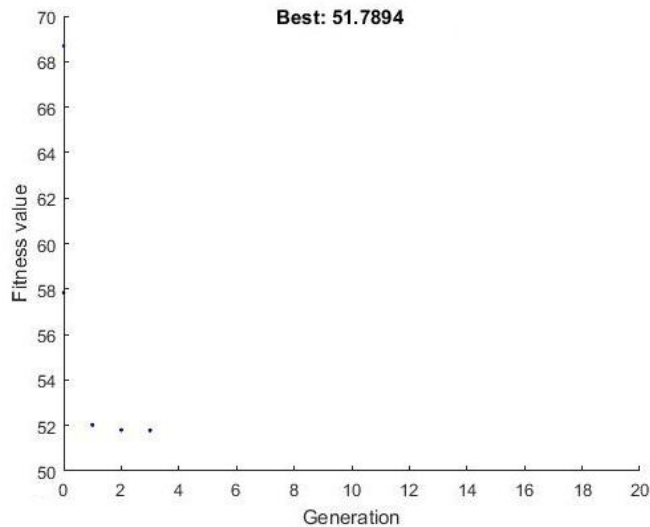
De maneira resumida:



De maneira detalhada:



Resultados

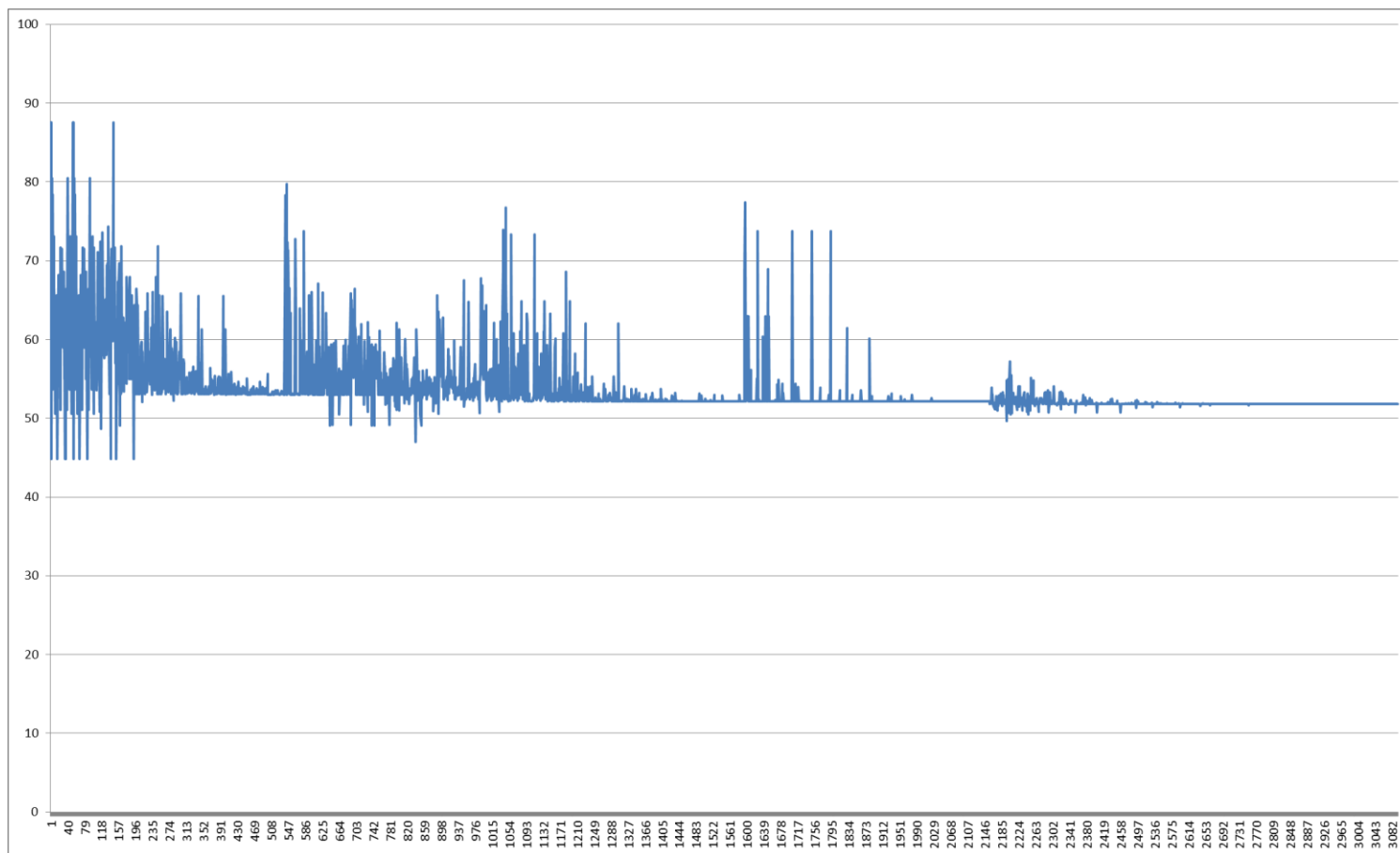


O volume ótimo bruto para o modelo foi de **51,79m³**. Consequentemente, o volume ótimo da torre encontrado foi de **8,41m³**.

	Valor inicial	Valor ótimo
B	30mm	11,15mm
C	12mm	6,21mm
Volume	17,91m ³	8,41m ³

Função Objetivo x Avaliação

Volume do modelo



Avaliação

Com relação às restrições definidas para o modelo

Restrições	Valor inicial	Valor ótimo	Valor adm
δ (m)	0,36	0,876	1,52
σ (MPa)	97,1	254,6	255

A restrição relativa à tensão atingiu o valor de 254,6 MPa, equivalente a 99,8% do seu limite. A restrição relativa ao deslocamento máximo atingiu o valor de 0,876 m, equivalente a 57,6% do seu limite. Portanto, o resultado ótimo encontrado não teve nenhuma de suas restrições ultrapassadas

Comparando os resultados:



	Valor Inicial	Ansys	GA
B	30mm	11,98mm	11,15mm
C	12mm	9,82mm	6,21mm
Volume Total	17,910m ³	10,539m ³	8,41m ³
Redução do volume	X	41,1%	53%

Conclusões

- A otimização da torre utilizando o Algoritmo Genético apresentou ótimos resultados, apresentando uma redução de 53% no seu volume.
- A interface Matlab-Ansys, apesar de demonstrar um elevado tempo de processamento, se comportou de maneira satisfatória e dentro do esperado.
- A otimização utilizando o algoritmo genético com a interface Matlab-Ansys, precisa ser avaliada antes de ser aplicada em um determinado projeto. Neste caso, quando aplicado em um parque eólico, esse processo se torna viável.

Próximos passos para o trabalho:

- Estudar melhor o processo de fabricação da torre, e, conseqüentemente, verificar se é possível melhorar modelo de otimização.
- Realizar análise dinâmica
- Aumentar o número de variáveis no processo de otimização

Referências:

- Bzdawka, K. - “Structural Analysis of a Wind Turbine Tower”, Poznań University of Technology, 2010.
- Sirqueira, A. S., “Comportamento Estrutural de Torres de Aço Para Suporte de Turbinas Eólicas”, UERJ, 2008.
- Menon, A., “Structural optimization using ansys and regulated multiquadric response surface model”, University of Texas, 2005.
- Pacheco, M. A. C., “Algoritmos genéticos: princípios e aplicações”, PUC-RJ, 1999.
- Indu, K. R., Airin, M. G., “Optimization of Tapered Cantilever Beam Using Genetic Algorithm: Interfacing MATLAB and ANSYS”, IJIRSET, 2015, vol.4.
- A. Gauchía, B.L.; Boada, M.J.L.;V. Díaz “Integration of MATLAB and ANSYS for Advanced Analysis of Vehicle Structures”, Intech, 2014.
- Santos, N. A. A., “Otimização de Torre de Aço para Aerogerador Eólico”, UERJ, 2013.

OBRIGADO!