A REPRESENTAÇÃO DAS COMPONENTES DE UMA ESTRUTURA DA CARCAÇA DE TURBINA EÓLICA POR MEIO DE CÔNICAS E QUÁDRICAS

Henrique Leivas Fuentes – henriquelfuentes@gmail.com

Eneilson Campos Fontes – eneilsonfontes@furg.br
Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália, km 8, Carreiros.
96203-900 – Rio Grande – Rio Grande do Sul

Resumo: *O ensino e a aprendizagem da disciplina de Geometria Analítica nos cursos de Engenharia Mecânica visam proporcionar habilidades de percepção espacial no âmbito da engenharia, estimulando o raciocínio lógico e o desenvolvimento de uma atuação produtiva na identificação e solução de problemas. Desta forma, o processo de ensino-aprendizagem dessa disciplina também deve propiciar um ambiente construtivo e exploratório, aspirando o instrumento geométrico como fundamento do estudo de seções cônicas e superfícies quádricas. Nesta perspectiva, o presente trabalho elabora o projeto de uma carcaça de turbina eólica de eixo horizontal, a partir de artifícios geométricos presentes no decorrer da disciplina de Geometria Analítica. Com tal aplicação prática, objetivou-se instigar a visualização tridimensional, abordando os principais conceitos e utilidades das superfícies geométricas contidas em um aerogerador. Diante disso, pensou-se que o software GeoGebra poderia proporcionar uma compreensão mais explícita e perceptível sobre o que está sendo tratado: Geometria Analítica, Geometria espacial e Cálculo Diferencial e Integral. Ademais, vale salientar que a pesquisa e busca por informações interdisciplinares relacionadas a questões ambientais das turbinas eólicas retratou aspectos importantes que subsidiaram o desenvolvimento do trabalho.*

Palavras-chave: Geometria Analítica. Metavisualização. Sólidos Geométricos. Aerogerador. Engenharia Mecânica.

1 INTRODUÇÃO

A geometria é uma importante área da matemática de instrumentalização para a formação dos engenheiros. O estudo da geometria espacial e/ou analítica propicia desenvolver habilidades de percepção espacial e abstração no processo ensino-aprendizagem em um ambiente exploratório, representativo e construtivo, tendo o objeto geométrico como foco de estudo. Assim sendo,

> o desenvolvimento de representação espacial (a capacidade de imaginar objetos tridimensionais utilizando imagens planas ou desenhos), as habilidades da decisão intuitiva de problemas espaciais e o uso mais significativo de softwares CAD são essenciais para a educação qualificada dos alunos (VEIDE; STROZHEVA, 2015, p. 1).

De acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Engenharia (2001), o uso intensivo da ciência e tecnologia impulsionaram a demanda por profissionais altamente qualificados no cenário mundial contemporâneo. Desta forma, os currículos dos cursos de engenharia deverão dar condições a seus egressos para adquirir competências e habilidades

para aplicar conhecimentos matemáticos, científicos, tecnológicos e instrumentais à engenharia.

Psicologicamente, a percepção visual de modelos tridimensionais, sejam concretos (maquetes) ou gráficos (softwares) facilitam a habilidade e concepção espacial na engenharia. O desenvolvimento da capacidade metavisual e o papel que suas habilidades desempenham na aprendizagem bem como as limitações do discente são questões que tem sido estudadas insistentemente por Gilbert (2005). Em contrapartida, os estudos práticos geométricos podem ser efetuados a partir de objetos já existentes, tais como edificações ou máquinas. Nesta perspectiva, observar o espaço tridimensional ao redor e as formas geométricas presentes, elaborar métodos de comunicá-las, interligá-las e descrevê-las contribuem ao desenvolvimento das habilidades e criatividade discente.

Segundo Corrêa (2015), a cidade de Rio Grande – RS possui um parque eólico (Central Geradora Eólica Cassino - CGEC) com 32 turbinas eólicas de eixo horizontal com mais de 90 metros de altura e que geram 65 megawatts de energia; todavia, no mínimo, também impactam visualmente a paisagem local.

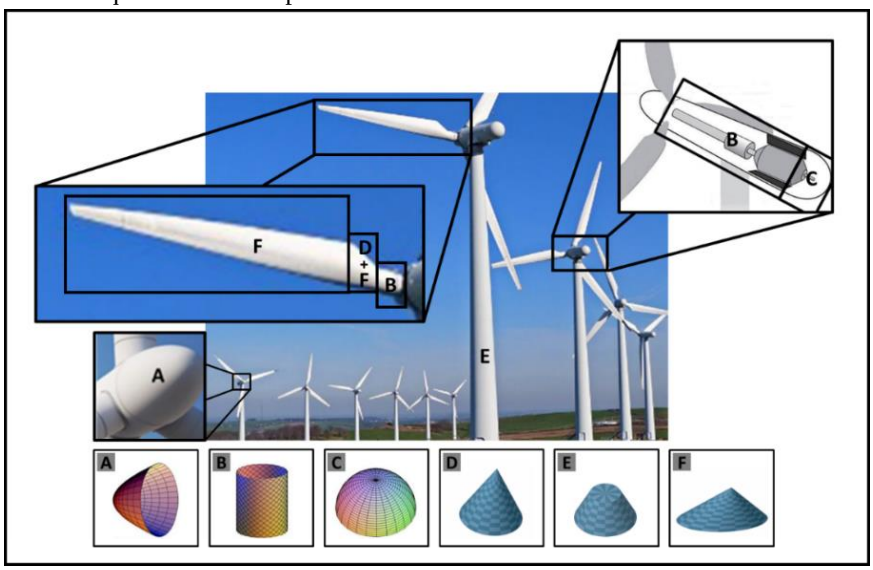
Neste trabalho, utiliza-se os métodos e ferramentas da Geometria Analítica, Geometria espacial e Cálculo Diferencial e Integral para exercitar o cálculo de volume, seguidamente da representação das formas geométricas presentes na carcaça total de uma turbina eólica através das seções cônicas e superfícies quádricas.

2 GEOMETRIA DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Para representar as formas geométricas presentes na carcaça total de uma turbina eólica de eixo horizontal formada por: torre, nacele, cubo rotor e pás do rotor, utilizou-se o software GeoGebra e os conceitos pertinentes a teoria de superfície quádricas na geometria analítica.

As superfícies utilizadas para estimativa de volume correspondem a (1) torre: tronco de cone; (2) nacele: cilindro + semiesfera; (3) cubo rotor: paraboloide circular; (4) pá do rotor: cilindro + junção de um cone oblíquo e um cone oblíquo com base elíptica + cone oblíquo com base elíptica (Fig. 1).

Figura 1 – Turbina eólica: Discriminação das formas geométricas contidas na estrutura.
A: Paraboloide circular. B: Cilindro. C: Semiesfera. D: Cone oblíquo. E: Tronco de cone.
F: Cone Oblíquo com base elíptica.



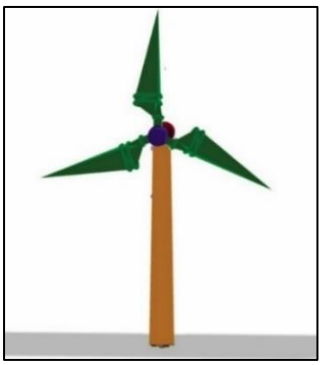
Fonte: Imagens da internet.

No software GeoGebra a representação desses modelos tridimensionais é realizada a partir das seções cônicas e superfícies quádricas e suas respectivas equações cartesianas e/ou paramétricas e na sequência, utiliza-se as fórmulas de geometria espacial e técnicas de integração para determinar os seus respectivos volumes.

3 INTENTO DAS SUPERFÍCIES CONTIDAS NO AEROGERADOR

Neste tópico será apresentado parte da revisão teórica que trata da temática em estudo. Nesta perspectiva, serão abordadas as componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal, junto as suas respectivas funcionalidades, visando justificar a utilidade de cada superfície contida no Aerogerador. Na figura 2 pode-se visualizar a geometria de uma turbina eólica de eixo horizontal representada no software GeoGebra.

Figura 2 - Modelo de Turbina Eólica de Eixo Horizontal



Fonte: Os autores

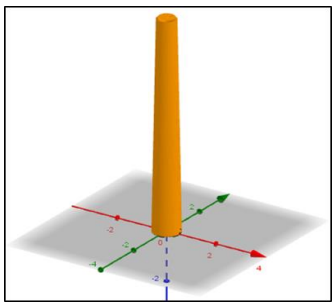
3.1 Torre

A torre tem a função de sustentar e posicionar a nacele, junto ao cubo rotor. Além de elevar a estrutura a alturas mais adeptas à captação de ventos em velocidades ideais, considerando que a velocidade das massas de ar aumenta proporcionalmente com a altura. Levando em conta que sua altura tem grande importância, tanto por questões ambientais quanto para geração de energia, os fatores determinantes para a altura da torre são o custo e a crescente produção de energia obtida com a elevação do cubo rotor.

A concepção das torres atuais evidencia uma demanda correspondente à forma geométrica do tronco de cone (Fig. 3), pois

> [...] sujeitou-se a torre a uma carga axial de compressão devido à massa do aerogerador, aplicada na sua extremidade superior; a uma carga axial de compressão distribuída devido ao seu peso próprio; bem como a carga de vento obtida da consideração de uma pressão (FEIJÓ, 2010, p. 63).

Figura 3 - Modelo de torre



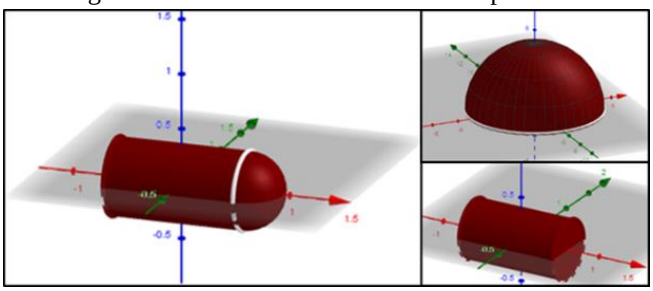
Fonte: Os autores

3.2 Nacele

Como estrutura de proteção, a nacele é o compartimento que contém todo o mecanismo da turbina eólica, ou seja, a caixa de engrenagens, o gerador, o sistema de controle, dentre outros elementos essenciais para o funcionamento da turbina.

O projeto desta componente objetiva uma geometria com a capacidade de reduzir a formação de vórtices, desta forma, obtém-se um conjunto de sólidos geométricos: Cilindro + Semiesfera (Fig. 4), atinente a um formato que otimiza o escoamento de ar sobre a superfície da componente.

Figura 4 - Modelo de nacele e seus componentes



Fonte: Os autores

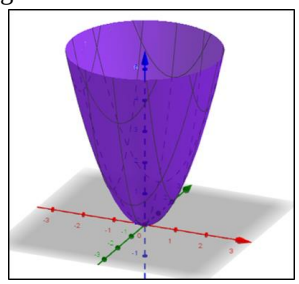
3.3 Cubo rotor

O cubo rotor é o dispositivo da turbina eólica responsável junto as pás pela captação de energia cinética contida dos ventos, a fim de transformá-la em energia mecânica de rotação.

No projeto do cubo rotor de um aerogerador, deve-se considerar: número de pás; uso de materiais leves e resistentes; desempenho aerodinâmico, com o implemento de geometrias que constituam um bom fator de segurança.

Para considerar as estratégias de proteção contra altas velocidades, procurou-se uma superfície de revolução com formato aerodinâmico favorável, neste caso um paraboloide circular (Fig. 5), para direcionar o aerogerador conforme a mudança da direção do vento.

Figura 5 - Modelo do cubo rotor



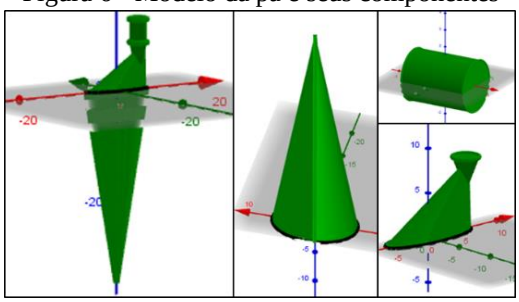
Fonte: Os autores

3.4 Pás do rotor

Fixadas no cubo rotor, as pás resumem-se em elementos aerodinâmicos com a função de captar a energia cinética contida nos ventos. Na maioria dos modelos de aerogerador encontrados, seu desempenho na produção de energia está diretamente relacionado aos ângulos gerados após a estabilização das pás no cubo rotor. Nesta perspectiva, a otimização da turbina eólica depende do design e posição das pás para converter a energia dos ventos em energia mecânica. Assim sendo, observa-se que o projeto do aerogerador intenciona-se para uma geometria voltada à aerodinâmica.

Ao analisar um perfil aerodinâmico, buscou-se uma modelagem que simulasse de forma mais precisa as pás reais. Desta forma, através do software GeoGebra, procurou-se representar três componentes: encaixe no cubo rotor, funil da pá e lâmina da pá. Na figura 6 pode-se visualizar a geometria dos componentes que integram a pá.

Figura 6 - Modelo da pá e seus componentes

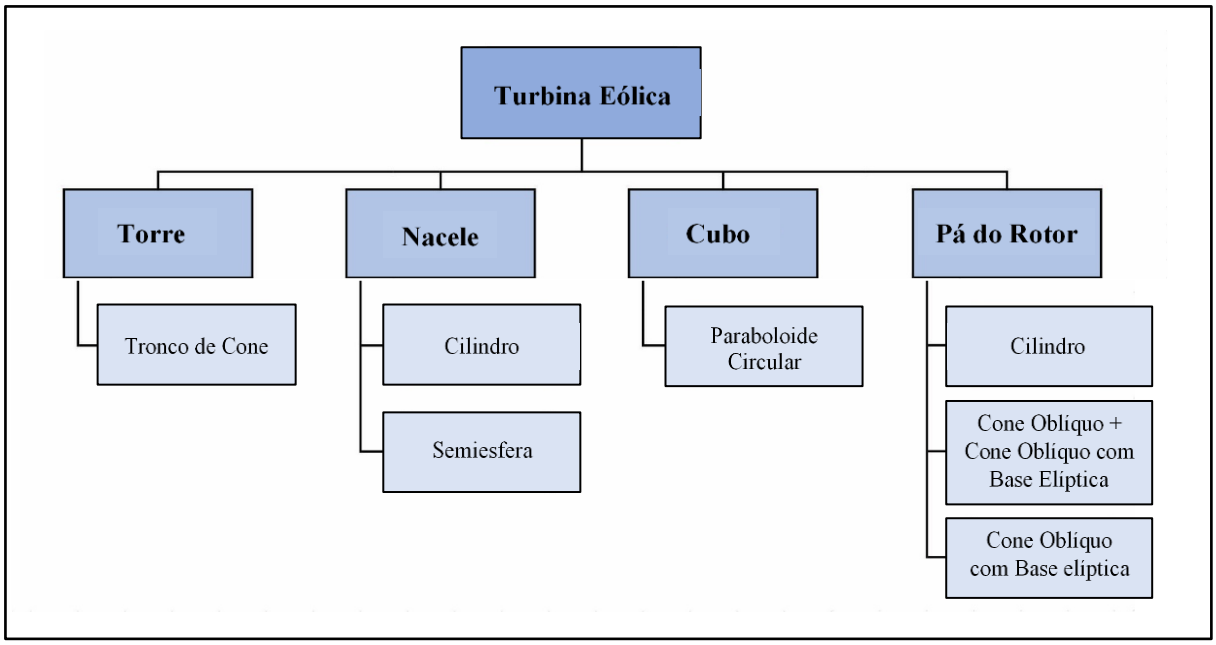


Fonte: Os autores

4 SIMULAÇÃO DO PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Com o objetivo de retratar a gravidade do impacto visual gerado por um parque eólico, o presente trabalho buscou simular a projeção de uma carcaça de turbina eólica de eixo horizontal, de modo a evidenciar a estimativa do volume total ocupado por um parque eólico. Para a formulação desse projeto de turbina eólica, necessitou-se projetar 4 componentes contidas em um Aerogerador. Os artifícios utilizados em tal projeto correspondem a uma torre, uma nacele, um cubo rotor e três pás do cubo rotor. Na figura 7 pode-se visualizar a estrutura do projeto, relacionando os componentes do aerogerador com suas respectivas superfícies.

Figura 7 – Estrutura Analítica do projeto de Turbina Eólica de Eixo Horizonta



Fonte: Os autores

As medidas e volumes de cada componente e/ou sólido geométrico aplicados para o exercício de elaboração das formas para o estudo são apresentadas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Turbina eólica: Discriminação dos componentes, partes dos componentes, geometria dos componentes e suas dimensões para elaboração das formas do exercício com o software GeoGebra.

Componetes da Turbina Eólica	Partes dos Componentes	Geometria dos Componentes	Dimensões (m)					Dimensões (m³)
			Comprimento	Diâmetros das bases				Volume
				Diâmetro 1		Diâmetro 2		
				A	B	A	B	
Torre	-	Tronco de cone	85	9	9	5	5	3.360,19
Gôndola	Corpo	Cilindro	12	6	6	6	6	339,29
	Cúpula	Semiesfera	3	6	6	-	-	56,55
Cubo Rotor	-	Paraboloide Circular	5	2√5	2√5	-	-	39,27
Pá do Rotor	Encaixe no Cubo Rotor	Cilindro	4	3	3	3	3	28,28
	Funil da Pá	Cone Oblíquo	3	3	3	-	-	7,07
		Cone Oblíquo com Base Elíptica	8	6	2	-	-	25,13
	Lâmina da Pá	Cone Oblíquo com Base Elíptica	33	6	2	-	-	103,67
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	**4.287,75**

Fonte: Os autores

Após o dimensionamento e posteriormente os cálculos do volume de cada sólido geométrico do aerogerador, obtivemos a estimativa do volume total ocupado por uma carcaça de turbina eólica de eixo horizontal adicionando-se os respectivos volumes de cada uma de suas componentes. A seguir serão apresentadas as metodologias dos cálculos de volume de cada superfície da turbina eólica e, ademais, uma breve fundamentação teórica sobre cada sólido contido no aerogerador.

4.1 Tronco de cone (torre)

O tronco de cone de bases paralelas é obtido após o cone sofrer a secção transversal de um plano paralelo à sua base. O volume desse sólido é obtido realizando a subtração entre os volumes do cone preambular e o volume do cone ínfimo, originado posteriormente a secção transversal do plano. Na Equação (1) pode-se visualizar o cálculo de volume do tronco de cone:

$$V = \frac{\pi \cdot h}{3} \cdot [R^2 + R \cdot r + r^2] \tag{1}$$

Ao realizar o cálculo de volume do tronco de cone seguindo os dados da Tabela 1, obtemos:

$$V_{\text{Torre}} = 3.360{,}19\ m^3$$

obtendo-se desta forma o volume total da carcaça da torre.

4.2 Cilindro (corpo da nacele e encaixe no cubo rotor)

O cilindro consiste em um sólido geométrico com duas bases circulares contidas em planos paralelos. Se o cilindro tem o eixo perpendicular as bases, então a figura geométrica é denominada sólido de revolução, pois é uma superfície gerada pela rotação de um retângulo em torno de um eixo. Para obter o volume dessa superfície pode-se utilizar a seguinte equação:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \tag{2}$$

Ao realizar o cálculo de volume do cilindro seguindo os dados da Tabela 1, obtemos:

$$V_{\text{Corpo da Nacele}} = 339{,}29\ m^3$$

$$V_{\text{Encaixe no Cubo Rotor}} = 28{,}28\ m^3$$

obtendo-se desta forma o volume total da carcaça do corpo da nacele e encaixe no cubo rotor.

4.3 Semiesfera (cúpula da nacele)

A semiesfera é uma extensão do conceito de semicírculo, desta forma, sua superfície é gerada por uma forma bidimensional que gira 360° em torno de um de seus diâmetros. O volume desse sólido corresponde à metade do volume da esfera. Neste sentido, a Equação 3 apresenta a expressão matemática que descreve o cálculo de volume da semiesfera:

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{6} \tag{3}$$

Ao realizar o cálculo de volume da semiesfera seguindo os dados da Tabela 1, obtemos:

$$V_{\text{Cúpula da Nacele}} = 56{,}55\ m^3$$

obtendo-se desta forma o volume total da carcaça da cúpula da nacele.

4.4 Paraboloide circular (cubo rotor)

Uma superfície gerada pela rotação de uma parábola em torno do seu eixo de simetria. Para determinados sólidos de revolução, como o paraboloide de base circular, as expressões algébricas não têm a capacidade de determinar o seu espaço interno. Contudo, se faz necessário o uso de métodos de resolução de integrais triplas definidas. Na Equação (4) pode-se visualizar o cálculo de volume do paraboloide circular, através das integrais triplas:

$$V = \int_{\theta i}^{\theta f} \int_{ri}^{rf} \int_{zi}^{zf} r\ dzdrd\theta \tag{4}$$

Para mais detalhes, ver (FLEMMING; GONÇALVES, 2007). Ao realizar o cálculo de volume do paraboloide circular seguindo os dados da Tabela 1, obtemos:

$$V_{\text{Cubo Rotor}} = 39{,}27\ m^3$$

obtendo-se desta forma o volume total da carcaça do cubo rotor.

4.5 Cone circular oblíquo (funil da pá)

Um cone (circular) é um sólido geométrico constituído por um conjunto de segmentos de reta, cujo as extremidades são um círculo (base) e um ponto fora do plano em que a base do cone está contida. Os cones podem ser classificados como retos ou oblíquos. Nesse sentido, um cone é dito reto quando o seu eixo é perpendicular ao plano da base e caso o contrário é denominado oblíquo. No entanto, o cálculo de volume de um cone reto e de um cone oblíquo é dado pela mesma equação, desta forma, a Equação (5) descreve o cálculo de volume do cone:

$$V = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h}{3} \tag{5}$$

Ao realizar o cálculo de volume do cone oblíquo seguindo os dados da Tabela 1, obtemos:

$$V_{\text{Funil da Pá}} = 7{,}07\ m^3$$

obtendo-se desta forma uma fração do volume da carcaça do funil da pá.

4.6 Cone oblíquo com base elíptica (lâmina e funil da pá)

Os cones de base elíptica correspondem a um cone cujo a sua base é uma elipse. Para o cálculo de seu volume, precisamos adaptar a Equação (5) em função da sua base, nessa perspectiva, a Equação (6) descreve o cálculo de volume do cone de base elíptica:

$$V = \frac{1}{3} \cdot h \cdot (\pi \cdot a \cdot b) \tag{6}$$

Ao realizar o cálculo de volume do cone oblíquo com base elíptica seguindo os dados da Tabela 1, obtemos:

$$V_{\text{Lâmina da Pá}} = 103{,}67\ m^3$$

$$V_{\text{Funil da Pá}} = 25{,}13\ m^3$$

obtendo-se desta forma o volume total da carcaça da lâmina da pá e uma fração do volume da carcaça do funil da pá.

5 IMPACTOS AMBIENTAIS REFERENTES A GEOMETRIA DA TURBINA EÓLICA

Quando se trata da captação de energia eólica uma série de aspectos positivos e negativos merecem ser abordados e relatados. No entanto, em conformidade com o foco de estudo salientar a geometria da turbina e suas respectivas consequências, o presente trabalho apresentará apenas alguns dos aspectos desfavoráveis à implementação de um parque eólico.

Assim sendo, a simulação tridimensional da turbina eólica apresentada neste trabalho visa comtemplar os impactos socioambientais relacionados à geometria das turbinas. Nesse contexto, alguns dos impactos mais evidenciados relacionam-se à emissão de ruídos e alterações sobre a fauna e estética do ambiente.

5.1 Impacto sonoro

O ruído gerado pelo funcionamento dos aerogeradores, é produto do movimento das pás e por ser originado de um projeto aerodinâmico, ele aumenta de acordo com a velocidade dos ventos. Desta forma, o volume dos ruídos está continuamente relacionado e dependente da altitude da nacele. Por outro ponto de vista,

> [...] os aerogeradores são dimensionados para velocidades do vento elevadas pois só então há lugar a produção de energia. Por outro lado, ainda, com elevadas velocidades do vento o ruído ambiente assume níveis sonoros que diferem substancialmente dos valores que subsistem na ausência de vento (CHURRO, 2004, p. 8).

Em determinadas condições o ruído pode ser considerado perturbador, principalmente no período noturno, em particular, para a habitação nas proximidades de um parque eólico.

5.2 Impactos sobre a fauna

Devido a elevada área de abrangência das pás em movimento, do cubo rotor, há um alto índice de colisões de aves e morcegos no período de migração destes. Contudo, os parques

eólicos devem ser implementados em locais afastados das rotas migratórias de aves e de ambientes ocupados por espécies ameaçadas de extinção.

5.3 Impacto visual

A implantação de aerogeradores acarreta alterações na estética e qualidade da paisagem. Devido às formas geométricas serem insignes em relação ao ambiente onde foram instituídas, o agrupamento de torres que normalmente ultrapassa 100 metros de altura tem diferentes impressões ao ponto de vista de cada ser humano.

O comportamento de cada sujeito é proveniente de suas concepções do mundo, cada ser humano se orienta de acordo com suas afinidades e convicções com o meio em que está inserido, desta maneira, muitas pessoas visam o parque eólico como símbolo de energia limpa. E, paradoxalmente, embora os efeitos do impacto visual sejam aderidos pela população, sobretudo, com a conscientização de geração de energia renovável, outras contrapõe-se à nova paisagem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstra que elementos antropogênicos presentes na paisagem cotidiana, neste caso turbinas eólicas de eixo horizontal, podem ser adequados para exercitar os elementos teóricos desenvolvidos ao longo dos cursos de Geometria Analítica e Cálculo Diferencial e Integral. Desta forma, aproximando os discentes de modo metavisual da aplicação do conteúdo das disciplinas sobre as formas geométricas no estudo de cônicas e quádricas. Nesta perspectiva, constata-se que essas disciplinas são de grande importância para o desenvolvimento do discente, tendo em vista que os seus métodos e ferramentas fornecem recursos que se fazem presentes da graduação ao âmbito profissional do engenheiro mecânico.

Dentre as habilidades desenvolvidas ao decorrer do trabalho, destacam-se o manuseio do Software GeoGebra como instrumento prático para Geometria Analítica, fortalecendo a metavisualização espacial por parte dos discentes, contribuindo na melhoria do desempenho destes em disciplinas da Engenharia Mecânica, corroborando GILBERT (2005) e COELHO e REGO (2007). Além disso, acredita-se que este trabalho pode estimular outros discentes a buscarem o fortalecimento de seu aprendizado por meio das diversas conexões entre os problemas práticos e a teoria de Geometria Analítica desenvolvida em sala de aula.

Agradecimentos

Os autores agradecem toda a colaboração da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), por meio do Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF), junto a Escola de Engenharia (EE), pelo incentivo e suporte que foi fornecido ao longo da elaboração da presente pesquisa. E, também, ao altruísmo das pessoas envolvidas que certamente contribuíram para o seu sucesso, ademais, ao apoio essencial do Grupo PET Mecânica.

REFERÊNCIAS

BOULOS, P.; CAMARGO, I. **Geometria Analítica:** um tratamento vetorial. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.

COELHO, E. S.; REGO, R. M. Percepção Visio-Espacial: combinando representação gráfica e modelagem 3D. In: VII International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design, 2007, Curitiba. **Anais...** Florianópolis: ABEG. 2007.

CORREA, F. **Impacto Visual Gerado pela Central Geradora Eólica Cassino, Rio Grande/RS**: Um Estudo de Percepção Ambiental. 2015. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS.

CHURRO, D.; ZAMBUJO, M. J.; RODRIGUES, C. C.; COELHO, J. L. B. Parques Eólicos - Estudo dos Impactes no Ambiente Sonoro I - Influência no Ruído Local. In: Acústica, 2004, Guimarães. **Anais...** Madrid: Sociedad Española de Acústica. 2004.

FEIJÓ, B. P. **OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE AÇO PARA GERADORES EÓLICOS.** 2010. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

FLEMMING, D. M.; Gonçalves, M. B. **Cálculo B:** funções de várias variáveis, integrais múltiplas, integrais curvilíneas e de superfície. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

GILBERT, J. K. Visualization: a metacognitive skill in science and science education. In: Gilbert, J. K. (Ed.) **Vizualization in Science Education.** Nederland: Springer, 2005. 9-27p.

MÜLLER, M. N. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal.** 2015. Projeto de Graduação – Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VEIDE, Z.; STROZHEVA, V. The Visualizations Methods of Geometrical Forms in teaching of Civil Engineering Students. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, 2015, Riga. **Anais...** Riga: *Environment Technology Resource*, 2013.

THE REPRESENTATION OF COMPONENTS OF A WIND TURBINE HOUSING STRUCTURE THROUGH CONICS AND QUADRICS

Abstract: The teaching and the learning of the Analytical Geometry subject in Mechanical engineering course aim to proportional habilities space perception in the ambit of engineering, stimulating the logical reasoning and the development of a productive actuation in the identification and problem solution, thus, the teaching-learning process of this subject also must provide a construct and exploratory environment aspiring the geometrical instrument as a foundation to conical sections study and quadrics surfaces. In this perspective, the present work elaborates on the Project of a wind turbine housing structure of the horizontal axis, from geometrical artifices present in the elapse of the Analytical Geometric subject. With the practice application, aimed to instigate the tridimensional vision, addressing the main concept and utilities from the geometrical surfaces contained in a wind turbine. That said, thought up that the GeoGebra software could proportional a comprehension more explicit and noticeable about what is being treated: Analytical Geometric, Space Geometric and differential and integral calculus. Also, worth noting that the search for interdisciplinary information related to environmental questions of wind turbine portrayed important aspects that subsidized the work development.

Keywords: Analytical Geometric; Meta View. Geometric Solids; Wind Turbine; Mechanical Engineering.