

ANÁLISE DO USO DE MATERIAIS EM AEROGERADORES

*Bretschneider, M. R.*¹

*Schneider, E. L.*²

*Dias, M. M.*³

Resumo: Aero geradores são dispositivos mecânicos que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica. As propriedades dos materiais selecionados para cada um de seus componentes exercem um papel decisivo na busca pela melhoria do desempenho. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise dos materiais empregados na construção de aerogeradores, com foco na estrutura externa do rotor, nacelle e torre de sustentação, a fim de compreender e caracterizar o uso de diferentes materiais de acordo com diferentes necessidades destas máquinas. Deste modo, este artigo contempla uma revisão bibliográfica sobre alguns dos principais materiais utilizados e uma seleção de materiais computadorizada com o software Cambridge Engineering Selector® a fim de verificar materiais que possam apresentar melhores propriedades frente aos requerimentos necessários para o funcionamento das pás. Verificou-se que para um projeto onde o custo seja uma consideração importante, a madeira balsa (plywood) mostrando-se um candidato promissor, embora apresente certa dificuldade para moldar formas aerodinâmicas ideais além da sua natureza orgânica biodegradável que requer tratamentos químicos ou adição de resinas para resistir aos ambientes externos.

Palavras-Chave: Aerogerador, Materiais Compósitos, Ciência dos Materiais.

¹ *Mestrando Materiais e Processos Industriais – Universidade Feevale Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo – RS – Brasil. Fone: (51) 9945-3793 – e-mail: bretschneider.m@gmail.com;*

² *Dr. Eng. Prof. Depto. Eng. Mecânica e Mestrado em Tecnologia de Materiais. Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo / RS – Brasil – Fone: (51) 35868800 Fax: (51) 35868948 – e-mail: eduardoluis@feevale.br.*

³ *Dr. Eng. Prof. Depto. Eng. Eletrônica e Mestrado em Tecnologia de Materiais. Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo / RS – Brasil – Fone: (51) 35868800 Fax: (51) 35868836 – e-mail: moisesdias@feevale.br.*

ANALYSIS OF THE USE OF MATERIALS IN WIND TURBINE GENERATORS

Abstract: Wind turbine generators are mechanisms that use convert the kinetic energy from the wind into electricity. Selecting the right materials for each of its components is important in the search for higher efficiency. This work focuses on the external structures: the rotor, nacelle and tower. To understand and categorize the different materials used in these machines, this article brings a documental analysis over the main materials and graphics created with Cambridge Engineering Selector ® software, to compare and understand wich materials better suit each application. By the end of the analysis, plywood came up as a promising material in projects where cost is a concern, its difficulty to be formed into some of the ideal aerodynamic shapes and its organic, biodegradable nature requires though careful working and post processing to be applied to maximize its resistance to the external environment.

Keywords: Wind Turbine Generator, Composite Materials, Material Science.

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, a humanidade utiliza de energia disponível na natureza para realizar trabalho, como as rodas d'água utilizadas em moinhos de grãos, a energia eólica foi utilizada para diversos fins, desde movimentar barcos (através das velas) até moinhos de vento para o processamento de grãos e o bombeamento de água. O uso de geradores eólicos para prover energia elétrica tem sua origem documentada no início do século 20, em várias regiões da Europa, onde geradores criavam a possibilidade de ter energia independente da rede convencional (de distribuição extremamente restrita, na época) gerando desenvolvimento em consequência da criação de pequenas zonas de autonomia energética (parcial ou total) em regiões que antes não possuíam qualquer fonte energética (CLEVELAND, 2004).

Estas máquinas movidas a energia eólica tipicamente utilizavam uma construção similar aos mecanismos das velas navais, estruturas de madeira e tecido compondo uma superfície capaz de captar a movimentação do ar. De acordo com HAU (2006), na década de 1930 aerogeradores horizontais eram comuns em fazendas no interior dos estados unidos, onde sem alcance da distribuição convencional, operavam de maneira independente da rede. Estes geradores eram produzidos em aço de alta tenacidade e instalados no topo de torres com estrutura de treliça. Na década de 40, em diversos pontos da Europa, turbinas eólicas já geravam energia em conjunto com a rede elétrica, utilizando os mesmos materiais da aeronáutica, madeira e metal, em sua construção básica.

No final dos anos 70, em decorrência da crise dos combustíveis fósseis e de movimentos em prol da consciência ambiental e sustentabilidade, a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA – National Aeronautics and Space Administration) junto ao Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE – United States Department of Energy) inicia o desenvolvimento de turbinas comerciais de grande porte, e é dado início ao uso de materiais tecnológicos como polímeros e compósitos, fruto dos avanços da corrida espacial (NASA, 1979).

Os geradores de grande capacidade (megawatt) são construídos de utilizando metal, fibras ou mesmo madeira (HAU, 2006) em sua composição, enquanto geradores de pequeno porte modernos utilizam alumínio ou materiais compósitos (em sua maioria, fibra de vidro) em sua construção.

Os compósitos recebem esta nomenclatura por combinarem diferentes materiais em uma única matriz para usufruir da combinação de suas características ou de propriedades resultantes da combinação dos mesmos (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010). Aerogeradores são construídos em sua maioria por compósitos reforçados com fibras, de estrutura alinhada e contínua, estes materiais se organizados adequadamente apresentam ampla resistência mecânica, resistência a intempéries e peso reduzido, além disso, seu processo tem custo acessível para projetos de menor escala (CHORTIS, 2013).

Conforme (SCHUBEL e CROSSLEY, 2012), as pás dos aerogeradores passam

por diversos ciclos de flexão, propriedade mecânica que deve ser observada pra que estas hélices não tenham contato acidental com a torre de sustentação do gerador horizontal, afim de evitar graves danos. O estudo de materiais compósitos através de ensaios mecânicos e simulações computacionais permite explorar as características de orientação das fibras, reforços estruturais e demais situações que podem afetar o desempenho e a segurança do gerador.

Os compósitos reforçados com fibras possuem características específicas em relação à fadiga, torção, flexão e resistência a impactos, diretamente influenciadas pela direção das fibras na matriz, se o processo de construção for otimizado a aplicação para qual o compósito está sendo desenvolvido, é possível ampliar ou orientar estas características, aumentando a eficiência mecânica sem que haja aumento significativo dos custos de produção (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010).

2. AEROGERADOR

Aerogeradores são dispositivos mecânicos que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica, através de um sistema de hélices que pode se apresentar de maneira horizontal ou vertical. O desenho aerodinâmico destas hélices, ou pás, é responsável pela eficiência na interação com a massa de ar e captação de energia. Quando o vento passa pelo rotor, a massa de ar gera empuxo e torque que são convertidos em energia.

Conforme norma internacional IEC-NORM 61400-2:2006, geradores de pequeno porte horizontais são definidos como os que têm rotores com até 200m². Considerando uma média de 350W/m², isto significa uma potência máxima de 70kW. Nesse caso, a torre não pode ser mais alta que 20m. (IEC-NORM 61400-2:2006).

O conjunto de aerofólios (pás) compõe o rotor, que é o componente responsável por captar a energia cinética do vento e transmitir através de um eixo esta energia para o conjunto gerador. Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice e normalmente compostos de três pás. Em casos extraordinários podem ser compostos por uma ou duas pás onde exista a disponibilidade de ventos com velocidades médias muito altas e também onde exista a possibilidade de geração de ruído acústico mais elevado sem que tal seja um incômodo.

A quantidade de pás influencia diretamente nos estudos aerodinâmicos, custo de produção e capacidade de captação de energia. Para este estudo, consideramos geradores horizontais de três pás (AL-ABADI, 2014).

A Figura 1 mostra um aerogerador de pequeno porte e as partes que o constituem.

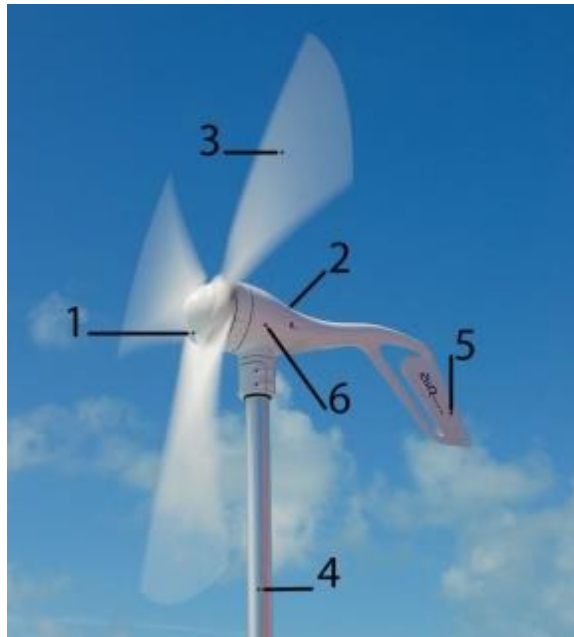


Figura 1 – Componentes de um gerador de pequeno porte. **Fonte:** Wind Turbine Zone.

1 – Cubo: O conjunto de pás fixado ao cubo forma o conjunto determinado rotor. A função deste é captar energia cinética do vento através das pás e transferi-la para os componentes do gerador.

2 – Nacela: Também conhecida como carenagem, possui base rotativa, em torno de um eixo horizontal instalada no topo da torre para permitir o ajuste da direção do rotor conforme direção do vento. A nacela também serve como base para a instalação do rotor com cubo e pás, o ajuste angular das pás, o leme, a engrenagem e transmissão mecânica, os circuitos eletrônicos e o gerador. Dependendo do projeto, o aerogerador de pequeno porte pode não apresentar alguns destes componentes.

3 – Pás: O conjunto das pás forma o rotor. Devido à necessidade de redução de peso, na maioria das vezes, as pás são confeccionadas em compósitos de fibra de vidro e resinas (HEIER, 2007a), devido a grande estabilidade química. Existem ainda geradores com pás de alumínio ou outros metais. As pás dos aerogeradores têm perfis aerodinâmicos variados de forma a aumentar a sua eficiência na retirada da energia em determinada faixa de velocidade do vento. Elas podem ser constituídas de um único ou uma combinação de vários perfis [3].

4 – Torre: Oferece suporte ao conjunto motriz do aerogerador. Além de elevar o mecanismo a alturas mais favoráveis à captação da massa de ar nas velocidades ideais e menos perturbada por outras instalações urbanas ou vegetação e formações geográficas. Fatores determinantes para a altura da torre são o custo e o acréscimo real de energia obtido com a elevação do rotor. As torres podem ser construídas de diversos materiais, sendo mais comuns o aço em treliça ou estrutura tubular. Técnicas como o estaiamento reduzem o material da torre, mas exigem maior área disponível para instalação. É

importante notar que pequenas diferenças na altura podem significar grande diferença na velocidade do vento, portanto é fator fundamental.

5 – Leme: É o mecanismo atuado pela massa de ar responsável por manter a face do rotor perpendicular a corrente principal de vento. Geradores de grande porte não possuem lemes, ao invés disso, utilizam sensores para detectar a direção do vento e motores para reposicionar o rotor, consumindo da própria energia para fazer estas correções.

6 – Acoplamentos e Gerador: A carenagem protege diversos componentes internos que juntos atuam convertendo a energia cinética do vento em energia elétrica. Controles complexos, sensores, freios mecânicos e acoplamentos atuam em conjunto, coordenados por um painel de controle externo.

3. MATERIAIS PARA PROJETOS DE AEROGERADORES

Compreendendo as necessidades e características principais dos aerogeradores, procede a análise bibliográfica e documental dos materiais envolvidos em sua construção, suas principais características e aplicações.

3.1. MADEIRA

O uso de madeira em sistemas de aproveitamento de energia eólica é antigo. Desde estruturas navais até moinhos de grãos (com pás feitas de madeira e tecido), a madeira por ser um material de baixo custo fácil de ser produzido e (GREEN, WINANDY e KRETSCHMANN, 1999) e apresentar boa resistência mecânica, compôs pás de aerogeradores no começo do século 20 na Europa e Estados Unidos.



Figura 4 – Moinho de cereais europeu, cerca de 1920. Fonte: HANCOCK, 2014.

De acordo com Callister (2010), a madeira por se tratar de material orgânico com fibras organizadas de maneira direcional, comporta-se como material compósito em suas características mecânicas. A madeira, por apresentar maior densidade que os materiais compósitos e por ser vulnerável a agentes externos como o clima, insetos e fungos, precisa passar por tratamentos químicos para ser utilizada em ambientes extremos (GREEN, WINANDY e KRETSCHMANN, 1999) Por ser biodegradável e sofrer variação em suas características de acordo com seu grau de umidade ou temperatura, seu uso nas hélices é limitado, pois há a possibilidade de que sua forma se altere a ponto de perder características ideais aerodinâmicas. Em aerogeradores de grande porte (SCHUBEL e CROSSLEY, 2012) a madeira é utilizada na forma de reforço estrutural, da mesma maneira que se apresenta na aviação.

A madeira ainda tem sido utilizada pela empresa Timber Tower (Alemanha) desde 2012 como material base para a construção da torre. As vantagens da madeira em relação ao aço na construção da torre do aerogerador são o menor custo de produção e processamento, seu baixo peso e a possibilidade de construção modular (facilitando o transporte), estas características aliada a manutenção simplificada tornam a madeira um material promissor para geradores de pequeno porte utilizados em sistemas híbridos, por ter custo significativamente inferior ao metal e poder ser trabalhada com ferramentas mais simples (TIMBER TOWER GMBH, 2015).



Figura 5 – Montagem e produto final da estrutura em madeira Timber Tower. Fonte: Timber Tower (2015).

3.2. MATERIAIS METÁLICOS

Materiais metálicos são minerais conformados geralmente compostos na forma de ligas metálicas que possuem grande tenacidade e excelentes propriedades mecânicas.

O custo de obtenção e produção destes materiais, principalmente nas ligas mais exóticas pode ser elevado devido a raridade de alguns elementos de liga (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

Dentre os primeiros geradores eólicos, haviam geradores com pás de metal, que foram desmontados para que os materiais pudessem ser utilizados no esforço de guerra na década de 40. Com a retomada dos estudos de energias alternativas e o surgimento de novas tecnologias (fruto da corrida espacial da década de 60) bem como o surgimento de materiais mais leves e de menor custo, as pás de metal deixaram de ser utilizadas em favor do uso de compósitos ou polímeros (HAU, 2006).



Figura 6 – Aerogerador com pás de metal. Fonte: US Department of Energy.

Os aços são amplamente utilizados de maneira estrutural na indústria, e da mesma forma com os aerogeradores, seja de pequeno ou grande porte, atualmente o aço é utilizado como material estrutural nas torres e fundações, em diferentes tipos de estruturas com excelentes resultados de modo que as torres hoje representam uma pequena porcentagem nos índices de manutenção (WORLDSTEEL, 2015).

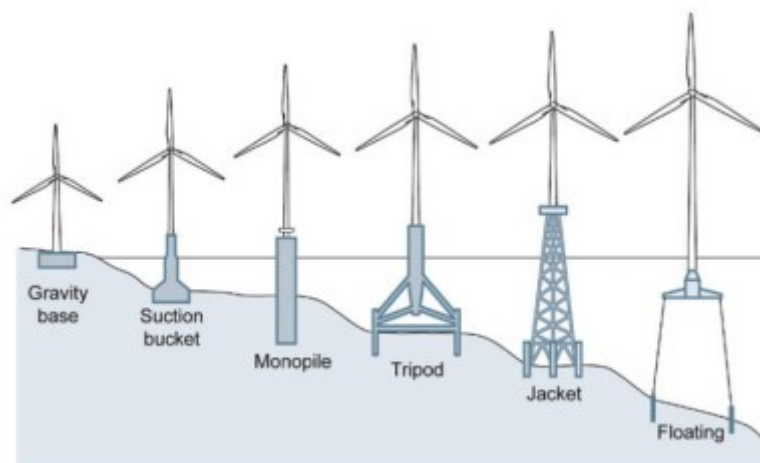


Figura 7 - tipos de estruturas de aerogeradores, em aço. Fonte: Worldsteel Association (2015).

Alguns geradores de grande porte, de classe megawatt, possuem pás com estrutura externa metálica, estas entretanto apresentam uma dificuldade no transporte, já que tem de ser transportadas já na forma final, exigindo caminhões ou trens de carga para o deslocamento e guindastes para a fixação correta (WORLDSTEEL, 2015).

Existem estudos da aplicação de pás metálicas, feitas com folhas de metal conformadas para adquirirem o formato aerodinâmico simples através de processo de dobra e solda. Estes estudos enfatizam a alta reciclabilidade do metal, o baixo custo dos processos envolvidos e a facilidade de reposição e manutenção futuras. Os metais também estão presentes em núcleos de motores elétricos, geradores, sensores, condutores elétricos, cabos de transmissão de energia e indiretamente na indústria do transporte e manutenção nas aplicações em caminhões, trens de carga, guindastes e demais estruturas associadas aos aerogeradores.

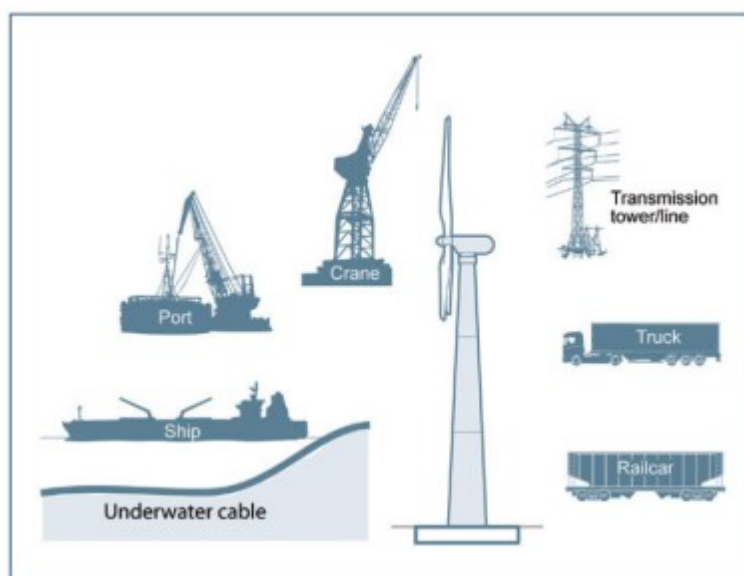


Figura 8– Estruturas metálicas da cadeia de produção da energia eólica. Fonte: Worldsteel (2015).

O grande índice de reciclagem do aço, incentivou empresas a criarem pás para aerogeradores de pequeno porte feitas inteiramente em metal conformado, com destaque para a empresa Fraunhofer que ganhou o premio de inovação Climate Protection with Steel em 2015 com pás construídas utilizando este processo. (Incremental Sheet Metal Forming, 2015).

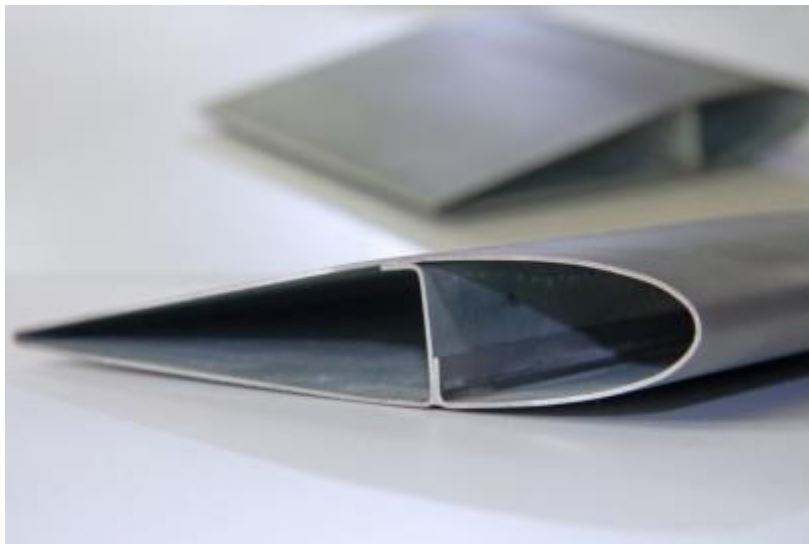


Figura 9 – Perfil de pá de aerogerador de pequeno porte produzido pela Fraunhofer. Fonte: Fraunhofer (2015).

3.3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são materiais compostos por dois ou mais elementos a fim de gerar um único material com duas fases que tem comportamento similar aquele dos materiais de origem, bem como características únicas a forma composta (CALLISTER e RETHWISCH, 2010). No caso dos aerogeradores, os plásticos reforçados com fibras se destacam por sua facilidade de fabricação, leveza, boa resistência mecânica, grande resistência a agentes externos do clima e baixo custo.



Figura 10 - pás de aerogeradores de pequeno porte em fibra de vidro. Fonte: Qingdao Minshen Wind Power Technology LTD.

Devido à resistência estrutural limitada, materiais compósitos são utilizados na nacele, leme e pás dos aerogeradores, mas não nas torres e demais componentes estruturais. As fibras de vidro e fibras de carbono são as mais utilizadas junto a resina epóxi na formação de compósitos com fibras multidirecionais para a construção das pás de aerogeradores, devido a facilidade de conformação, baixo peso e grande resistência mecânica (ASHWILL, 2009).

Nos geradores de grande porte, as fibras de carbono e aramida, junto de estruturas de metal, madeira ou ambos, são componentes indispensáveis para a resistência e aumento significativo da vida útil do gerador (GURIT AG, 2015). Estes materiais, entretanto, ao serem reciclados podem ser aproveitados para outros itens, mas não são transformados novamente em tecidos de fibras longas, necessários para a fabricação das pás.

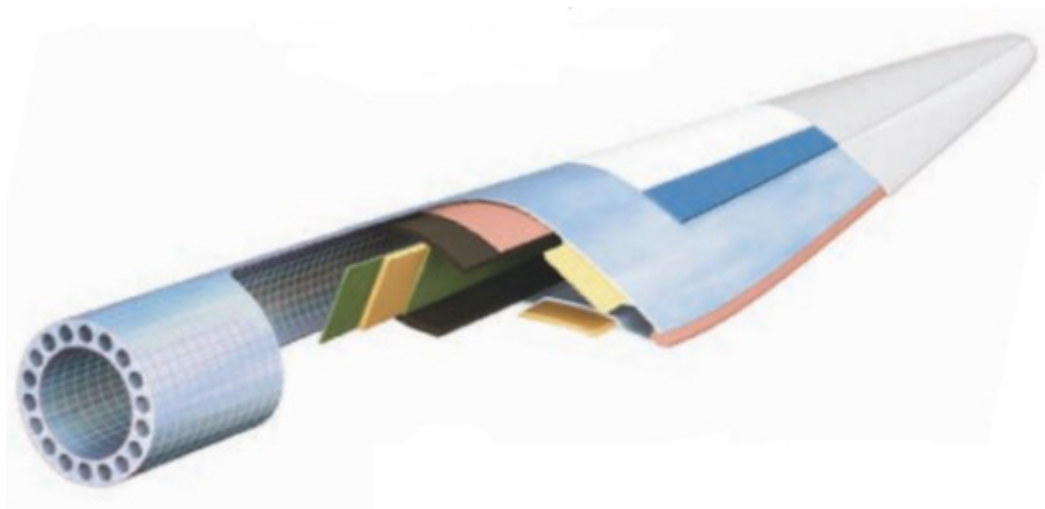


Figura 11 - Aerofólio em vista de corte, mostrando as diversas camadas de materiais da construção.
Fonte: Gurit AG (2015).

Ainda que a reciclagem dos compósitos seja dificultosa, sua grande resistência aos fatores climáticos faz com que as peças, se processadas de maneira a atender os requisitos adequados a aplicação a que serão submetidas tendem a ultrapassar a expectativa de vida útil, desde que não sejam danificadas por fatores externos. As fibras de vidro apresentam a melhor relação custo-benefício se comparados os custos e sua resistência mecânica (fonte). Compósitos mais complexos podem ser criados combinando camadas de fibras de vidro, carbono e aramida a fim de se beneficiar de diversas propriedades, entretanto, o custo destes materiais cresce exponencialmente.

Nas aplicações mais recentes e de maior escala, o uso combinado de madeira, resinas e fibras plásticas é indispensável para manter o menor peso e a maior área útil do rotor (ASHWILL, 2009).

Recentemente, um grande número de pesquisadores de diversos segmentos da indústria tem demonstrado interesse em compósitos contendo materiais orgânicos devido ao menor custo de produção e a possibilidade de extração renovável (ZIJIE, 2011). Na indústria naval e aeroespacial, cascos de barcos pequenos e asas de aviões já fazem uso destes materiais em suas estruturas e compósitos desde os primórdios, com excelentes resultados.



Figura 12 – A esquerda, camada de madeira balsa sendo aplicada no molde de pá de material compósito, a direita iate dos anos 70 feito de compósito madeira-resina. **Fonte:** HANCOCK, 2014.

Devido a grande semelhança entre as pás do rotor do aerogeradores e as hélices utilizadas na aviação, o mesmo conjunto de técnicas pode ser utilizado para atingir os resultados necessários (HANCOCK, 2014), gerando assim, pás com núcleos de madeira beneficiadas por sua capacidade estrutural e superfície de plástico reforçado com fibras de vidro, aproveitando a grande estabilidade química e resistência a impactos deste material.



Figura 13 - Perfil de asa contendo núcleo em madeira balsa (plywood) e camada externa em fibra de vidro. **Fonte:** HANCOCK, 2014.

Desta forma, as pás dos aerogeradores modernos podem ter seus custos reduzidos e sua capacidade energética ampliada, tornando estas máquinas mais acessíveis em diversos

níveis e incentivando a proliferação de redes inteligentes e diminuindo significativamente as emissões de CO2 nos ciclos de produção de energia.

4. SELEÇÃO DE MATERIAIS

Com objetivo de analisar e compreender os diversos materiais utilizados nas pás do rotor, realizou-se uma seleção de materiais computadorizada com o software Cambridge Engineering Selector® (CES EduPack 2015) a fim de verificar se há outros materiais que possam apresentar melhores propriedades frente aos requerimentos necessários para o funcionamento destas pás. Este software possibilita realizar, de modo virtual, o cruzamento de propriedades de materiais, onde, a partir de um banco de dados, se faz a triagem dos materiais coincidentes aos requisitos solicitados, eliminando os que não atendem os requisitos em questão.

Assim, foram elaborados dois gráficos comparando alguns materiais, um em termos de módulo de elasticidade (propriedade importante para comparar a rigidez de componentes submetidos a deformações elásticas) versus densidade (ou massa específica – que é importante para componentes de baixo peso) e outro em termos de tensão de escoamento (para comparar os valores até onde o material suporta de esforços antes que uma deformação irreversível possa ocorrer) versus preço. Como de acordo com a bibliografia (GURIT AG, 2015) os principais materiais que vem sendo utilizados são: aço, madeira, compósitos com fibra de vidro e com fibra de carbono, assim, estes foram tomados como base e incluídos no subconjunto junto com outros candidatos promissores.

Através da análise dos gráficos gerados pelo software, podemos perceber que os materiais tendem a crescer em custo conforme suas propriedades mecânicas também se ampliam. O dimensionamento correto do uso de materiais para o projeto é essencial para encontrar as melhores relações custo-benefício para atingir as metas propostas.

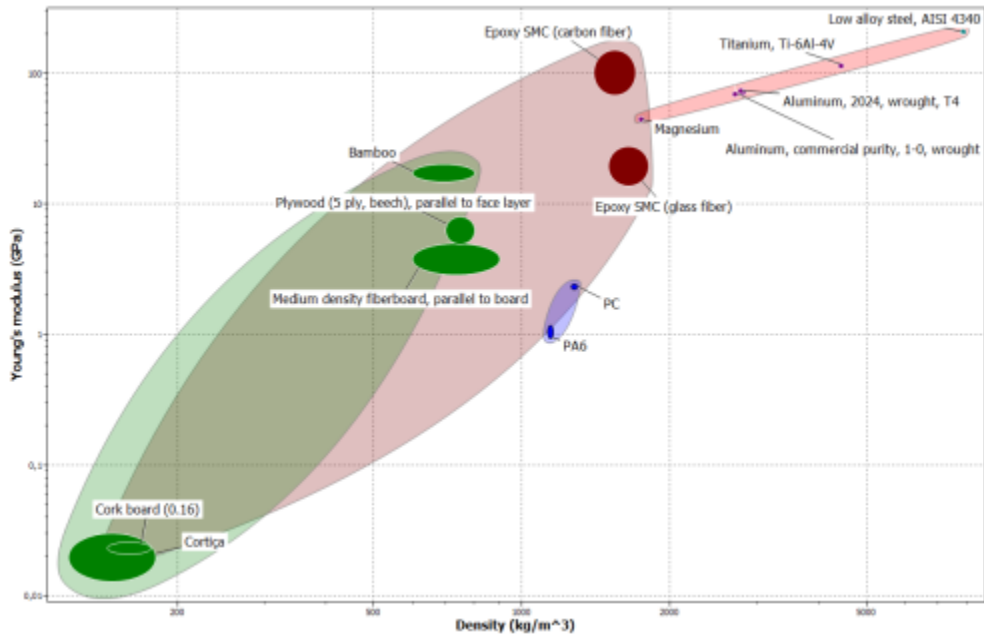


Figura 2 – gráfico da seleção de materiais comparando densidade e elasticidade. **Fonte:** elaborado pelo autor.

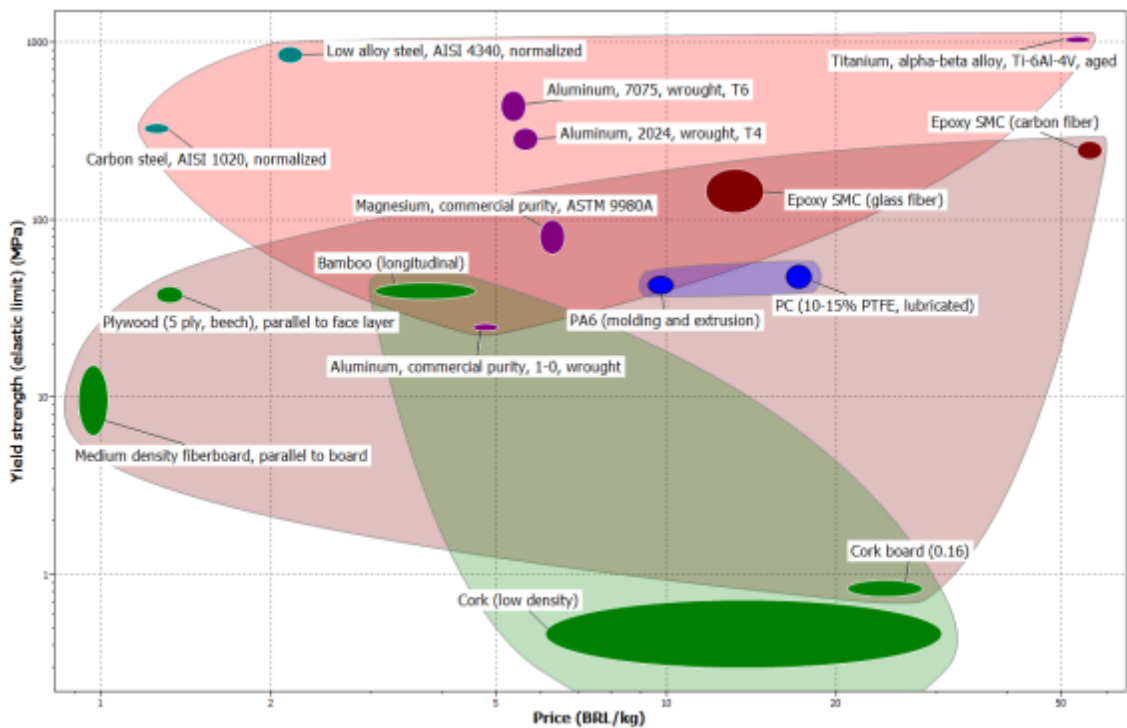


Figura 3 – gráfico da seleção de materiais comparando preço e limite de escoamento. **Fonte:** elaborado pelo autor.

Considerando os dados apresentados pelo software CES, podemos ver que os metais e compósitos, especialmente a fibra de carbono, tem módulo de elasticidade muito similar e a medida que esta capacidade mecânica aumenta pouco, o custo, em contrapartida, cresce exponencialmente quando observamos ligas de maior resistência.

Para um projeto onde o custo seja uma consideração importante, a madeira balsa (*plywood*) e o bambu mostram-se como opções vantajosas uma vez que possuem valores de tensão de escoamento superiores as do alumínio puro, e densidades menores

que compósitos de fibra de carbono em matriz polimérica, por exemplo. O bambu é mais rígido, porém consideravelmente mais caro, além de ter a desvantagem de apresentar mais dificuldade a moldagem na forma das pás. Assim, como material com potencial para substituir os tradicionais, a madeira balsa mostra-se um candidato promissor em aplicações de pequeno porte. A maior dificuldade no uso de madeira como componente externo de aerogeradores é a dificuldade de moldar formas aerodinâmicas ideais e sua natureza orgânica biodegradável que requer tratamentos químicos ou adição de resinas para resistir aos ambientes externos.

5. CONCLUSÃO

Constata-se que a madeira é utilizada como material para captar energia eólica desde o princípio do seu desenvolvimento e que, após o advento e uso de diversos materiais esta retorna como possibilidade inovadora desta indústria. Recentes pesquisas visando eficiência energética, considerando ciclo de vida e novas tecnologias em materiais demonstram que a madeira, se processada adequadamente pode agregar excelentes propriedades estruturais nas torres e pás de aerogeradores de qualquer porte, permitindo um maior alcance destas máquinas na geração de energia. Entretanto, estas pás compostas por madeira e compósitos ainda que mais baratas e eficientes que suas contrapartes metálicas têm baixo índice de reciclabilidade, cujo aproveitamento no fim da vida útil das pás deve ser avaliado e direcionado a produção de bens de menor valor agregado ou menor exigência estrutural. As pás de metal mostram-se excelentes alternativas para geradores de pequeno porte produzidos em larga escala, entretanto seu processo de produção ainda não foi amplamente difundido. Os metais e compósitos cumprem função essencial nos geradores eólicos. Metais exercem funções importantes nas estruturas e fixações, na forma de elementos auxiliares como rolamentos, parafusos e rebites, componentes de motores elétricos, alternadores e geradores e cabos de transmissão de energia. Os compósitos são excelentes materiais para a superfície das pás, sua estrutura interna e a construção da carenagem (nacele) e leme, principalmente as resinas desempenhando um papel importante como matriz polimérica e tratamento de superfície.

BIBLIOGRAFIA

- AL-ABADI, A. **Novel Strategies for Aerodynamic Performance Improvement of Wind Turbines in Turbulent Flow**. Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität. Erlangen. 2014.
- ASHWILL, T. D. Materials and Innovations for Large Blade Structures. **50th AIAA Structures, Structural Dynamics & Materials Conference**, Palm Springs, Maio 2009.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering - An Introduction**. 8^a. ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., v. I, 2010.
- CLEVELAND, C. J. **Encyclopedia of Energy**. 1^a. ed. Amsterdam, Holanda: Elsevier, v. I, 2004.
- FRAUNHOFER INSTITUTE FOR MACHINE TOOLS AND FORMING TECHNOLOGY IWU. **Incremental Sheet Metal Forming**. Chemnitz, Alemanha. 2015.
- GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. **Wood as an Engineering Material**. 1^a. ed. Madison, Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture, v. I, 1999.
- GURIT AG. **Materials for Wind Turbine Blades**. Gurit Holding AG. Wattwill, Suíça. 2015.
- HANCOCK, M. **Wooden Wind Turbine Blades**. Wind Energy Institute. Flensburg, Alemanha. 2014.
- HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 2^a. ed. Berlin, Alemanha: Springer-Verlag, v. I, 2006.
- HAYMAN, B. E. A. Materials Challenges in Present and Future Wind Energy. **MRS Bulletin**. 343-353.
- NASA. **Classical Aerodynamic Theory**. 1^a. ed. Moffet Field: NASA - Scientific and Technical Information Branch, v. I, 1979.
- SCHUBEL, P. J.; CROSSLEY, R. J. Wind Turbine Blade Design. **Energies**, Basel, Suíça, 6 Setembro 2012. 3425-3449.
- TIMBER TOWER GMBH. **Timber Tower Product Brochure**. Timber Tower GMBH. Hannover, Alemanha. 2015.
- WORLDSTEEL. **Steel Solutions in The Green Economy**. World Steel Association. Bruxelas, Bélgica. 2015.
- ZIJIE, W. **Bamboo Laminate Composite on Wind Turbine Blade Application**. Manchester University. Manchester, Inglaterra. 2011.