



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DE TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL CVTs EM GERADORES DE ENERGIA EÓLICA

Lucas Inácio Rodrigues Damasceno, luckaoeu@gmail.com¹
Geraldo Gonçalves Delgado Neto, geraneto@fem.unicamp.br¹
Vivianne Vieira Delgado, vivianne@fem.unicamp.br¹
Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva, ludmila@fem.unicamp.br¹
Franco Giuseppe Dedini, dedini@fem.unicamp.br¹

¹Unicamp- Faculdade de Engenharia Mecânica, Rua Mendeleiev, s/n - Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo - Campinas – SP- Caixa Postal 6122 CEP: 13.083-970

Resumo: *A proposta deste trabalho é apresentar a viabilidade da construção de uma simulação virtual utilizando CVT (Transmissão Continuamente Variável) em geradores de energia eólica, através de uma coleta de dados e análise dos principais parâmetros de um aerogerador. As transmissões continuamente variáveis, CVTs, são caracterizadas pela utilização de materiais de alto coeficiente de atrito nos contatos e alta resistência, geralmente um metal ou aço especial, trabalhando em meio viscoso (lubrificação específica) com pequenos escorregamentos, tendo assim alta capacidade de transmissão de energia. O princípio básico é o mesmo para qualquer modelo de CVT, a mudança na geometria de seus pontos de contatos. No entanto, outra família de CVTs está atualmente sendo descoberta e cada vez mais estudada e é caracterizada pela utilização de movimentos relativos e geometrias complexas na transformação do movimento de entrada, normalmente uma rotação contínua, em movimentos oscilatórios variáveis e bem determinados. Apesar da imensa variedade de modelos de CVT disponíveis com alta eficiência comprovada, ocorre uma baixa aceitação por parte de empresas para aplicações não convencionais desta tecnologia. Desta forma a simulação em ambiente computacional, ou seja, em realidade virtual, permitiria a compreensão e visualização adequadas para estas transmissões complexas.*

Palavras-chave: *CVT, energia eólica, aerogeradores*

1. INTRODUÇÃO

1.1. CVT

Os sistemas de transmissões são utilizados desde os primórdios da humanidade, e as vantagens que eles podem proporcionar a um sistema mecânico já são bem conhecidas. Já os sistemas de transmissão continuamente variáveis, por sua vez, são relativamente novos comparados com a maioria dos já inventados, mas não tanto quanto se imagina. Em 1886 Daimler criou a primeira CVT, mas só com os avanços tecnológicos nas áreas de materiais e controle que vêm ocorrendo ao longo do tempo que se tem conseguido desenvolver sistemas que tenham boa eficiência, boa durabilidade e que sejam viáveis economicamente, para que possam ser aplicados em automóveis e em algumas outras aplicações não convencionais (Raizer, 2008). Antes desses recentes avanços, os sistemas CVTs eram usados basicamente em máquinas industriais, como tornos e fresadoras (Albuquerque, 2003), porém atualmente alguns automóveis já são equipados com esse sistema, como o Honda Fit no caso do Brasil, além de outros veículos no exterior, como alguns dos japoneses Toyota e Nissan e da alemã Audi.

CVT é uma classe de transmissões, que como a sigla já indica, enquadra modelos que têm a capacidade de mudar a razão de transmissão continuamente. Isso é feito com mudanças geométricas no sistema, que são capazes de fornecer infinitas relações dentro de uma faixa. O sistema de controle é de grande importância para o bom rendimento da CVT, sendo ele o responsável por escolher a melhor relação, dependendo da necessidade, assim pode-se trabalhar em uma condição que transmita o melhor torque ou que alcance maiores velocidades, por exemplo (Raizer, 2008).

Nesse artigo busca-se estudar a CVT aplicada a um gerador eólico, apresentando uma solução alternativa, buscando soluções mecânicas para alguns problemas que normalmente têm suas soluções buscadas na área elétrica, apresentando as vantagens que essa alternativa poderia trazer à turbina eólica.

Para ilustrar melhor as vantagens do uso de uma CVT em aplicações mais usuais, como em um automóvel, por exemplo, Albuquerque (2003) cita a capacidade dela de trabalhar na melhor eficiência para cada rotação do motor, o que acarreta um menor consumo de combustível, e conseqüentemente, uma menor emissão de poluentes. Apesar desse

desenvolvimento, ainda não se tem uma plena aceitação dessa tecnologia no mercado, mas isso já tem mudado bastante, sendo que algumas indústrias automotivas já citadas aqui lançaram modelos de veículos equipados com transmissão CVT.

A aplicação de uma transmissão como essa em um gerador eólico é algo que ainda não apareceu no mercado. Os benefícios dessa associação dependem de muitos fatores, como por exemplo, o tamanho da turbina eólica, o tipo de ligação que o gerador tem com a rede elétrica e a localização geográfica da turbina.

1.2. Energia Eólica

Paralelamente a esse cenário de novos modelos de CVTs, tem-se hoje uma preocupação cada vez maior com as questões ambientais e energéticas, e muitas soluções têm sido apontadas para resolver essas questões. Uma fonte energética, que assim como a transmissão aqui estudada, não é nova, mas tem ganhado mais espaço no cenário mundial nos últimos anos, é a energia eólica, apontada como uma saída extremamente viável para os problemas energéticos e ambientais. Os populares “cataventos” são máquinas utilizadas desde a antiguidade. No Império Persa, por exemplo, por volta do ano 200 a.C., a energia provinda deles era utilizada na moagem de grãos e bombeamento de água, mas acredita-se ainda que antes disso, no Império Babilônico por volta do ano 1700 a.C. e na China por volta do ano 2000 a.C. eles eram utilizados para irrigação. Na Europa eles chegaram no período das Cruzadas, e de início foram usados para os mesmos fins que eram utilizados por esses povos antigos. Até então, os modelos eram os de eixo vertical, um modelo primitivo, que apesar disso, atendia as necessidades da época. Algum tempo depois, no período do Renascimento, surgiram na Europa os modelos com eixo horizontal, modelos esses capazes de produzir maior potência. Essa nova configuração foi de extrema importância nessa época, pois com o advento da imprensa a produção de papel precisava ser maior e máquinas movidas pela força dos ventos foram de grande importância para esse trabalho. Outra aplicação importante dos “cataventos” nessa mesma época aconteceu na Holanda, onde foram utilizados na drenagem das terras que se situavam abaixo do nível do mar. Contudo, com a revolução industrial, a utilização dos aerogerados se reduziu bastante, sendo substituídos, quando era conveniente, por máquinas a vapor. No fim do século XIX, com a expansão do uso da eletricidade, surgiu a necessidade de que ela fosse fornecida também às regiões mais afastadas das zonas urbanas. Pensando nisso, o industrial Charles Brush foi o primeiro a obter sucesso na construção de uma turbina eólica para a produção de energia elétrica, em 1888, na zona rural da cidade de Cleveland, no estado de Ohio, nos Estados Unidos. Sua turbina esteve em funcionamento até 1908, sendo considerada um marco do uso da energia eólica para a produção de energia elétrica. Desde então, essa tem sido a principal função dos aerogeradores CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito).

Ao longo do século XX o uso da energia eólica para se obter eletricidade aumentou consideravelmente, principalmente a partir da década de 1990. Fato explicado pela maior preocupação com o meio ambiente e com a possível escassez das fontes energéticas no futuro que vem ocorrendo desde então. Porém, mesmo antes da década de 1990, alguns países já tinham feito um bom investimento nesse ramo de energia, como a Alemanha, Estados Unidos, Espanha e Dinamarca. Até pouco tempo a Alemanha era o país com o maior potencial instalado no mundo, mas no ano de 2008 os Estados Unidos assumiram esse posto, tendo atualmente em seu território cerca de 25000 MW instalados, enquanto os alemães têm por volta de 22247 MW. Apesar desses valores, muito mais poderia ser investido nessa área, pois no caso dos Estados Unidos, por exemplo, sabe-se que seu potencial eólico, medido a 50 metros de altura, gira em torno de 200GW. A China é um país que ainda não possui um grande potencial instalado como os Estados Unidos e a Alemanha, mas foi o país com maior crescimento no ano de 2008 (Júnior, 2009). Para ser ter uma idéia maior do crescimento do uso da energia eólica, Antunes (2002) diz que em 1999 o potencial instalado no mundo era de 13000MW, em 2000 já era de 17500, e em 2001 chegou a 24600MW, quase o dobro de dois anos antes. Atualmente a estimativa é de que o potencial instalado no mundo hoje é de 130GW, com uma taxa de crescimento média de 30% ao ano.

1.3. Brasil

O Brasil acompanha a crescente da energia eólica em todo o mundo. Com novas tecnologias, um novo Atlas Eólico Brasileiro será lançado até o fim de 2010, pois o último, feito em 2001, considerava regiões apropriadas para a instalação de aerogeradores locais com no máximo 50 metros de altitude. Porém, novas tecnologias hoje permitem que se obtenha energia com eficiência satisfatória a até 100 metros de altitude, assim estados como São Paulo, Alagoas e Rio Grande do Sul entram com mais representatividade no cenário eólico nacional. Os estados com o maior potencial, entretanto, continuam sendo Ceará e Rio Grande do Norte, sendo o primeiro deles o que possui o maior potencial, e o maior potencial instalado também. Em 2001, o potencial brasileiro era de 143 GW, mas o potencial instalado estava bem abaixo desse valor, sendo estimado em aproximadamente 550 MW. Com o novo cálculo, acredita-se que chegue aos 250 GW.

Silva (2003) fez um estudo detalhado dos ventos na região nordeste. Segundo ele, a região litorânea que começa no Piauí, passa pelo Ceará e se estende até o Rio Grande do Norte, é a região mais apropriada para a instalação de aerogeradores no país, com ventos com velocidade médias de 7 a 9,5 m/s durante o ano, baixa turbulência, sem bruscas variações sazonais, baixo gradiente vertical (é melhor para a geração de energia que o deslocamento do vento esteja na posição mais horizontal possível). Por esses fatores essa é a região brasileira mais promissora nesse ramo de energia, tendo o maior potencial instalado.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Aeroeradores

O desenvolvimento tecnológico do século passado também alcançou o ramo de energia eólica, e devido a isso a partir dos anos de 1980 e principalmente de 1990, o custo para instalação, principalmente, e manutenção de aeroeradores caiu consideravelmente, viabilizando economicamente a expansão do uso da energia eólica. É importante frisar que os custos de manutenção dos aeroeradores são baixos, se comparados com o custo de outros meios de gerar energia. Esse desenvolvimento dos aeroeradores, além de reduzir os custos, aumentou a eficiência deles. Atualmente produzem-se turbinas eólicas maiores, e que produzem muito mais potência do que as mais antigas, como pode ser visto na Fig. (1), abaixo.

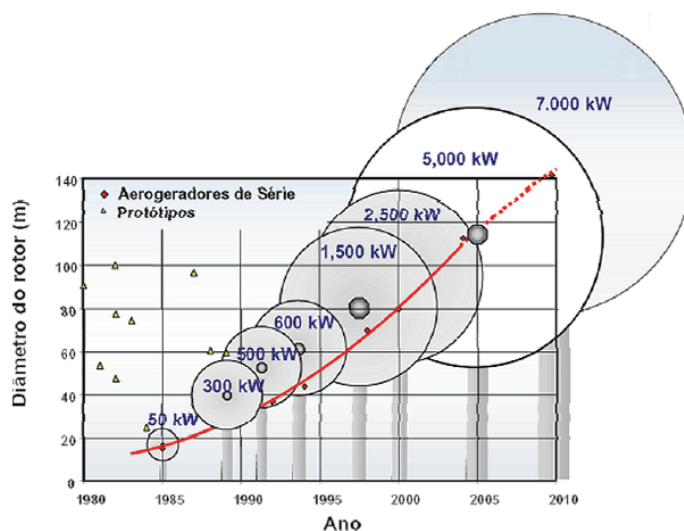


Figura 1. Evolução das turbinas eólicas em relação ao diâmetro e a potência produzida (CRESESEB, 2008).

Na introdução desse trabalho pode ser visto que há basicamente dois grandes grupos nos quais os aeroeradores podem ser divididos, o dos que possuem o eixo do rotor vertical e o dos que possuem o eixo horizontal. O foco desse trabalho será na utilização de uma transmissão CVT em turbinas com eixo horizontal, pois é o tipo mais utilizado atualmente, devido a fatores que serão mencionados adiante, porém uma breve introdução sobre turbinas com eixo vertical será dada, a título de comparação.

2.1.1. Aeroerador de eixo vertical

Uma turbina eólica com eixo vertical é o tipo mais primitivo de aeroerador, era o modelo usado na antiguidade pelos persas, chineses e babilônios. Esse modelo tem a vantagem em relação às turbinas de eixo horizontal de que a direção do vento não é um fator preocupante, mas tem desvantagens que fazem com que seja pouco utilizado atualmente (CRESESEB, 2008). A principal desvantagem se deve à eficiência, que é menor com relação à outra construção, mas, além disso, há outros malefícios, como o fato de que elas funcionam bem apenas sob baixa intensidade dos ventos, o que acarreta em menor capacidade de produzir potência, e que como as pás estão sujeitas a um carregamento alternado, estão também mais sujeitas à fadiga do que as das turbinas com eixo horizontal. O nível de ruído e a vibração também constam na lista de problemas desse modelo. A Fig. (2) ilustra um modelo de um aeroerador com eixo vertical.



Figura 2. Exemplo de um aeroerador com eixo vertical moderno (Antunes, 2002).

2.1.2. Aerogerador de eixo horizontal

Aerogeradores com eixo horizontal são os mais comuns atualmente, pois eles são capazes de desenvolver maiores velocidades no rotor, por consequência, produzem maior potência. Dos existentes hoje no mercado, o CRESESB (2008) dividiu-os ainda em dois outros grupos, o dos geradores tradicionais, que trabalham com uma caixa de transmissão entre o rotor e o gerador elétrico, ilustrado na Fig. (3), e o grupo dos não tradicionais, que surgiu mais recentemente. Fazem parte desse último grupo turbinas eólicas mais modernas, nas quais não há um equipamento fazendo a multiplicação de rotação entre o rotor e o gerador elétrico, pois essas turbinas utilizam os geradores denominados multipolos, os quais trabalham a baixa rotação e têm grandes dimensões.

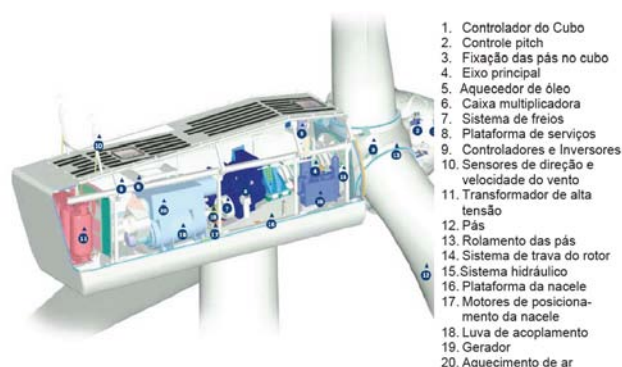


Figura 3 – Representação dos Componentes de um Aerogerador. (CRESESB, 2008).

O CRESESB (2008) fez uma breve descrição dos componentes de um aerogerador, resumida abaixo:

Nacela: localiza-se acima da torre, sendo esse o componente da turbina que comporta a maior parte dos componentes do aerogerador. É onde se localizam a caixa de transmissão (quando existe), o eixo principal e o gerador elétrico. A imagem acima é uma nacela cortada, para que os componentes internos possam ser visualizados.

Pás: conecta-se ao cubo por flanges, é responsável por “receber” a força do vento e transmiti-la ao resto do sistema. É um componente frágil, portanto deve-se tomar cuidado na sua construção, de acordo com a velocidade do vento na região, pois em altas velocidades elas podem fletir mais do que o previsto no projeto, chegando a se chocar com a torre, causando acidentes de grandes proporções.

Torre: tem se tornado cada vez mais importante, pois cada vez mais os componentes dos aerogeradores têm se tornado maiores e mais pesados do que os antigos. Por esse fato, e por serem construídas cada vez mais altas, atualmente são de concreto ou metal tubular, chegando às vezes a ter cabos tensores para auxiliar na sua sustentação.

Gerador: é o principal componente de uma turbina eólica. Ele deve ser capaz de transformar a energia de rotação que vem do rotor, passando essa por uma transmissão ou não, em eletricidade. A tecnologia de transformar energia mecânica em elétrica é bem dominada pela humanidade, não sendo problema nos dias atuais. As dificuldades que se encontram atualmente na operação dos geradores elétricos nas turbinas eólicas estão associadas principalmente à variação da velocidade do rotor com a variação do vento. O gerador é provavelmente o componente que deve receber maior atenção no sistema, pois além de ser o mais caro, é de difícil acesso e grande importância. Apesar da probabilidade de um defeito no gerador elétrico causar um acidente de grande proporção não ser grande, como no caso das pás, uma falha nesse componente pode causar um caos no fornecimento de energia elétrica.

Transmissão: é importante em um aerogerador, pois a rotação que o rotor pode alcançar com a força dos ventos é muito menor do que a rotação que um gerador necessita para gerar energia. Em geral a rotação que o rotor alcança está entre 20 e 150 RPM, enquanto a frequência angular na qual o gerador elétrico deve trabalhar se situa na faixa de 1200 a 1800 RPM. É importante lembrar que a rotação do rotor também é restringida pelas pás, que caso operem em altas rotações ficam sujeitas a esforços maiores, principalmente em suas pontas, causando a flexão indesejada nelas, já citada anteriormente, por isso a relação de transmissão em um aerogerador é muito baixa. O modelo de transmissão usado normalmente é o escalonado, com apenas uma relação de transmissão disponível.

Projetos mais modernos são produzidos sem caixa de transmissão, para tal, utilizam um gerador multipolos, que é um tipo de gerador que opera a baixas velocidades, mas que possui dimensões maiores. Mesmo com esses equipamentos mais modernos, que diminuem o número de componentes de um aerogerador, ainda hoje o modelo com transmissão é mais utilizado, devido ao fator econômico, já que a tecnologia usada em um gerador multipolos é mais recente, e, portanto, mais cara, sendo esse modelo usado apenas em equipamentos de grande porte, nos quais há retorno financeiro.

2.2. Solução Proposta

Conhecendo-se melhor o funcionamento dos aerogeradores, pode-se agora fazer uma análise de alguns problemas nele encontrados, que poderiam ser resolvidos com a solução aqui proposta. Analisando os problemas que o CRESESB (2008) apontou que um gerador elétrico pode ter na sua integração com o sistema mecânico da turbina eólica, pode-se citar três de interesse nesse trabalho:

- Variações na velocidade dos ventos (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- Variações no torque de entrada (a variação da velocidade do vento induz variação na potência disponível no eixo, que em seguida é fornecida ao gerador);
- Exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida, que deve ser fornecida a rede elétrica.

Nos sistemas que possuem transmissão, normalmente a velocidade que a transmissão fornece ao gerador não resulta na frequência que deve ser fornecida à rede elétrica, então, para solucionar esse problema quando o gerador é do tipo síncrono, o que se utiliza atualmente são sistemas eletro-eletrônicos de conversores de frequência elétrica localizados no circuito elétrico após o gerador, para que a frequência seja sincronizada com a rede. Porém, esses sistemas de conversão trazem algumas perdas na geração de energia, através da geração de harmônicos, além de fazer com que os esforços na construção sejam maiores, pois além da presença dos conversores, a presença de filtros que reduzam a geração de harmônicos é indispensável, assim os custos na construção acabam se tornando elevados, o que torna viável sua instalação apenas em aerogeradores de grande porte. Esse tipo de sistema só é útil quando a variação da velocidade com que o gerador gira não varia mais do que 30 % (Tanz, 2006-2009). Quando o gerador é do tipo assíncrono é indispensável a presença de capacitores para minimizar a perda de energia devido a potência reativa.

Além de interferir negativamente na integração com a rede elétrica, essa variação da velocidade do rotor ainda traz outros problemas. Dentre esses, pode-se citar o fato de que em alguns momentos a intensidade do vento no local pode atingir um valor muito alto, e o gerador, como qualquer máquina elétrica, tem uma velocidade máxima de trabalho, e caso essa seja excedida ele pode vir a sofrer danos indesejáveis. Essas mesmas condições podem influenciar negativamente nas pás, pois como já dito, elas podem sofrer flexão acentuada, chocando-se com a torre, podendo provocar acidentes de grandes proporções. Para o caso oposto, baixa intensidade do vento no local, outro problema pode ocorrer, que seria o de rotação insuficiente para a geração de energia.

Analisando esses problemas na integração do gerador elétrico com os componentes mecânicos do aerogerador e com a rede elétrica, pode-se pensar em algumas alternativas para solucioná-los. A proposta aqui é de uma mudança no sistema de transmissão, a fim de que ele possa contornar as adversidades citadas acima com uma solução mecânica, e não no sistema elétrico, como ocorre normalmente. Se uma transmissão puder fazer com que a velocidade do gerador seja sempre constante, na qual o gerador trabalhe da melhor maneira, com mínima variação de torque, trabalhando sempre na mesma frequência (a que melhor se adapta à rede elétrica na qual o gerador está conectado), isso para qualquer velocidade que o vento imponha sobre o rotor, pode-se dizer que essa transmissão poderia solucionar esses problemas.

Uma transmissão do tipo continuamente variável poderia ser a escolhida. Esse sistema poderia evitar a presença dos conversores de frequência, que geram perdas ao sistema, pois com a CVT o gerador poderia trabalhar na relação de transmissão que fornecesse rotação ao gerador na frequência da rede elétrica, e também poderia evitar que os geradores multipolos fossem utilizados, o que também pode-se considerar como uma vantagem, devido ao maior espaço que eles ocupam na nacelle. Além disso, uma transmissão desse tipo poderia auxiliar na frenagem, nos casos de intensidade do vento muito forte e também em casos de necessidade de controlar a velocidade de rotação do gerador, para que ele não sofra nenhum dano. Também esse sistema poderia ajudar na geração de energia mesmo com baixa intensidade eólica, pois ele poderia trabalhar em uma relação de transmissão que mesmo nessa situação fizesse com que o gerador tivesse uma rotação satisfatória.

Um quadro morfológico será produzido, com o objetivo de se apresentar algumas possíveis soluções. Porém essa ferramenta não é suficiente para se dizer que uma solução definitiva foi encontrada. É necessário ainda que se faça uma simulação computacional, utilizando os elementos do quadro morfológico, para que assim seja conhecida a melhor alternativa de construção.

2.3. CVT

Visto que os modelos de CVTs estão mais difundidos no mercado atualmente, a variedade deles já não é tão pequena quanto foi em tempos passados, assim uma breve apresentação será feita aqui sobre os principais tipos, para que se possa conhecer melhor os modelos que podem ser usados no sistema estudado. A análise que será feita se restringe basicamente a uma breve descrição, e a comparação da eficiência e de algumas características físicas deles.

Raizer (2008) dividiu os modelos de CVTs basicamente em dois grupos, o grupo dos modelos de tração e o dos modelos de fricção. A diferença básica entre esses dois tipos é a presença ou não de um fluido lubrificante entre as partes metálicas que transmitem movimento. Enquanto no primeiro esse filme de óleo está presente, no outro a transmissão é feita diretamente pelo contato metal-metal. No modelo de tração a principal vantagem é que o lubrificante ajuda a prolongar a vida útil do sistema, já que as superfícies metálicas estão sempre separadas pelo filme de óleo, reduzindo assim o aquecimento e o desgaste por atrito, que são fenômenos normalmente prejudiciais a um sistema mecânico. Mesmo o contato não sendo direto, a eficiência na transmissão de potência consegue atingir valores elevados, pois o fluido entre as superfícies metálicas trabalha a pressões altíssimas, e com isso sua viscosidade aumenta consideravelmente, podendo-se dizer que ele “vitrifica”, aumentando assim a capacidade de transmissão de potência.

Entre os tipos mais comuns de transmissões CVTs encontrados nos automóveis, dos modelos que transmitem torque por tração, os mais utilizados são o toroidal e por polia expansível, mas os modelos tipo esfera e cônico também são bem conhecidos. Existem ainda modelos de polia expansível que são considerados CVTs de fricção, sendo esses os mais populares no mercado dentro desse grupo.

Como a eficiência será um dos fatores aqui comparados entre os modelos de CVTs, buscou-se na literatura uma expressão usada para quantificá-la. Narita et al (2006) ilustram que a eficiência de um CVT é calculada pela Eq. (1):

$$\text{Eficiência de transmissão} = \frac{\Omega_s \times M_s}{\Omega_p \times M_p} \quad (1)$$

Sendo que Ω representa a rotação, M o torque, e os subscritos “p” e “s” representam primário e secundário, respectivamente.

A título de se comparar a eficiência dos modelos de CVTs com a de uma transmissão escalonada, a mais usual em um aerogerador, encontrou-se na literatura um valor médio de 98% para essa (Nemoto et al, 2002). Como será visto adiante, esse valor é maior do que os valores encontrados para a maioria das CVTs, fato que já era esperado, já que nesse tipo de transmissão os dentes das engrenagens não permitem escorregamentos, o que é inevitável nos modelos de CVTs conhecidos.

2.3.1. Principais modelos de CVTs

2.3.1.1. Toroidal

Na Fig. (4) pode-se ver dois tipos de CVTs toroidais. À esquerda se vê um modelo semi toroidal, e à direita um toroidal de dupla cavidade, desenhado com o auxílio de um software. O princípio geométrico de funcionamento é o mesmo para essas duas configurações, e como pode-se observar, a construção desse modelo pode ser simples e compacta. O toroide de entrada transfere a rotação aos rolos, que por sua vez transferem a rotação ao toroide de saída, no caso do modelo semitoroidal. No caso do modelo de dupla cavidade o torque de entrada é transmitido ao sistema por uma engrenagem posicionada entre os toroides centrais, e é transmitido por dois pares de rolos aos dois toroides de saída. Uma vantagem mecânica desse sistema em relação ao semitoroidal é sua maior capacidade de transmitir torque, já que com essa configuração há quatro elementos responsáveis por essa função. Aliás, essa é uma característica geral dos sistemas toroidais (Raizer, 2008). Em ambos os sistemas os rolos têm suas posições dadas por um sistema de controle, que define essa posição de acordo com a necessidade. As variáveis que definem a relação de transmissão são as distâncias dos pontos de contato do rolo com o toroide de entrada e com o de saída ao eixo dos toroides. Na Fig. (5) pode-se visualizar melhor como o sistema funciona. A variação do ângulo θ (ângulo formado entre o eixo do rolo e uma perpendicular ao eixo dos toroides) determina a distância do ponto de contato entre o rolo e o toroide de entrada ao eixo dos toroides, assim como deste ao ponto de contato entre o rolo e o toroide de saída. A razão da altura da saída pela da entrada é a relação de transmissão.

Como já foi citado, o modelo toroidal faz parte do grupo dos modelos CVTs por tração, que tem como característica a presença de lubrificante no sistema. Nesses modelos o lubrificante age nos pontos de contato entre os rolos e os toroides.

Dentre as aplicações do modelo toroidal de CVT, se destacam as aplicações pesadas, como em caminhões e caminhonetes, devido a sua boa capacidade de torque, já citada aqui (Albuquerque, 2003). Sachetto (2008) diz que sua eficiência está na faixa de 92 a 98%, valores esses bastantes satisfatórios, considerando o fato de que há deslizamentos nesse sistema, que teoricamente dariam a ele a tendência de não transmitir bem o movimento entre as partes.

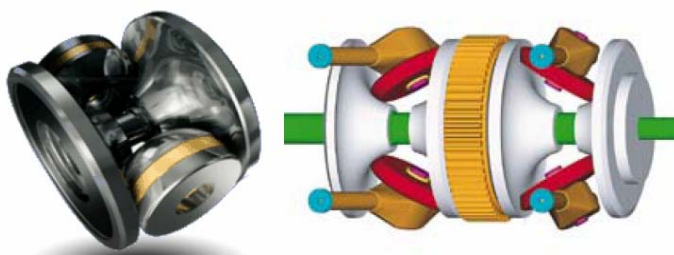


Figura 4. Modelo de CVT semitoroidal à esquerda e de dupla cavidade à direita (Raizer, 2008).

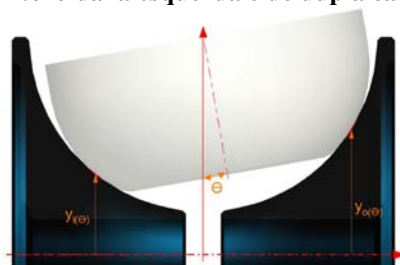


Figura 5. Pontos de contato do rolo com os toroides (Raizer, 2008).

2.3.1.2. Polia Expansível

Os modelos de CVTs de polia expansível podem trabalhar lubrificados ou “a seco”, pois o contato entre as partes metálicas não é tão intenso como acontece nos toroidais. Por esse fato também, os primeiros modelos de CVTs de sucesso que foram usados em automóveis, e até em carros de Fórmula 1, eram desse tipo. Seu mecanismo baseia-se em dois pares de pratos aproximadamente cônicos, os quais podem se aproximar ou se afastar (movimento esse que é comandado pelo sistema de controle). Esses pares de pratos são conectados por uma correia, e em alguns sistemas mais novos por uma corrente (Raizer, 2008). Como esses componentes ligantes têm comprimento invariante, quando a distância entre os pratos varia, pode-se dizer que o diâmetro efetivo de cada conjunto varia, permitindo assim uma nova relação de transmissão. As correias usadas nesse sistema são normalmente cônicas, para se adaptarem à conicidade dos pratos, e quando são usadas correntes normalmente elas possuem pinos nas laterais, que possuem a mesma finalidade.

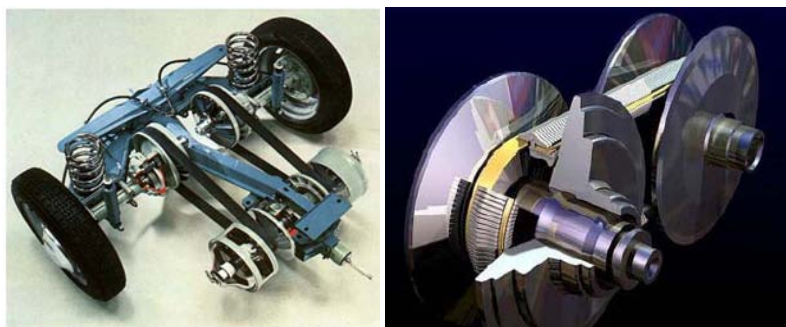


Figura 6. Dois exemplos de modelos de CVTs por polias expansíveis. À esquerda um modelo usado no DAF 55, com as polias ligadas por correias, e à direita um modelo mais moderno, que é feito com placas metálicas sustentadas por uma fita flexível (Albuquerque (2003) e Raizer (2008), respectivamente).

Na Fig. (7) há um comparativo ilustrando a eficiência da transmissão por corrente e por correia, para uma faixa de relação de transmissão baixa, que engloba a faixa que seria a utilizada na transmissão de um aerogerador. Pode-se ver que mesmo para uma relação baixa, a eficiência com a utilização de qualquer um dos dois componentes fica em uma faixa acima de 90%. Segundo Albuquerque (2003), com uma correia bem projetada, essa eficiência fica na faixa de 94 a 97%. Sachetto (2008) por sua vez diz que sua eficiência está em torno de 92%, e apesar dessa transmissão não ter seu uso recomendado para aplicações que exigem alto torque, em carros esportivos ela já foi usada para transmitir cerca de 640 HP (480 KW).

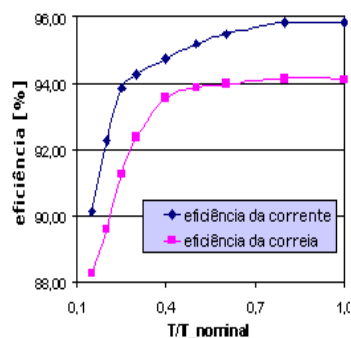


Figura 7. Comparativo entre transmissão por corrente e por correia (Albuquerque, 2003).

2.3.1.3. Nutation Traction Drive

Sachetto (2008) descreveu vários modelos básicos de CVT, além dos dois citados acima, que são os principais na indústria automotiva. Dentre os outros modelos por ele descritos, particularmente um de interesse nesse estudo é o *Nutation Traction Drive*, devido à sua alta capacidade de transmissão de potência (cerca de 300HP, ou 230 KW) e torque (cerca de 340 N.m), além de sua eficiência estar em torno de 96%, um valor acima da média para transmissões CVTs. Seu princípio de funcionamento é baseado na nutação, que nesse caso específico, é o movimento de oscilação do eixo do cone em torno de sua órbita. Os cones são dispostos de forma concêntrica, invertida e unidos pela parte mais larga. Quando esses são posicionados de forma a haver um cone na horizontal ocorre o fenômeno da nutação. A rotação de saída é a soma entre as rotações de nutações e dos cones de entrada e saída.

2.4. Quadro Morfológico

Quadro morfológico é uma ferramenta que tem como função decompor um problema global em problemas parciais, com o intuito de auxiliar na visualização da estrutura fundamental do problema, buscando de forma sistemática a

apresentação de diversas soluções alternativas. Elas não precisam ser necessariamente viáveis, podem até ser absurdas, pois a função do quadro é mostrar que a solução do problema pode ser encontrada por diferentes caminhos. Em seguida deve-se utilizar outras ferramentas para avaliar essas propostas, a fim de se apontar qual a melhor entre elas. A construção do quadro morfológico consiste em uma tabela, na qual na primeira coluna à esquerda são colocados os parâmetros do sistema a serem analisados. Nas linhas correspondentes a cada um desses parâmetros é colocado o maior número possível de alternativas para o mesmo, e em seguida são traçados os possíveis caminhos passando por uma alternativa em cada linha, fazendo-se um cruzamento para a composição do sistema. Com isso, chega-se a uma solução sistemática, de fácil visualização, ajudando assim na análise do problema global (Delgado Neto, 2008).

Para esse caso particular, após o levantamento dos dados na pesquisa, foram analisados alguns parâmetros relacionados aos aerogeradores, levando-se em conta as configurações mais encontradas no mercado, e então foram encontradas as alternativas mais freqüentes para esses parâmetros. Em seguida foram feitos os cruzamentos, encontrando-se algumas configurações possíveis, mostradas na Fig. (8).
















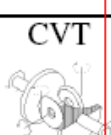
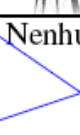
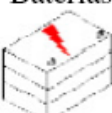

Parâmetros	Soluções				
Identificação do Local	Mapa Eólico 				
Topografia	Campo 	Mar 	Cidade 	Praia 	Montanha 
Tamanho do aerogerador	Grande 	Medio 	Pequeno 		
Tipo de Eixo	Vertical 	Horizontal 			
Número de Pás	2 	3 	Acima de 3 		
Transmissão	Escalonada 	CVT 	Nenhuma 		
Destino	Baterias 	Rede 			

Figura 8. Quadro Morfológico.

Os parâmetros que foram considerados mais relevantes no estudo da CVT aplicada à turbina eólica e avaliados foram:

- Identificação do local de instalação: deve-se consultar um mapa eólico para se conhecer as características dos ventos na região, a fim de se fazer uma escolha adequada do local de instalação do aerogerador.
- Topografia: também é importante, pois a característica do vento muda de acordo com algumas características do local. Além disso, os impactos da instalação de um aerogerador devem ser avaliados de acordo com o que

há no ambiente ao seu redor. Os locais mais comuns da atividade eólica são campos e regiões litorâneas, mas atualmente pode-se encontrar aerogeradores em regiões montanhosas e até em meios urbanos e em alto mar.

- Tamanho do aerogerador: as turbinas eólicas são classificadas em três grandes grupos em relação a esse quesito: grande, médio e pequeno. A escolha por um deles deve ser feita de acordo com as necessidades e limitações físicas.
- Tipo de eixo: há duas configurações de acordo com essa classificação, vertical e horizontal, como já citado ao longo do trabalho.
- Números de pás: a divisão mais coerente quanto a esse parâmetro é a ilustrada no quadro, com duas, três, ou mais de três pás. A configuração com três pás é a mais encontrada.
- Transmissão: pode ser escalonada (convencional), ou o aerogerador pode não possuí-la, tendo um gerador multipolos. A proposta do estudo é de mais uma alternativa para esse parâmetro, a CVT.
- Destino: depende da necessidade e da capacidade de geração de energia do sistema. A energia produzida pode ser armazenada em baterias ou enviada diretamente à rede elétrica.

Com o quadro morfológico pronto, gerou-se três soluções, indicadas pelas linhas coloridas na Fig. (8), sendo elas:

- Solução (1) (linha vermelha): essa é a solução se utiliza da proposta desse estudo, pois nela se aplica a CVT. A escolha nos outros parâmetros foi feita aleatoriamente, sendo eles tamanho médio, eixo horizontal, rotor de três pás, conexão direta com a rede elétrica e localização litorânea, onde o vento pode ser inconstante, ou seja, nesse tipo de local a CVT poderia ser a solução para essa adversidade.
- Solução (2) (linha preta): essa solução é a configuração mais encontrada no mercado para aerogeradores de grande porte, com transmissão escalonada, localizada em área rural, com três pás no rotor e conectada diretamente à rede. Ela foi traçada, pois é necessário que se compare a nova proposta com a configuração mais comum.
- Solução (3) (linha azul): ilustra um modelo em meio urbano, que deve ser compacto e prático, por isso o sistema de transmissão foi retirado e a configuração de eixo vertical foi escolhida. Foi uma das soluções propostas devido a sua simplicidade.

2.5. Simulação Virtual e Considerações Finais

A simulação em ambiente computacional seria a fase seguinte à construção do quadro morfológico, na qual se tem por fim analisar as propostas sugeridas no quadro e definir qual seria a mais vantajosa. Essa etapa é de suma importância em projetos de engenharia modernos. Atualmente, sempre que possível os fabricantes fazem uso dessa ferramenta, devido às várias vantagens que ela pode propiciar, não só às próprias indústrias, mas também aos consumidores.

Albuquerque (2003) em seu trabalho cita algumas das vantagens que o uso dessa ferramenta pode proporcionar. Segundo ele, desde os anos de 1960 os fabricantes já sabiam da facilidade que o ambiente computacional podia propiciar, e atualmente com máquinas muito mais apropriadas para que as simulações possam ser feitas, essa ferramenta é uma das principais etapas de um projeto de engenharia. Com ela pode-se fazer inúmeras simulações, analisá-las, modificá-las quando desejado, sem a necessidade de se montar um protótipo ou uma bancada de teste e realizar todo o procedimento inúmeras vezes. Com isso os fabricantes ganham tempo, além de terem gastos menores no desenvolvimento do produto, podendo repassar esse ganho aos consumidores. Como vantagem das simulações virtuais pode-se citar ainda o fato de que como os testes são menos frequentes, menor quantidade de lixo é produzida, contribuindo para as questões ambientais, tão discutidas atualmente, com isso as indústrias ainda conseguem ter uma melhor imagem. Os *crash tests* automotivos são um bom exemplo de como a simulação virtual gera economia e menor produção de lixo. Em um teste como esses, a cada batida um carro é perdido, além dos bonecos, que também possuem um custo elevado. Com uma simulação em ambiente computacional o número de testes é reduzido, e conseqüentemente menos carros danificados e menos bonecos levados ao lixo.

Apesar de muitas vantagens da simulação virtual ela também possui algumas desvantagens, pois nem sempre há softwares que atendem às necessidades dos fabricantes, como por exemplo, na área de Mecânica dos Fluidos e de Combustão, nas quais os softwares são difíceis de serem obtidos e os que existem possuem soluções complicadas e demoradas.

No caso específico desse estudo, a simulação em ambiente virtual teria a função de distinguir entre as soluções proposta no quadro a mais viável fisicamente, além fornecer um melhor parecer dos parâmetros de eficiência da transmissão e como eles reagem às mudanças que podem ocorrer durante o funcionamento do sistema. No caso da solução (1), a simulação deveria ser feita utilizando-se dos tipos de CVTs estudados, com o intuito de fazer uma seleção do modelo mais adequado entre esses modelos.

Neste trabalho foram levantados dados técnicos sobre os parâmetros pertinentes a um gerador de energia eólica e aos modelos de transmissão continuamente variáveis, analisando as configurações já existentes e propondo uma nova, que pode ser considerada inovadora, em vista de ainda não ser utilizada. A parte do estudo já realizada seria o início da parte técnica da pesquisa. Para complementar esse trabalho, é necessário entrar com outra ferramenta, mais criativa, que seria a de usar os dados técnicos coletados e realizar uma simulação em ambiente computacional. Essa seria a etapa seguinte à construção do quadro morfológico, com o objetivo de encaminhar o problema para uma solução, que posteriormente deve ter um protótipo construído, para confirmar os resultados obtidos em realidade virtual.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq e Unicamp pelo apoio e incentivo na realização desse trabalho.

4. REFERÊNCIAS

- Albuquerque, A. A., 2003, "Caracterização da Resposta Dinâmica de uma CVT por Polias Expansivas", Tese (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas (SP).
- Antunes, M., 2002, "Tecnologia Eólica para Produção de Energia Elétrica", Universidade do Minho (Portugal).
- Delgado Neto, G. G., 2008, "Kit de Motorização para Cadeiras de Rodas Manuais", V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- Dutra, R. M., 2008, "Energia Eólica, Princípios e Tecnologias", CRESESB.
- Júnior, L. F., 2009, Seminário "Leilão Eólica", ABEEólica (Recife-PE).
- Narita, k. and Priest M., 2006, "Metal-metal friction characteristics and the transmission efficiency of a metal V-belt-type continuously variable transmission", Journal of Engineering Tribology, Vol. 221, No. 1, pp. 11-26.
- Nemoto, K., Kumagai, T and Ohnuma, Y., 2002, "Development of a new manual transmission", JSAE Review, Vol. 23, No. 4, pp. 513-518.
- Raizer, B., 2008, "Modelagem e Análise Cinemática de uma Transmissão Toroidal: Influência dos parâmetros de projeto no desempenho", Trabalho de Graduação, Universidade Estadual de Campinas (SP).
- Reis, M.M., Oliveira Jr, D. S. e Carvalho P. C. M., 2007, "Estudo da Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos", Universidade Federal do Ceará (CE).
- Sachetto, T. J. S., 2008, "Estudo dos Parâmetros Influentes na Vida de uma Transmissão Continuamente Variável do Tipo Esfera-Cone submetida a Contato com "Slip/Spin"", Tese (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas (SP).
- Silva, G. R., 2003, "Características de Vento da Região Nordeste. Análise, Modelagem e Aplicações para Projetos de Centrais Eólicas", Tese (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco (PE).
- Tanz, L., 2006-2009, "Gerador Eólico de Médio Porte com Transmissão Continuamente Variável (CVT)" - Dynamis Indústria e Comércio Ltda. – ME.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SIMULATION OF THE APPLICATION OF CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION CVTs IN WIND GENERATORS

Lucas Inácio Rodrigues Damasceno, luckaoeu@gmail.com¹
Geraldo Gonçalves Delgado Neto, geraneto@fem.unicamp.br¹
Vivianne Vieira Delgado, vivianne@fem.unicamp.br¹
Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva, ludmila@fem.unicamp.br¹
Franco Giuseppe Dedini, dedini@fem.unicamp.br¹

¹Unicamp- Faculdade de Engenharia Mecânica, Rua Mendeleiev, s/n - Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo - Campinas – SP- Caixa Postal 6122 CEP: 13.083-970

Resumo: *The purpose of this work is to present the viability of the construction of a virtual simulation using CVT (Continuously Variable Transmission) in wind generators, through databasing and analysis of the main parameters of a wind energy system. The CVTs are characterized by the using of materials with high friction coefficient as they make contact and high hardness, usually a metal or a special kind of steel, working on a viscous environment (special lubrication) with small slipping, acquiring great capability of energy transmission. The basic principle is the same for any type of CVT, the changing in the geometry of its contact points. However, another class of CVTs has been developed and studied, distinguished by utilizing relative movements and complex geometries in transforming the input movement, usually a continuous rotation, in changeable and well determined oscillatory movements. Besides the large amount of available highly-effective proven CVT models, they are not well received by part of companies for non-conventional uses of this technology. This way, the simulation in computational sphere, in virtual reality, would allow the correct comprehension and visualization for those complex transmissions.*

Palavras-chave: CVT, wind energy, wind generator