

POTENCIAIS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DE ENERGIA EÓLICA: UMA REVISÃO LITERÁRIA

Francimário Bruno da Silva¹, Prof. Me. Anderson Carlos de Oliveira²

Resumo: O rápido avanço das tecnologias tem contribuído cada vez mais para que as organizações possam melhorar seus processos produtivos, principalmente em termos de produtividade. Nas últimas décadas, assuntos relacionados às questões ambientais passaram a ter uma maior amplitude na maioria dos países, o que levou a muitas empresas praticarem ações mais efetivas quanto à sustentabilidade do planeta. A Indústria 4.0 é um conceito que surgiu na última década e que une o avanço das tecnologias com o desenvolvimento sustentável das organizações. Tem sido notável a expansão do uso de energias renováveis, o que também pode ser evidenciado com um grande aumento de instalações de parques eólicos, principalmente no Brasil. Esta pesquisa tem como objetivo identificar e discutir potenciais das tecnologias da Indústria 4.0 no setor de energia eólica. Por meio da revisão da literatura sobre o assunto, evidenciou-se que existe um grande potencial para se aplicar os principais conceitos da Indústria 4.0 para operação e monitoramento das torres eólicas devido às suas características de possuírem uma grande altura e também pelo fato destas geralmente serem instaladas em locais isolados.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Energias Renováveis. Energia Eólica.

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, ou manufatura avançada, vem recebendo relativa ênfase tornando-se pauta recorrente no que se refere ao futuro da indústria brasileira. É atualmente o que impulsiona uma série de avanços no processo produtivo, trazendo um aspecto mais coeso e descentralizado em relação ao uso da tecnologia. A aplicação da Indústria 4.0 está voltada principalmente a otimização do uso dos recursos que está atrelado a um conceito sustentável. Sendo assim, evidencia-se que um conjunto de características da Quarta Revolução Industrial onde torna-se fundamental para a sobrevivência das empresas, como: a busca por aperfeiçoamento dos processos, tomada de decisões mais assertivas, redução de custos e redução de energia desperdiçada, tais apontamentos buscam o aumento da eficiência e produtividade na cadeia de produção, (CINTRA et.al. 2019; LIMA e SANTOS, 2018).

Na Indústria 4.0, em meio ao processo de fabricação e produção, as linhas de montagem e produto interagem de forma conjunta e harmônica, além do mais, os núcleos das empresas localizadas em diferentes regiões trocam informação de forma instantânea, essa é uma das inúmeras características que definem o avanço industrial que se caracteriza pela capacidade de adaptação com novas tecnologias, a eficiência dos recursos e o papel significativo no que diz respeito à sustentabilidade.

Sustentabilidade ou desenvolvimento sustentável são assuntos que vêm sendo discutidos desde a década de 70, mesmo que de forma tácita. Pode-se conceituar o termo sustentabilidade como sendo aquele que se concretiza na busca de ferramentas e desenvolvimento das chamadas “energias limpas”. Dito isso, surgem em questão, as fontes de energia que são consideradas renováveis, aquelas que não afetam o meio

ambiente, não usam combustíveis, aquelas que usam recursos naturais e que são naturalmente reabastecidos, daí vindo o termo energias renováveis, (SANCHES et.al. 2018; SANTOS et.al 2019).

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. O consumo de energia elétrica no Brasil cresceu 4,02% no primeiro trimestre de 2021 em relação ao mesmo período do ano passado, chegando aos 69.119 MW médios. A alta foi puxada sobretudo pela expansão de 11,78% no Ambiente de Comercialização Livre – ACL. No mercado regulado também houve aumento, mas menos expressivo, de 0,61%. Do lado da geração, o crescimento foi de 3,99%, com destaque para a energia eólica, que registrou alta de 71,5% no período. Em seguida, estão as fontes termelétrica, com produção 28,19% maior, e a solar, que apresentou aumento de 13,09% em relação a 2020. Apenas as hidrelétricas tiveram recuo, de 4,94%.

Com a implementação da Indústria 4.0, a alta tecnologia também pode mitigar significativamente os impactos ao meio ambiente, pois torna-se evidente o uso responsável dos recursos para a produção de bens e serviços. No entanto, mesmo sendo analisado em algumas pesquisas que a Indústria 4.0 e as energias renováveis estão consonantes em uma mesma corrente de desenvolvimento sustentável, devido a ser um tema relativamente recente, observa-se que quando se trata mais especificamente da energia eólica, ainda existe uma escassez de estudos sobre o tema (DUTRA; MARQUES, 2014).

Sendo assim, esta pesquisa tem como objetivo identificar e discutir potenciais das tecnologias da Indústria 4.0 no setor de energia energia eólica.

2. METODOLOGIA

Este artigo trata-se de uma pesquisa exploratória de cunho bibliográfico, com uma revisão de literatura de natureza qualitativa, baseada em livros, artigos e revistas publicados em bases de pesquisas, Google Acadêmico e *Scielo*, assim como informações e dados divulgados nos sites da ABEEólica e ANEEL. Como critério de pesquisa, foram buscados artigos no período dos últimos 10 anos por meio das palavras chaves de forma combinada ou isolada: indústria 4.0, energias renováveis, energia eólica, tecnologias, e assim foram selecionados os artigos nos quais os assuntos mais se adequavam ao objetivo desta pesquisa.

De acordo com Sellitz *et al.* (1965), a categoria de pesquisa exploratória diz que todos aqueles que procuram descobrir ideias e intuições, conseqüentemente têm mais compreensão do fenômeno que está sendo estudado. Nem sempre, hipóteses precisam ser formuladas nesses estudos e eles tornam possível aumentar o conhecimento dos pesquisadores sobre os fatos e permitir o desenvolvimento de novas hipóteses e pesquisas mais estruturadas. Neste caso, o plano de pesquisa precisa ser flexível o suficiente para analisar todos os aspectos relacionados ao fenômeno. Malhotra (2001) ainda complementa que seu objetivo é fornecer padrões e compreensão. Tendo as seguintes características: informação definida aleatoriamente e um processo de pesquisa flexível e não estruturado. A amostra é pequena e não representativa e a análise dos dados é qualitativa. Essas descobertas são experimentais e os resultados geralmente são seguidos por outras pesquisas exploratórias ou conclusivas.

De acordo com Gil (2002), por pesquisa bibliográfica entende-se a leitura, a análise e a interpretação de materiais, como livros, periódicos, teses, artigos, entre outros.

Para o pesquisador que opta pela pesquisa bibliográfica, os materiais de referência são aqueles que têm por objetivo possibilitar a rápida obtenção das informações requeridas, ou, então, a localização das obras que as contêm.

Esta pesquisa foi estruturada com as seguintes etapas: definição do tema, busca das publicações nas plataformas definidas, análise das informações relevantes para o estudo e apresentação dos resultados obtidos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Para uma melhor contextualização do assunto, nesta seção serão abordados tópicos relacionados ao tema da pesquisa, que são: Indústria 4.0, energias renováveis e energia eólica.

3.1. Indústria 4.0

Com o desenvolvimento das relações trabalho-gestão no ambiente de mercado, promoveram-se transformações relacionadas ao aumento do desenvolvimento tecnológico, contribuindo para inúmeras mudanças na era industrial.

A Hannover Messe, uma das maiores feiras de negócios do mundo, usou o termo "Indústria 4.0" pela primeira vez. Em 2012, o grupo de trabalho Indústria 4.0 presidido por Siegfried Dais e Henning Kagermann apresentou uma série de recomendações para a implementação da Indústria 4.0 pelo governo federal alemão. Em 2013, o relatório final deste grupo foi mais uma vez exposto na Hannover Messe, que realizou uma verdadeira revolução colaborativa no processo produtivo e criou uma revolucionária cadeia de valor agregado.

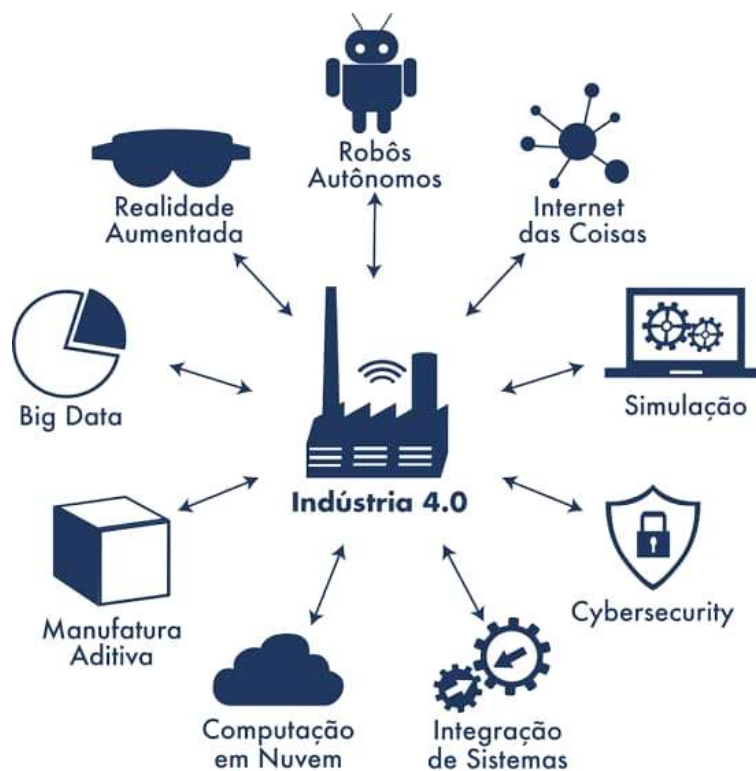
A Indústria 4.0 é um conceito de indústria proposto que engloba as principais inovações tecnológicas dos campos de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura. De acordo com o relatório apresentado pelo Boston Consulting Group (BCG) são nove as tecnologias aplicadas à Indústria 4.0:

- Robôs Inteligentes: capazes de interagir com outras máquinas e com os seres humanos, atuando de maneira mais flexível e colaborativa;
- Manufatura Aditiva e Híbrida: permitindo a produção através de impressoras 3D;
- Simulação Virtual: esta etapa permite que os processos e produtos sejam testados e ensaiados durante a fase de concepção, reduzindo custos com falhas e o tempo de projeto;
- Integração Horizontal e Vertical dos Sistemas: sistemas Enterprise Resource Planning (ERP), Manufacturing Execution System (MES), Sistema, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados (SAP) que integram toda a cadeia de valor produtiva, por meio da análise e tomada de decisão de dados;
- Internet of Things – IoT (Internet das Coisas): permite conectividade entre os diversos dispositivos flexibilizando o acesso e controle em todo o processo produtivo;
- Big Data e Analytics: sistemas inteligentes que identificam falhas nos processos, melhorando a qualidade da produção em tempo real, economizando energia e melhorando a eficiência na utilização de todos os recursos

produtivos;

- Cloud Computing (computação em nuvem): acesso ao banco de dados e suporte de qualquer local do planeta, permitindo a integração de sistemas e plantas em locais distintos, mesmo que distantes fisicamente, da mesma forma o controle e o suporte podem ser efetuados de maneira global;
- Segurança Cibernética: sistemas de comunicação cada vez mais seguros e evoluídos garantindo o “accountability” do processo de produção (“fazer certo a primeira vez, todas as vezes”);
- Realidade Aumentada: suporte que permite que o usuário atue dentro dos sistemas ciber-físicos (CPS) com uma visão e tutoria assertiva indicando passo a passo todas as instruções e comandos necessários para um reparo, ou uma nova parametrização do processo.

Figura 1: Tecnologias da Indústria 4.0



(Dias, 2021)

3.2. Energias renováveis

A primeira crise energética mundial foi provocada pelas ações políticas e econômicas do membro árabe OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) em 1973, quando aumentaram o preço do barril de petróleo em quase cinco vezes, levando ao colapso industrial.

Esse fato fez com que alguns países considerassem sua dependência do petróleo e começassem a buscar alternativas. Ainda no último século, para muitos países, os

recursos naturais ainda eram considerados como inesgotáveis. Somente nas últimas décadas é que se iniciou uma tendência de crescente atenção das pessoas para o futuro dos recursos naturais e a produção de fontes de energia limpas e renováveis.

Energias renováveis ou energias limpas, fundamenta-se na utilização direta na geração de fontes de energia naturais, como sendo a solar, hidroelétrica, eólica e biomassa. Essas energias são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda energia disponível na terra e, por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta, e as configuram como um conjunto de fontes de energia que podem ser chamadas de não-convencionais, ou seja, aquelas não baseadas nos combustíveis fósseis e grandes hidroelétricas.

Tem-se procurado mais apropriadamente usar as denominações “energias renováveis e novas energias”, para determinar a definição naquelas com ciclos de renovação natural, que se originam da energia solar como fonte primária tendo dentro dessa categoria a energia eólica, de biomassa e a solar, elas são formas de energia que se regeneram de uma forma cíclica em uma escala de tempo reduzida.

Relacionado a esse fato, as discussões sobre o futuro e como somos responsáveis por esta situação, tem melhorado a vida no planeta. Diversos acordos e tratados foram firmados entre países, com o objetivo de reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa e do aquecimento global, e estimular o uso e a produção de energia limpa e renovável. Nesse sentido, os governos emitem e promulgam leis no setor energético, cada vez mais restritivas quanto a critérios ambientais, o que permite pensar num papel preponderante das energias renováveis como a esperada solução que há de conduzir, no século XXI, ao que muitos têm denominado como "desenvolvimento sustentável".

Países como o Brasil vem buscando aprimorar seu desenvolvimento em energias renováveis, já que algumas regiões do país são ricas no fornecimento desse tipo de energia, como o Nordeste, que pode ser considerada uma fonte promissora na geração de energia eólica e solar, e nos últimos anos, com uma grande expansão de instalação de parques eólicos na região.

A ABEEólica indica que o investimento em fontes de energia limpa e renovável será visto como uma vantagem para a retomada econômica. Afinal, estas fontes contribuem para o combate ao aquecimento global por não emitir gases do efeito estufa e apresentar benefícios econômicos e ambientais. O presidente desta associação, Elbia Gannoum, cita como uma das suas principais vantagens comparativas em relação a uma grande maioria dos países o fato do Brasil ser uma potência energética com uma grande diversidade de energias limpas. E, no caso das eólicas, tem ainda o fato de que o Brasil possui um dos melhores ventos do mundo, o que significa energia muito competitiva (ABEEÓLICA, 2021).

3.3. Energia eólica

De acordo com Martins et al. (2008), no final do século XIX é que surgiram as primeiras tentativas de geração de eletricidade através do “vento”, porém, apenas na década de 1970 é que houve um maior interesse nesta forma de energia, devido à crise internacional do petróleo.

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca, e existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. (MARTINS et al., 2008). Nesse período, vários países, inclusive o Brasil, se

interessaram pelo desenvolvimento de energias alternativas, com foco em dois objetivos principais: reduzir a dependência do petróleo e aumentar a autonomia para atender às necessidades internas de energia, o que era de extrema importância estratégica na época. A energia eólica é considerada hoje uma das mais prósperas fontes naturais, devido ao fato de ser renovável, ou seja, não se esgota.

Segundo a ANEEL, a Energia Eólica (EE) é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, ou seja, no vento. É possível se aproveitar esta energia de forma que haja uma conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o auxílio de turbinas eólicas (aerogeradores) para a geração de eletricidade (ANEEL, 2008).

A EE pode ser utilizada para gerar eletricidade por indução eletromagnética e para operações mecânicas como bombeamento de águas e moagem de cereais. O processo de aproveitamento desta depende da turbina eólica (figura 2). Essa turbina é um dispositivo que entra em contato com o vento, gira e gera outras formas de energia. O sistema de configuração básica de EE, além da turbina, depende de uma unidade de controle de potência e, em alguns casos, de acordo com a aplicação, de uma unidade de armazenamento.

Figura 2: Funcionamento de uma turbina eólica



(VivadecoraPro, 2019)

De acordo com informações da ABEEólica (2019), pode-se citar alguns componentes da torre eólica:

- Torre: Estrutura responsável por fornecer sustentação e posicionamento do rotor e nacele. As torres podem ser cônicas (de aço ou concreto) ou treliçadas (aço galvanizado);
- Rotor: Popularmente conhecido como “nariz” do aerogerador, compreende as

pás e o cubo (hub), onde, as mesmas são fixadas. O eixo do aerogerador pode ser horizontal ou vertical. Possuem de 60 a 150 metros de diâmetro. Dessa maneira, quanto maior o rotor, maior a capacidade de produção de energia do aerogerador;

- Pás: As pás são perfis aerodinâmicos geralmente feitas com um material leve e resistente (resina epóxi ou poliéster reforçado com fibra de vidro e/ou carbono);
- Nacele: Componente que fica no topo da torre do aerogerador. Em seu interior, estão abrigados a caixa de multiplicação, o gerador, o transformador, entre outros. Este item exige uma logística especial de transporte e montagem, pois pode pesar mais de 100 toneladas. Caixa de multiplicação (transmissão): Em inglês, denominada gear box e também conhecida como caixa de engrenagens, é responsável por aumentar a rotação proveniente do rotor. Esta parte pode pesar mais de 30 toneladas. Gerador: Instalado no interior da nacele, converte a energia mecânica de rotação das pás em energia elétrica. Pode ser do tipo síncrono (velocidade de rotação igual a frequência de alimentação) ou assíncrono (velocidade de rotação diferente da frequência de alimentação);
- Anemômetro: Instrumento meteorológico localizado na parte superior e externa da nacele, com a função de medir a velocidade instantânea do vento local. Ele é feito de plástico com fibra de carbono reforçado e possui três copos;
- Biruta (sensor de direção): Também conhecida como *windvane*, é um item meteorológico posicionado do lado do anemômetro, cuja finalidade é medir a direção instantânea do vento incidente. Dessa maneira, é acionado um motor, chamado de *yaw* que gira a nacele para rastrear a direção predominante do vento, e assim, otimizar a produção energética da máquina;
- Cubículo (*switchgears*): Instalado próximo ao nível do solo e isolado a ar ou a hexafluoreto de enxofre (SF6), possui função de proteção e manobra. Os cubículos recebem os cabos subterrâneos de entrada do aerogerador e interligam com o gerador e o transformador (se existente) na nacele.

Segundo a ANEEL (2008), a geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas constitui uma alternativa para diversos níveis de demanda. Com tamanha aplicação, esta forma de produzir energia elétrica, contribui para:

- Redução da emissão de poluentes atmosféricos pelas usinas térmicas;
- Diminuição da necessidade da construção de grandes reservatórios;
- Redução do risco gerado pela sazonalidade hidrológica, ou seja, da alternância de períodos chuvosos e secos.

Porém também existem impactos negativos desta prática, os quais são:

- Visuais, causados pelo excesso de equipamentos, os quais modificam a paisagem, embora às vezes embeleza o local;

- Sonoros, causados pelo ruído das turbinas e;
- Perturbações eletromagnéticas, as quais podem atrapalhar os sistemas de comunicação.

Segundo Rodrigues (2011), o sistema eólico pode ser utilizado em quatro aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos, sistemas interligados à rede e sistemas *off-shore*.

Os sistemas isolados para geração de energia eólica são caracterizados por não se conectarem à rede elétrica. O sistema abastece diretamente os aparelhos que utilizarão a energia e são geralmente construídos com um propósito local e específico. São sistemas autônomos de pequeno porte, com potência instalada com média de até 80 KW, normalmente, destinados à eletrificação rural, os sistemas isolados utilizam armazenamento de energia que podem ser feitos através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos.

De modo geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte destinado a atender um número maior de usuários, por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular em cada caso.

Os sistemas eólicos interligados à rede apresentam as vantagens inerentes aos sistemas de geração distribuída tais como: a redução de perdas, o custo evitado de expansão de rede e a geração na hora de ponta quando o regime dos ventos coincide com o pico da curva de carga. Todos os arranjos são conectados a inversores e logo em seguida, guiados diretamente na rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

Os sistemas *off-shore*, que são a energia eólica no mar, representam as novas fronteiras e aumento da tecnologia da utilização da energia eólica. A instalação desse tipo de sistema tem crescido a cada ano, principalmente devido ao esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra (RODRIGUES, 2011). A indústria eólica tem investido no desenvolvimento tecnológico da adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar, devido a não ter limitações em termos de utilização do solo e dos diversos impactos visuais. A figura 3 mostra um exemplo de aplicação de parque eólico em terra e outra no mar.

Figura 3: Parques eólicos no mar e na terra



(Grilo, 2019)

A Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) e a câmara de comercialização de energia elétrica (CCEE) têm expectativas positivas para a atuação e o crescimento no setor eólico, que teve como ponto importante a capacidade de instalação, atingindo a marca de 18 GW Em fevereiro de 2021. Tal crescimento é resultado do aumento da infraestrutura produtiva, o qual conta com 695 parques eólicos e mais de 8,3 mil aerogeradores nesse período. É importante destacar que esses números refletem as usinas que se encontram em pleno desempenho e aquelas que operam em testes autorizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O progresso do setor eólico se dá também devido a fiscalização da ANEEL. Em janeiro de 2021, o setor inspecionou diversas localidades de produção e aprovou a geração de 159,67 MW em energia no país. A grande parcela, 135,99 MW ou 85% do total, estava em investimentos eólicos, já a menor parte vem de pequenas centrais hidrelétricas 11% e de termelétricas 4%. Vale salientar que as novas unidades autorizadas se encontram em seis estados, sendo quatro no Nordeste. Os leilões da ANEEL que firmam contratos, evidenciam para um contínuo desenvolvimento e de crescimento no setor eólico. A ABEEólica acredita que a capacidade instalada possa alcançar 28 GW até 2024.

3.3.1 Torre eólica

A torre é um componente de sustentação da nacela (estrutura que acomoda a turbina), e sua altura é determinada de acordo com o ambiente de instalação para obter o melhor efeito de uso. Essas torres podem ser feitas em vários tipos de materiais e podem ser exibidas de diferentes maneiras. As mais comuns dessas estruturas são estruturas de aço, mas também podem ser feitas de concreto armado ou materiais mistos (estruturas de concreto e aço). Quanto às partes estruturais, parecem ser tubulares, em forma de treliça e onduladas.

Bekaert, (2020) diz que o tamanho da torre depende do desenho do parque, mas é inevitável que a altura da torre aumentou nas últimas duas décadas. É nesta situação que as torres de concreto são mais competitivas do que as torres de aço.

Com o tempo, esses instrumentos ficam maiores para capturar mais vento. Hoje, sua altura média varia de 110 metros a 130 metros. Como os equipamentos de captação de energia eólica só vão aumentar, esse porte é necessário - em um futuro próximo, a altura da torre chegará a 140 metros.

Com o desenvolvimento da tecnologia, a altura e o tamanho das turbinas eólicas vêm aumentando. O benefício da grande altitude do gerador está relacionado ao aumento da velocidade média do vento, pois o vento não estará tão próximo à superfície. O cisalhamento do vento está relacionado a este efeito, que é um fenômeno meteorológico que descreve mudanças rápidas na direção e / ou velocidade do vento ao longo de um período de tempo.

A definição do local de instalação de uma torre eólica depende de uma série de estudos realizados por profissionais. Uma vez que as torres podem ter um impacto sobre outras torres, cabe a eles decidir se fazem isso: elas devem ser colocadas de forma que não “roubem” o vento de uma torre para outra. Contudo, deve-se considerar a área do terreno destinada ao parque eólico para estabelecer a distância ideal entre as torres. O espaçamento entre turbinas é equivalente a 3 a 10 vezes o diâmetro do rotor, devendo ser maior que 3 ou 4 vezes o diâmetro do rotor perpendicular na direção do vento preponderante e 8 a 10 diâmetros na direção paralelo a direção do vento (Letcher, 2017). Segundo Pinto (2013), é recomendado a distância de 3 a 5 vezes o diâmetro do rotor lateralmente e 5 a 7 vezes o diâmetro do rotor verticalmente. Não é à toa que um determinado projeto é idealizado apenas para a distribuição de turbinas eólicas.

Assim sendo, pode-se ver que as torres eólicas, necessitam de um espaço comunal, tanto em sua altura como em seu espaço como um todo, dificultando sua manutenção tornando o acesso aos aerogeradores complicado, assim abrindo portas para que se use a tecnologia a fim de facilitar tal acesso aos equipamentos e informações.

4. INDÚSTRIA 4.0 E ENERGIA EÓLICA

Segundo Müller (2018), as práticas de sustentabilidade são cada vez mais almeçadas pelas organizações. Sendo assim, empresas têm se dedicado a tornar seus processos e produtos mais atrativos no que se diz respeito a questão econômica, a social e a ambiental, ainda que seja para se manter de forma ativa no mercado.

A interação entre os conceitos e tecnologias relativos à Indústria 4.0 com a sustentabilidade pode gerar resultados promissores para diversos tipos de empresas. A se julgar por um ambiente manufatureiro, os conceitos que transpassam a Indústria 4.0 poderiam se empregar para desenvolver processos de fabricação mais sustentáveis, e até mesmo contribuir para a realização e fortalecimento da economia circular. Tecnologias como IoT, como a mineração de dados e aprendizado de máquinas em *big data*, *cloud computing*, tendem a serem utilizadas para o design do produto, supervisão das atividades do produto e/ou serviço, manutenção e otimização de uso e dos recursos, reuso, remanufatura e reciclagem (JENSEN; REMMEN, 2016; BRESSANELLI, 2018).

Analisando as características das torres e parques eólicos, pode-se destacar três tecnologias da Indústria 4.0 que poderiam ser bem aplicadas para estes equipamentos, as quais serão descritas a seguir.

A *cloud computing*, ou computação em nuvem, compartilha recursos computacionais entre vários clientes de forma dinâmica, conforme a necessidade, sendo que esses recursos podem residir em qualquer lugar e serem acessados via internet (NIST, 2011). A rapidez deverá ser um dos fatores mais importantes para uma empresa adotar a nuvem do que propriamente o custo (GARTNER, 2014). Quanto à mobilidade, permite ao cliente acessar o ambiente de qualquer lugar e a qualquer hora via internet (ROBU, 2012).

O big data é mais do que simplesmente uma questão de quantidade de dados, é uma oportunidade para encontrar informações sobre novos e emergentes tipos de dados e conteúdo, para tornar as empresas mais ágeis e para responder questões que outrora estavam fora do alcance das organizações. (DOBRE; XHAFA, 2014). Hoje o grande desafio é justamente criar mecanismos que permitam um processamento e uma análise de grande quantidade de dados (WOLFERT *et al.*, 2017). O big data permite a melhoria da eficiência e eficácia das organizações, e permite o processo de tomada de decisão com base em evidências e não intuição (MCAFEE; BRYNJOLFSSON, 2012).

A IoT, ou Internet das Coisas, é um conceito tecnológico, originário em conceitos de informação e tecnologia. Domingos *et al.* (2013) e Ferreira *et al.* (2012) explicam que a IoT pode ser entendida como uma vantagem competitiva uma vez que as informações de contexto podem ser utilizadas para permitir e otimizar a adaptação em tempo real às alterações do ambiente.

Como alguns outros tipos de equipamentos, as torres eólicas requerem monitoramento constante, ajustes frequentes e manutenção contínua. Devido a serem equipamentos de grande porte, baseados em tecnologias mais recentes e sensíveis, seus requisitos de manutenção são tão necessários quanto os das fábricas tradicionais. No entanto, para quem trabalha em equipamentos instalados no chão de fábrica, encontrar e corrigir problemas e realizar a manutenção das máquinas no local são tarefas mais rápidas, ao contrário das torres eólicas, que além da altura, podem estar em locais distantes ou de difícil acesso, como em instalações longe das cidades ou até mesmo no mar (*offshore*).

De acordo com Reis (2020), as principais causas de problemas no gerador são:

- O não cumprimento das práticas de manutenção recomendadas nos procedimentos de lubrificação, sistemas de coletores;
- Falhas mecânica ou elétricas do rolamento, falhas no rotor, falhas no sistema de refrigeração levando a excesso de calor e por sua vez a incêndio;
- Os relâmpagos, vento, condições climáticas extremas, contaminação do lubrificante;
- O desalinhamento ou outra instalação inadequada, vibração excessiva, irregularidades de tensão, insuficiência no conversor, aterramento inadequado, excesso de velocidade (que leva a problemas nos rolamentos).
- Problemas de fabricação, tais como, componentes soltos, isolamento elétrico inadequado, falhas no rotor.

O mesmo autor ainda cita que, para os geradores com menos de 1000 KW, a falha mais comum é um problema no setor do rotor. Para os geradores com mais de 1000 KW, a falha mais comum é associada aos rolamentos. A manutenção é o fator crítico que afeta a vida das máquinas. Reparações adequadas também são essenciais para a confiabilidade e longevidade do gerador.

Uma boa alternativa para o monitoramento das torres, seria incorporar sensores nos

equipamentos para integração com a Internet das Coisas, pois dessa forma poderia ser monitorado o desempenho de modo a prevenir possíveis falhas, como também o acesso remoto quando necessário alguma possível intervenção. Um exemplo de aplicação seria o monitoramento da vida útil dos rolamentos, que, segundo Reis (2020), são um grande obstáculo na evolução do sistema eólico devido aos seus desgastes contínuos. O autor ainda diz que a principal falha com os rolamentos são as descamações (macropitting) visíveis a olho nu que por sua vez geram escamações microscópicas (micropitting) que danificam o desempenho da turbina eólica. Os sensores poderiam ser também não tripulados conectados internet e microcontroladores digitais – que são dispositivos IoT que eliminam os perigos e desafios das conexões de cabo tradicionais, o que tornaria mais fácil e barato medir e monitorar os dados gerados pelos equipamentos das turbinas eólicas. Esses mesmos recursos também podem ser usados para monitorar, analisar, transmitir e otimizar o desempenho de turbinas eólicas.

Em relação ao parque eólico como um todo, independentemente do seu tamanho, poderia ser aplicado o *big data*, que ajudaria no controle dos dados de desempenho em geral, como também às informações relacionadas a manutenção (como vibração, temperatura e desgaste), gerando um banco de dados que é coletado e transmitido a um dispositivo (*gateway*) remoto. Dessa forma, tanto os gestores como os técnicos de serviço podem utilizá-los para ajustar as configurações e otimizar de forma remota, podendo coletar e encaminhar essas informações de para análises de alto desempenho, e também para tarefas rotineira como, planos de inspeção, detecção de falhas e monitoramento do desempenho e vida útil das turbinas. Devido a característica técnica dos equipamentos essas medições geram um grande volume de dados, o que reforça a importância da utilização do *big data*, como também do armazenamento na “nuvem”, visto a facilidade para o acesso a estas informações. Como resultado, as decisões do operador que afetam a integração da rede, como controle de tensão, comutação de carga e configuração de rede, podem ser compartilhadas entre indivíduos em diferentes locais, independentemente de sua localização física, onde algumas dessas decisões podem até ser automatizadas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a aplicação de conceitos da Indústria 4.0 no setor de energia eólica baseado em conceitos teóricos. O artigo evidencia sobre a importância das energias renováveis para a sustentabilidade junto com os avanços tecnológicos, assim como as organizações podem aplicar estes conceitos em prol de uma melhor produtividade em seus processos operacionais.

Um ponto a se destacar é sobre o crescimento na geração de energias renováveis no Brasil, principalmente a energia eólica, que vem se expandindo principalmente na região Nordeste do país devido às suas características climáticas.

Devido às características das torres eólicas que chegam a atingir aproximadamente 150 metros de altura e os parques eólicos geralmente estarem instalados em locais distantes, torna-se importante o emprego da tecnologia buscando uma melhor produtividade. Desse modo, as tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 que promovem e facilitam o monitoramento e acesso remoto, tais como IoT, *big data* e *cloud computing*, podem ser aplicadas para o monitoramento dos equipamentos utilizados, principalmente as turbinas.

Com base nas pesquisas realizadas a indicadores que evidência relativa escassez

no que se refere a um arcabouço teórico amplo no que diz respeito a Indústria 4.0 e suas aplicações no segmento de energia eólica devido a ser um tema que só passou a ser estudado a partir da última década, sendo assim necessário mais pesquisas acerca deste assunto.

Para trabalhos futuros sugere-se uma pesquisa de cunho prático, com a realização de uma visita in loco em um parque eólico a fim de identificar novas abordagens para o assunto, assim como para a aplicação prática dos conceitos da Indústria 4.0 para um estudo de caso.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica. Energia eólica começa 2021 em alta no Brasil. **Redação CicloVivo**, 11 de março de 2021. Disponível em: < <https://ciclovivo.com.br/planeta/energia/energia-eolica-comeca-2021-em-alta-no-brasil/>> Acessado em: 16/05/2021.

_____. Componentes do Aerogerador. *Atlantic: Engenharia renováveis S.A*, 20 de março de 2019. Disponível em: <<http://atlanticenergias.com.br/conheca-as-partes-do-aerogerador/>> Acessado em: 03/06/2021.

ANEELatlas de Energia Elétrica do Brasil. 2. ed. Brasília, DF: **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2008.

BEKAERT, Belgo.Como são construídas as torres de energia eólica. **GEOTECH**. mai 2020. Disponível em: <<https://blog.belgobekaert.com.br/geotech/energia-eolica/#:~:text=Hoje%2C%20elas%20t%C3%AAm%20uma%20m%C3%A9dia,metros%20em%20um%20futuro%20pr%C3%B3ximo.>>> Acessado em: 20/05/2021

BRESSANELLI, G., ADRODEGARI, F., PERONA, M., SACCANI, N. **Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies**. Sustainability, Switzerland, v. 10, n. 3, 2018.

CCEE. O consumo de energia elétrica cresceu 4% no primeiro trimestre em relação a 2020. **Site do CCEE**. SP, 19 maio de 2021. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticia leitura?contentid=CCEE_663025&_adf.ctrl-state=12y88jw736_1&_afLoop=371302006526801 acessado em: 20/05/2021.

CINTRA, Leandro Pinheiro; BRAGA, Renato da Costa; RAPINI, Márcia Siqueira; SANTOS, Ulisses Pereira dos; BARBOSA, Allan Claudius Queiroz. **Indústria 4.0 e transformação digital: uma discussão conceitual sob perspectiva Neoschumpeteriana a que inclui políticas de CT&I e Catch Up.**, Belo Horizonte, v. 19, n. 54, p. 1-19, dez. 2019.

DIAS, Gabriel Martins. O que é Indústria 4.0?. **Doutor IoT**, São Paulo, de maio. de 2021. Disponível em: <<https://www.doutoriot.com.br/negocios/industria-40/o-que-e/>> Acesso em: 20/05/2021.

DOMINGOS, Dulce; Martins, Francisco; Cândido, Carlos Cândido. **Internet of Things Aware WS-BPEL Business Process**. Proceedings of the 15th International

Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS), 2013.

DUTRA, Alexandre da Silva; MARQUES, Fabiana Vidal Monteiro da Silva. **O uso de energias renováveis como mecanismo de sustentabilidade**. Espírito Santo, set. 2014.

FERREIRA, Pedro; MARTINHO, Ricardo; DOMINGOS, Dulce. IoT-aware business processes for logistics -limitations of current approaches, Proc. of Inforum – **Simpósio de Informática**, pp 611-622, Universidade do Minho, Braga, Portugal. 9 e 10 de set. 2010.

GARTNER, Predicts 2015: **Cloud and Digital Business Shape Strategies in the Future IT Services Market** on 13 nov. 2014.

GRILO, Margareth. Rn terá mais 12 novos parques eólicos e solares; investimento somarão 1,121 bilhão. **Tribuna do Norte**. 23 de outubro de 2019. Disponível em: <<http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/rn-tera-mais-12-novos-parques-ea-licos-e-dois-solares-investimentos-somara-o-1-121-bilha-o/462787>> Acessado em: 20/05/2021.

JENSEN, J. P., REMMEN, A. **Enabling Circular Economy Through Product Stewardship**. Procedia Manufacturing, v. 8, p. 377-384, 2017.

LETCHER, T. M. **Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines**. [s.l.] Joe Hayton, 2017.

LIMA, Tânia Miranda; SANTOS, Beatrice. **Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades**. **Revista Produção e Desenvolvimento**, [s. l], v. 4, n. 1, p. 111-124, jan. 2018.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p.1304-1 a 1304-13, 2008.

MCAFEE, A., & BRYNJOLFSSON, E. **Big Data: The Management Revolution**. Har, oct 2012.

NIST **National Institute of Standards and Technology**. Disponível em <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf>; acesso em 16/05/2021.

PINTO, M. deO. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: [s.n.].

REIS, Pedro. Principais causas dos problemas das turbinas eólicas com caixa multiplicadora. **Portal Energia**. 22/03/2020. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/principais-causas-dos-problemas-dos-aerogeradores-com-caixa-multiplicadora-parte-1/>> Acessado em: 20/05/2021.

ROBU, M. **Cloudcomputingbasedinformationsystems–present and future**. USV

Annals of Economics & Public Administration, v. 12, n. 2, p. 94-100, 2012.

RODRIGUES, PAULO ROBERTO. Energias Renováveis. **Energia Eólica**. pp7-51. Jun. 2011.

SANCHES, Bianca C.; CARVALHO, Emily S.; GOMES, Fábio Fonseca Barbosa. A indústria 4.0 e as suas contribuições à Sustentabilidade não. **Revista Produção e Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 111-124, 2018.

SANTOS, Joselma Carvalho; AZEVEDO, Ana Carolina Silva de; OLIVEIRA, Carla Montefusco de. **Empresas de energia eólica: Uma análise sobre a eficiência socioambiental**. Natal, maio 2019.

VIVADECORAPRO. Energia Eólica dá certo no Brasil? Descubra suas vantagens e desvantagens. Site **VivaDecoraPro**. Disponível em: <<https://www.vivadecora.com.br/pro/curiosidades/energia-eolica/>> Acessado em: 20/05/2021.