

# **OTIMIZAÇÃO DE ATIVIDADES CRÍTICAS DE PARQUES EÓLICOS: REDUÇÃO DE CUSTOS ATRAVÉS DE MODELAGEM DE LOGÍSTICA, PAVIMENTAÇÃO, CONCRETAGEM E MANUTENÇÃO**

**Bruno Bezerra Bluhm** (TUM) - bruno.b.bluhm@gmail.com

**Carla Freitas de Andrade** (UFC) - cbens2020@gmail.com

**Paulo Alexandre Costa Rocha** (UFC) - paulo.rocha@ufc.br

## **Resumo:**

*Com o objetivo de redução de custos em projetos de implantação de parques eólicos, este artigo apresenta a concepção e a utilização de iniciativas de otimização de obras civis, pela criação de modelos específicos das atividades críticas. A temática é particularmente relevante tendo em vista o avanço da energia eólica na matriz brasileira e também os históricos baixos índices de produtividade do setor de construção. Os modelos desenvolvidos foram aplicados em 6 complexos eólicos brasileiros recém-construídos, com capacidade instalada de mais de 1,4GW. Foram modeladas as atividades de: projeto geométrico de layout; pavimentação de acessos e plataformas; concretagem da base; e política de manutenção de equipamentos pesados. Essas atividades foram identificadas como críticas a partir de um estudo descritivo da estrutura analítica de projeto. Já nos testes de validação dos modelos foram obtidos ganhos financeiros, como: redução de 53 mil km em deslocamentos de caminhões betoneira em uma única obra; modelo de simulação de eventos discretos para balanceamento de atividades de pavimentação; economias de 25% no transporte de concreto; e criação de política ótima de investimentos em manutenção para diferentes geografias. A continuação da execução das iniciativas presentes neste trabalho tem potencial de aumentar ainda mais a viabilidade técnico-financeira do setor eólico como alternativa energética sustentável para o país.*

**Palavras-chave:** *Energia Eólica, Engenharia Civil, Otimização*

**Área temática:** *Outras fontes renováveis de energia*

**Subárea temática:** *Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade*

# OTIMIZAÇÃO DE ATIVIDADES CRÍTICAS DE PARQUES EÓLICOS: REDUÇÃO DE CUSTOS ATRAVÉS DE MODELAGEM DE LOGÍSTICA, PAVIMENTAÇÃO, CONCRETAGEM E MANUTENÇÃO

**Bruno Bezerar Bluhm, MSc** – bruno.bluhm@tum.de

Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

**Dr. Carla Freitas de Andrade** – carla@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

**Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha** – paulo.rocha@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** Com o objetivo de redução de custos em projetos de implantação de parques eólicos, este artigo apresenta a concepção e a utilização de iniciativas de otimização de obras civis, pela criação de modelos específicos das atividades críticas. A temática é particularmente relevante tendo em vista o avanço da energia eólica na matriz brasileira e também os históricos baixos índices de produtividade do setor de construção. Os modelos desenvolvidos foram aplicados em 6 complexos eólicos brasileiros recém-construídos, com capacidade instalada de mais de 1,4GW. Foram modeladas as atividades de: projeto geométrico de layout; pavimentação de acessos e plataformas; concretagem da base; e política de manutenção de equipamentos pesados. Essas atividades foram identificadas como críticas a partir de um estudo descritivo da estrutura analítica de projeto. Já nos testes de validação dos modelos foram obtidos ganhos financeiros, como: redução de 53 mil km em deslocamentos de caminhões betoneira em uma única obra; modelo de simulação de eventos discretos para balanceamento de atividades de pavimentação; economias de 25% no transporte de concreto; e criação de política ótima de investimentos em manutenção para diferentes geografias. A continuação da execução das iniciativas presentes neste trabalho tem potencial de aumentar ainda mais a viabilidade técnico-financeira do setor eólico como alternativa energética sustentável para o país.

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Engenharia Civil, Otimização

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta modelos de redução de custos que agregam otimização matemática às especificidades das operações de obras civis de parques eólicos, com o intuito de aumentar a viabilidade técnico-financeira de tal modalidade energética, em particular no cenário brasileiro, base das concepções, testes e validações das iniciativas. Sua relevância deriva do fato de o setor eólico nacional ter adquirido recente maturação mercadológica, de modo que passou a ter relevância real, e do crescimento na sua série histórica recente dentro da matriz energética brasileira.

A instalação de novos parques apresenta, pelo déficit histórico nacional de infraestrutura de transportes, uma criticidade logística que tem influência direta em diversas etapas da instalação de parques eólicos, inclusive na de obras civis. Tal fato, aliado ao baixo nível de qualificação da mão de obra envolvida faz com que, para o caso brasileiro em especial, o setor de construção civil apresente particularidades relevantes que motivam o foco do presente trabalho. Entre elas: seu alto número de equipamentos pesados mobilizados por obra; sua caracterização com atividades e sistemas intensivos de mão-de-obra; e sua margem de aplicação de estudos acadêmicos visto o caráter empírico de sua gestão.

Dessa forma, agregar melhorias operacionais – através de otimização e aumento dos índices de produtividade – é um desafio crítico para o setor de construção civil, o qual tem aplicação específica quanto a projetos de parques eólicos. Para tanto, o presente trabalho apresenta um mapeamento das operações envolvidas na parte civil da implantação de parques eólicos, uma identificação e detalhamento de suas etapas críticas e recomendações e modelagens para obtenção de otimizações, através da utilização de diferentes abordagens matemáticas, e, por consequente, obtenção de iniciativas de redução de custos nos processos envolvidos. É, então, nesse contexto que a pesquisa apresentada neste artigo se posiciona como inovação para o setor eólico brasileiro.

São descritas quatro iniciativas de otimização: alocação de sistemas logísticos chave; simulação de operações de terraplenagem e de pavimentação; simulação de operações de concretagem através de modelo preditivo; e dimensionamento ótimo de equipes de manutenção. A escolha dessas iniciativas se dá através de um estudo descritivo da estrutura analítica de projeto e consequente identificação de atividades críticas, contextualizando, assim, cada iniciativa individual dentro de uma visão global da obra.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Por se tratar de uma pesquisa de natureza multidisciplinar, são abordados diferentes conceitos matemáticos que fundamentam as iniciativas de otimização apresentadas. Cada modelo de redução de custos se utiliza de mais de um dos conceitos revisados, havendo, então, complementaridade na fundamentação teórica.

A primeira abordagem é de planejamento e orçamentação de obras, cerne do entendimento primário deste artigo. Isso ocorre principalmente porque projetos de infraestrutura sofrem constantemente com problemas de cronograma e de custos. Tal problemática, endereçada na literatura através do termo *overruns*, se mostra importante no sentido do entendimento de causas raiz e da criação de planos de ação para sua mitigação. Há uma correlação estatística positiva entre tamanho do projeto (em termos temporais e financeiros) e probabilidade de ocorrência de *overruns*. Tal correlação faz com que tal questão seja especialmente crítica em grandes projetos, como obras civis de parques eólicos (Gkritza e Labi, 2008).

Para trazer maior previsibilidade a tal problemática, Bhargava et al. (2010) apresentaram uma modelagem econométrica para associar *overruns* às suas causas raiz, através da metodologia dos mínimos quadrados ordinários. Arelada à previsibilidade, iniciativas de mitigação de *overruns* também são frequentes na literatura. Oliveri, Granja e Picchi (2016) mostraram que três estratégias principais são comumente utilizadas em projetos de infraestrutura: planejamento tradicional, location-based management system (LBMS) e last planner system (LPS). Tendo em vista as consequências negativas da adoção do planejamento tradicional, são estudadas as metodologias LBMS e LPS. Kenley e Seppänen (2010) apresentam a fundamentação teórica e também histórica da abordagem LBMS, a qual considera a localidade como item focal da análise, sendo especialmente recomendada então em projetos repetitivos.

Pela natureza repetitiva de obras civis de parques eólicos, a metodologia LBMS se mostra particularmente relevante. Büchmann-Slorup, Niclas e Lars (2012) introduzem o conceito de criticidade em planejamentos baseados em localidade, o qual endereça o déficit de melhoria de índices de produtividades das atividades estudadas.

A segunda abordagem é de simulação de eventos discretos, ferramenta matemática amplamente utilizada na literatura para modelagem de sistemas, em particular da construção civil, mas ainda vanguardista no cenário brasileiro. Smith et al. (1995) conceberam aplicações em sistemas de terraplenagem; Zankoul e Khoury (2014) aplicam modelagem em um estudo de caso de um parque eólico utilizando-se da ferramenta AnyLogic; e Fernandes (2015) o faz de maneira similar, porém para o caso específico de um parque eólico no Nordeste brasileiro e utilizando-se da ferramenta SIMUL8.

Chwif et al. (2012) introduzem o conceito de simulação de eventos discretos, sua fundamentação teórica e também exemplos de aplicações, no caso também através do software SIMUL8. Fundamentos de tal abordagem matemática são a teoria de filas, Sztrik (2012), e métodos de programação repetitiva, Harris e Ioannou (2012).

A terceira abordagem é de teoria de grafos, os quais funcionam como uma representação gráfica e matemática da realidade, através da utilização de nós e arcos (Ballobás, 1998). Eles são particularmente relevantes em obras civis de parques eólicos se utilizados para modelagem de layout, tendo em vista a comum ocorrência de grandes extensões geográficas nas obras dos complexos.

A literatura apresenta problemas clássicos de teoria de grafos, como os de caminho mínimo. Goodrich e Tamassia (2014) equacionam tal problema, no caso de caracterizado por uma única origem. Golubic (2004) apresenta exemplos também clássicos de resolução dessa classe de problemas, como o algoritmo de Dijkstra. Hoffman, Padberg e Rinaldi (2016) trazem recomendações para obtenção de melhor tempo de solução para problemas específicos, como o do caixeiro viajante. As recomendações incluem estratégias para redução do número de nós. Farahani e Miandoabchi (2013) apresentam também um segundo problema particularmente relevante em termos de caminho mínimo, o problema do carteiro chinês.

A quarta abordagem é de operações de obras civis, as quais finalizam a revisão da literatura e que são o cerne do entendimento das últimas iniciativas de otimização apresentadas neste artigo. Halpin e Riggs (1992) introduzem uma abordagem vanguardista sobre a utilização de estratégias de otimização através de análise e planejamento em operações de construção.

Quanto a atividades de terraplenagem e pavimentação, o tipo de solução utilizado para execução varia consideravelmente de acordo com os recursos disponíveis em campo e com o tamanho do projeto em questão. Catalani e Ricardo (2007) apresentaram diversas abordagens utilizadas nacionalmente, com as técnicas mais recomendadas para diferentes tipos de geografias encontradas no Brasil.

Diversos desafios operacionais se apresentam na execução de obras com altas cargas de terraplenagem e pavimentação. Entre eles, definições geométricas de projeto horizontal e de seções de corte e aterro, minimização de volumes transportados através de equacionamento de corte e aterro e também balanceamento no dimensionamento de equipes para diminuição de ociosidades. Exemplos de modelagens quanto a tais desafios são apresentados por Lima et al. (2013) – através de pesquisa operacional, para otimização da distribuição de materiais em uma obra de estrada – e Prata et al. (2005) – quanto ao dimensionamento de equipes mecânicas, utilizando-se de redes de Petri coloridas como ferramenta matemática.

Quanto a atividades de concretagem, o presente artigo tem foco logístico. Côrtes (2011) apresentou um modelo para programação da entrega do concreto através de centrais dosadoras, também comumente denominadas usinas. Por utilizar programação matemática no processo decisório de criação de uma programação, o modelo traz ganhos logísticos, principalmente se utilizado por agentes que administram mais de uma central. Em parques eólicos, o

transporte de concreto é feito através de central dosadora, porém usualmente com apenas uma central abastecendo uma grande área de trabalho.

Bluhm e Monteiro (2015) apresentaram um modelo específico para concretagem de bases de torre eólica, levando em consideração todas as suas especificidades e tempos – através de coleta de dados in situ em parques eólicos localizados no Nordeste brasileiro. Tal modelo preditivo tem a propriedade de determinar a duração da concretagem de uma base em função de três parâmetros de entrada: número de caminhões betoneira, volume da base e distância central-base. Pela sua especificidade (tanto técnica quanto geográfica), tal modelo é utilizado nas otimizações propostas na presente dissertação.

Por fim, ainda em se tratando de estudos de operações civis, porém com a finalidade de melhorias de planejamento, são revisadas estratégias de melhoria em manutenção de máquinas pesadas. Dekker (1996) apresentou uma revisão literária de diversos modelos de otimização para manutenção. Nele, diferentes abordagens são apresentadas, como preventiva, corretiva e preditiva. Em termos mais específicos para o setor de construção, Edwards e Holt (2009) apresentaram uma revisão temática, na qual a área do conhecimento referente a manutenção de frotas de equipamentos e de plantas de construção civil se mostra madura em diversos aspectos, como otimização de produtividade e automação. Como exemplo de sistema de manutenção, no caso preditiva, Wu et al. (2007) apresentaram um modelo através de redes neurais. O sistema é criado a partir de um algoritmo de suporte à decisão através de otimização por manutenção baseada em condição prévia dos equipamentos analisados.

### 3. METODOLOGIA

Para obtenção de resultados robustos e aplicáveis em campo, a presente pesquisa foi realizada em várias frentes de trabalho. Além das abordagens teóricas e da criação de modelos em ambiente acadêmico, interações com equipes de campo e visitas a obras de complexos eólicos foram pilares fundamentais para a concepção e também validação das iniciativas apresentadas neste artigo.

Em termos sequenciais, o trabalho na presente pesquisa se dividiu em: estudo da literatura; visita em campo para entrevistas e entendimento dos sistemas e subsistemas de construções de parques eólicos; determinação da estrutura analítica de projeto; definição das atividades críticas; visitas em campo para coleta de dados das atividades críticas; tratamento dos dados coletados; criação de modelos de otimização específicos de cada iniciativa de redução de custos; visitas em campo para execução de testes e validação dos modelos; e por fim análise crítica dos resultados obtidos com os modelos.

Quanto às atividades de campo, são utilizados como base de dados seis complexos eólicos no Nordeste brasileiro, os quais têm, somados, capacidade instalada de mais de 1,4GW. Por questões de confidencialidade contratual, esses dados não são divulgados na sua forma original para verificação, apenas através de resultados qualitativos e, quando quantitativos, de forma restrita.

As visitas em campo, nos parques eólicos citados, têm como objetivo coletar dados, realizar entrevistas e validar hipóteses e modelos. Nelas, acompanhou-se a execução dos diversos tipos de serviço, com coleta de dados via planilhas físicas e eletrônicas, medição cronométrica dos tempos de atividades e coleta de relatórios e cadastros diversos. Tais coletas se deram tanto pessoalmente como através de apontadores terceiros. Parte da coleta de dados, como horímetros de equipamentos, é realizada também de maneira automatizada eletronicamente.

Segue uma lista dos principais dados coletados in situ: rastreabilidades do concreto; ensaios geotécnicos; boletins de equipamentos; histogramas de equipamentos; histogramas de mão de obra; balanços de equipamentos; balanços de mão de obra; organogramas; quadros de incubação; rastreabilidade de óleo diesel; listas de compras de peças; históricos de consumo de água; rotas de caminhões; localidades georreferenciadas de jazidas de materiais; layouts de parques e de canteiros; e projetos geométricos de fundações.

As entrevistas, realizadas pessoalmente, por telefone ou por conferência, foram feitas com diversos agentes de campo, entre eles: gestores de obra, engenheiros de produção, engenheiros de sala técnica, engenheiros de terraplenagem, engenheiros civis, engenheiros mecânicos, engenheiros eletricitas, engenheiros ambientais, engenheiros de segurança do trabalho, técnicos de edificações, técnicos financeiros, técnicos de qualidade, técnicos de meio-ambiente, técnicos de segurança do trabalho, mecânicos, encarregados de oficina, encarregados de topografia, encarregados de terraplenagem, encarregados civis, almoxarifes, auxiliares, pedreiros, serventes, carpinteiros, armadores, eletricitas, foiceiros e serralheiros, topógrafos, operadores de maquinários linha amarela, operadores de caminhões diversos e moradores de comunidades afetadas pelas obras de implantação de parques eólicos.

Os modelos utilizaram-se dos conceitos de teoria de filas, simulação de eventos discretos e teoria de grafos, sendo implementados através das ferramentas computacionais SIMUL8 e Microsoft Excel.

A validação de modelos e de hipóteses se deu em dois sentidos: primeiramente através das entrevistas citadas, com aprovação por parte dos agentes responsáveis pelas frentes de serviço; e por fim através da execução das recomendações dadas pelos modelos e da coleta de dados e comparação deles via dados recentes versus históricos.

Os trabalhos extracampo se deram nas frentes de revisão bibliográfica, criação de modelos e formatação de uma estrutura de inteligência gerencial para o acompanhamento dos projetos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Modelagem dos sistemas logísticos chaves

A alocação de posições chave, ou seja, de itens cuja localização tem impacto direto e considerável nas movimentações ocorridas no projeto, é a principal finalidade da modelagem do planejamento em termos logísticos, pois permite, desde a concepção do projeto, uma minimização nos deslocamentos necessários. São consideradas, através de entrevistas com agentes de campo e de análises e interpretações próprias a natureza das obras de eólica, a posição do principal item fixo de custos logísticos em uma obra de parque eólico: a usina dosadora de concreto. Como ferramenta de modelagem, grafos ponderados são escolhidos, por aliarem a flexibilidade das especificidades de diferentes complexos eólicos à universalidade da aplicação de algoritmos na resolução dos problemas clássicos.

A tradução do layout de um parque eólico em um grafo se dá da seguinte forma: pontos de interesse – entradas, plataformas para bases de torres, canteiros, jazidas e bota-foras – são cadastrados como nós, sendo atribuídos a cada um deles uma classificação sobre sua finalidade. Os acessos, os quais interligam tais pontos de interesse, são cadastrados como arcos. Esses cadastros permitem a criação de um grafo  $G$  global do parque eólico e de diversos subgrafos, que podem traduzir diferentes momentos de execução da obra. Também define-se o grafo derivado, o qual contém todas as estacas do parque como nós potenciais.

A flexibilidade de criação de subgrafos para situações que variam de acordo com o tempo traduz a dinamicidade intrínseca do projeto, permitindo otimizações globais na fase de planejamento e também pontuais ao longo de sua execução.

Como o modelo aqui apresentado se trata da alocação da usina dosadora de concreto, deve-se contextualizar o processo de concretagem. De maneira geral, tal processo engloba um ciclo de preparação do concreto, junção dos insumos, carregamento de caminhões betoneira, transporte de material à base, descarregamento, ensaios específicos e deslocamento de volta do caminhão à usina. Por se tratar de um processo repetitivo, são numerosos os deslocamentos usina-base.

Pela dificuldade operacional para sua mobilização – a qual comumente requer meses de preparação – o presente modelo considera a usina como um ponto fixo no grafo. Dessa forma, sua localização depende da minimização da soma das distâncias usina-base, se tratando, então, de um conjunto de problemas de caminho mínimo, com pesos positivos, sem necessidade de passagem por todos os nós ou arcos individualmente. Ou seja, o problema pode ser traduzido pela função objetivo de minimização de distâncias.

Foi testado com sucesso o modelo de alocação de usina de concreto em um complexo eólico com mais de 300 MW de capacidade instalada. A aplicação do modelo se deu através de análise da solução originalmente adotada pelo corpo técnico de campo e pela proposta, e posterior execução, de recomendação de otimização na alocação da usina.

A solução inicialmente adotada, a qual não se utilizou do modelo deste trabalho, é a de instalar a usina em uma posição inicial e manter tal posição durante toda a duração da obra. Com aplicação da modelagem de otimização, foi identificada uma posição ótima para realocação da usina, diferente da posição original. Por restrições de licenciamento ambiental, a solução final se apresenta como um ponto de ótimo local, não global. Ou seja, conseguiu-se melhorar a alocação através da mudança, porém não se pôde utilizar a melhor posição apresentada pelo modelo sem restrições.

Assim, com a utilização do modelo, já com as restrições requisitadas pela realidade do projeto, reduziu-se 53 mil quilômetros de deslocamento total nos processos de concretagem. Essa redução, além de absolutamente significativa, também tem relevância do ponto de vista relativo: os deslocamentos do processo de concretagem foram reduzidos em 56%. Além dos ganhos financeiros, a aplicação do presente modelo trouxe um melhor dimensionamento de caminhões betoneira, através do modelo preditivo agregado (também apresentado neste trabalho) e também nos tempos de operação. Destaca-se a importância na mitigação de riscos operacionais, e assim uma melhoria nos índices probabilísticos de segurança do trabalho, ao se realizarem concretagens com durações menores (Fig. 1).

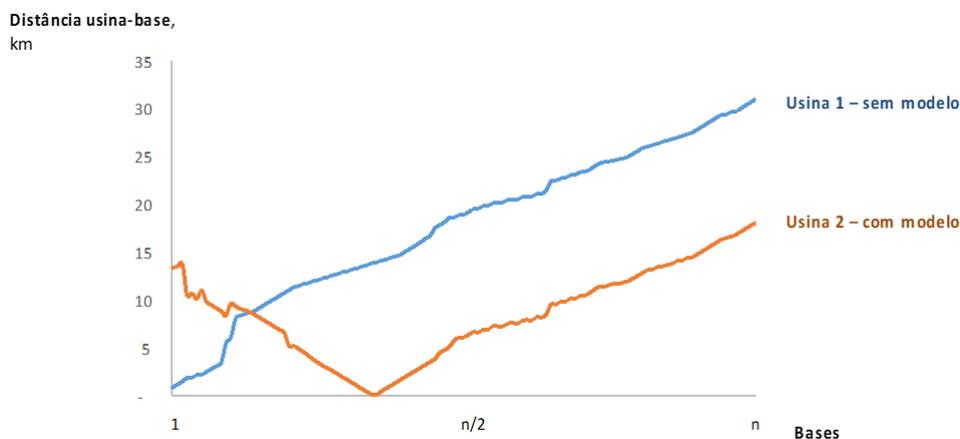


Figura 1 – Redução dos deslocamentos usina-base através de realocação da usina de concreto com utilização de modelagem logística.

## 4.2. Modelagem das operações de pavimentação

As operações de pavimentação em acessos de parques eólicos, que são comumente caracterizados como estradas de terra, se dão pela presença intensiva de equipamentos pesados para execução de camadas de sub-base e base. Usualmente, utiliza-se como principal parâmetro de engenharia a capacidade de suporte do pavimento, dada pelo índice CBR, Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio). Há casos, embora pouco comuns, de execução de pavimento do tipo BGS, Brita Graduada Simples. Tais casos são mais recomendados em situações de maior incidência de cargas, como pátios de montagens de torres de concreto.

O principal desafio nesta atividade crítica, então, se dá em balancear de maneira ótima os equipamentos pesados, ou seja, atuando no dimensionamento de máquinas. Para tanto, deve-se modelar toda a caracterização da operação. Essa modelagem deve incluir: geografia trabalhada (como tipo de solo e fator de empolamento), geometria da jazida (índices de produtividades das escavadeiras e interface entre escavadeiras e caminhões), layout e condição dos acessos de ligação entre a jazida de a frente de serviço (foco na parte logística do modelo) e características dos equipamentos utilizados (índices de quebra e capacidades produtivas).

Utiliza-se simulação de eventos discretos como a ferramenta matemática mais adequada à modelagem das atividades de pavimentação, tendo como objetivo de otimização do modelo o correto balanceamento entre máquinas e o dimensionamento das patrulhas (Fig. 2). Ressalta-se a inclusão da logística de transporte de material de jazida como parte integrante e relevante da modelagem, tendo em vista os altos índices de variação encontrados em campo quanto ao desempenho dos caminhões basculantes.

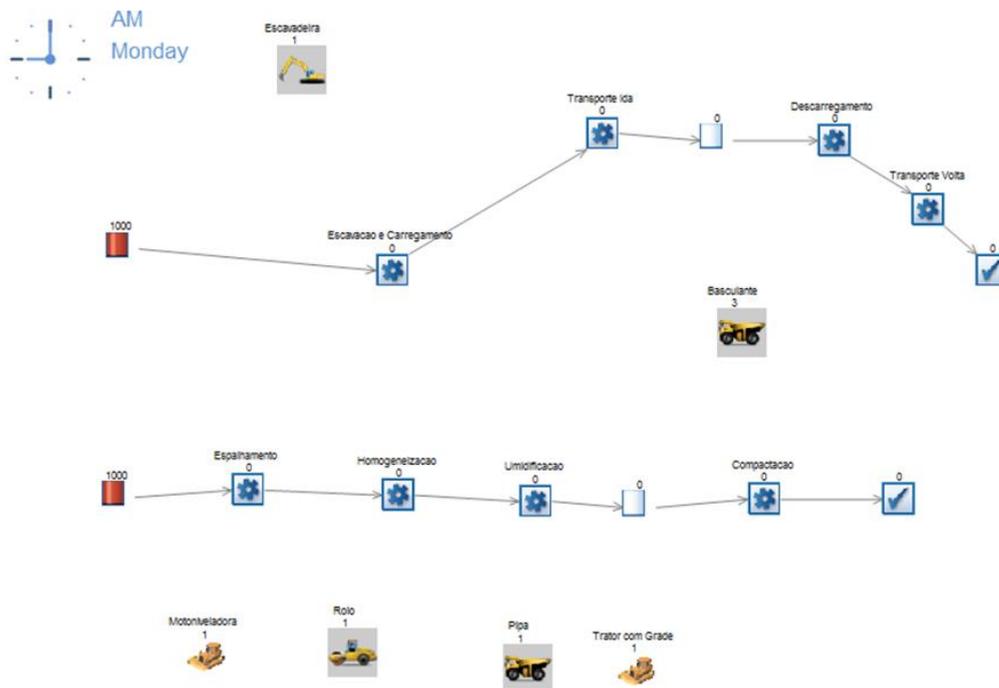


Figura 2 – Modelo de simulação de eventos discretos para atividades de pavimentação.

O modelo trata como unidade de trabalho (elemento principal de análise em uma simulação de eventos discretos) o material de jazida, o qual sofre dois processos: transporte e execução. Como na realidade o material de jazida é considerado um elemento contínuo, cria-se uma unidade de discretização dele para representá-lo em um modelo discreto. Devido às limitações físicas de transporte, adota-se como melhor unidade para tal discretização que cada elemento de trabalho representa a quantidade de material relativa à capacidade de um caminhão basculante. Fatores como empolamento do solo e tamanho do caminhão influenciam na determinação do valor exato de tal unidade de trabalho, o qual varia de acordo com a obra trabalhada. Comumente, valores da ordem de  $10 \text{ m}^3$  são considerados razoáveis em tal determinação.

Esta modelagem das operações de pavimentação permite a simulação de diferentes cenários de produtividade, dimensionamento de equipamentos e variações de rotas. Dessa forma, pode-se analisar minuciosamente os parâmetros que mais influenciam no desempenho operacional das equipes de campo e definir cenários ótimos.

## 4.3. Modelagem das operações de concretagem

As operações de concretagem se referem à deposição de concreto nas fundações e bases de torres eólicas, o qual, juntamente com o aço da armadura e dos possíveis tirantes, confere resistência estrutural à torre a ser erguida. Por se tratar de um material de composição heterogênea quanto a seus insumos, o concreto requer uma estrutura básica para preparo, a qual consiste em uma subestrutura de junção dos insumos e uma subestrutura de mistura deles.

A otimização do processo de concretagem, tendo em vista toda a sua complexidade de execução, deve seguir um norte de foco quanto às reduções de custos. Para tanto, utiliza-se a análise de Pareto, na qual são identificados os itens com maior peso financeiro no processo estudado. O principal item de custos são os caminhões betoneira. Dessa forma, entende-se que a modelagem do transporte usina-base é o principal foco da modelagem da concretagem. Através da metodologia de caminho crítico, calcula-se o tempo de concretagem, pela duração das atividades do último caminhão a depositar concreto na base. A principal equação universal do caminho crítico do processo de concretagem, como visto na literatura, é:

$$TTO = t_{intervalo,u} + n_{ciclos,u} \cdot t_{padrão} + t_{filas,u} + t_{acabamento} \quad (1)$$

onde TTO indica tempo total de operação, t indica tempo, n indica número e u indica o código para último caminhão. O modelo, então, divide a concretagem em quatro etapas: intervalo é a pausa inicial para que todos os caminhões carreguem antes que o último caminhão a depositar concreto na base (o caminhão observado para cálculo do tempo total de operação, chamado caminhão u) possa iniciar seu processo de carregamento abaixo dos silos da usina; padrão é a duração do ciclo padrão de transporte, o qual inclui carregamento, espera para saída, transporte de ida, descarregamento, slump e descarregamento; filas é o tempo no qual o caminhão u passa em estado de fila, ou seja, aguardando a as atividades de outros caminhões para iniciar a sua, com exceção do intervalo de espera inicial, já incluso na primeira etapa deste modelo; acabamento é o tempo no final da concretagem, no qual todos os caminhões já depositaram o concreto e a equipe da base conforma o material para que se atinja a geometria de projeto.

Idealmente o período de concretagem deve ocorrer com uma base executada por dia. Dessa forma, define-se um limitante operacional de duração, o qual é função do horário médio de início das concretagens, e trabalha-se o modelo para se obter o cenário de menor custo e que atenda à condicionante imposta por tal limite.

A aplicação do modelo em uma obra trouxe previsibilidade no comportamento esperado para os tempos de operação (Fig. 3). Ajustes de refinamento nos valores absolutos permitem diminuição no erro, dado que o modelo se mostrou relativamente conservador em suas premissas. A execução de recomendações de dimensionamento de caminhões betoneira, com base na previsão dos tempos de operação, trouxe economias da ordem de 25% nos custos relativos ao transporte de concreto.

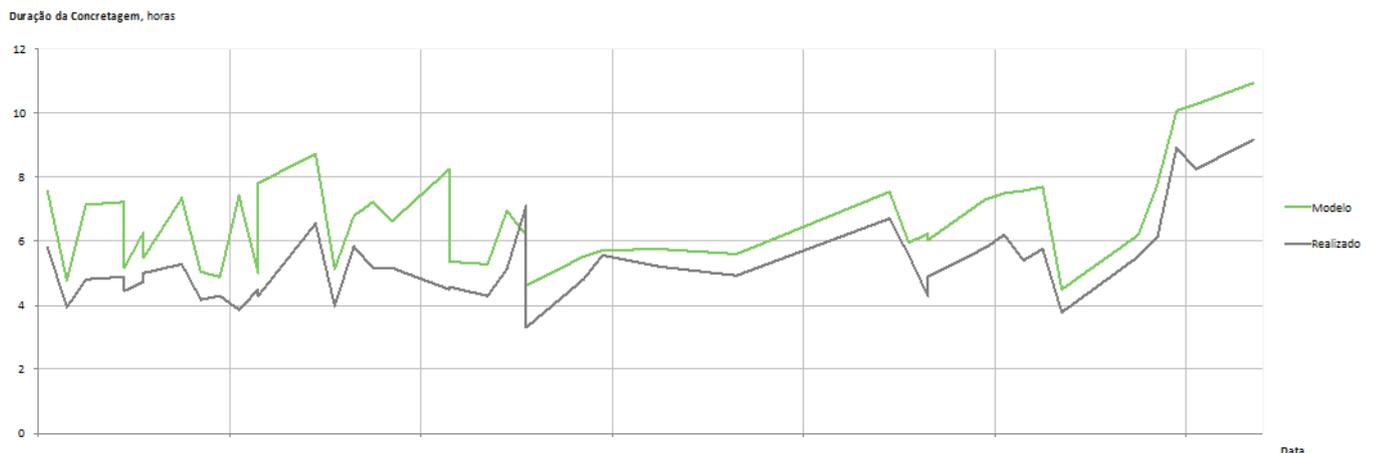


Figura 3 – Modelo preditivo de concretagem aplicado na primeira obra.

#### 4.4. Modelagem dos índices de confiabilidade mecânica

Obras de parques eólicos são caracterizadas por ambientes usualmente isolados e de pouca infraestrutura pré-estabelecida. Dessa forma, a abertura de novos acessos nessas áreas torna-se de natureza agressiva para os equipamentos presentes no campo. Essa agressividade se traduz nos índices de confiabilidade mecânica, os quais são construídos através das taxas de quebras das máquinas e das causas dessas quebras.

Por se tratar de um sistema de fenômenos indesejados e de natureza imprevisível, a análise das quebras não se dá pelas quebras em si, mas sim pela política de manutenção das obras. Isso pois estruturas mais robustas de oficina permitem melhor tempo de resposta na ocorrência de quebras, diminuindo assim as taxas globais de máquinas paradas por indisponibilidade mecânica.

Seguindo tal diretriz, o presente artigo apresenta uma modelagem de política de manutenção que é função dos dados históricos coletados nas obras, considerando os fatores geográficos e de investimentos dispendidos nas oficinas de cada obra. A ferramenta matemática utilizada é a regressão simples não linear, através da metodologia de mínimos quadrados ordinários (*ordinary least squares*, OLS) para minimização das diferenças entre o modelo previsto e as amostras reais.

Assim, o modelo de otimização de dimensionamento de oficina se deu através da análise de correlação entre investimentos em oficina e índices de quebras. Foram comparadas duas obras de diferentes geografias e obtiveram-se resultados para tal correlação através da aplicação de regressão simples não linear (Fig. 4 e 5).

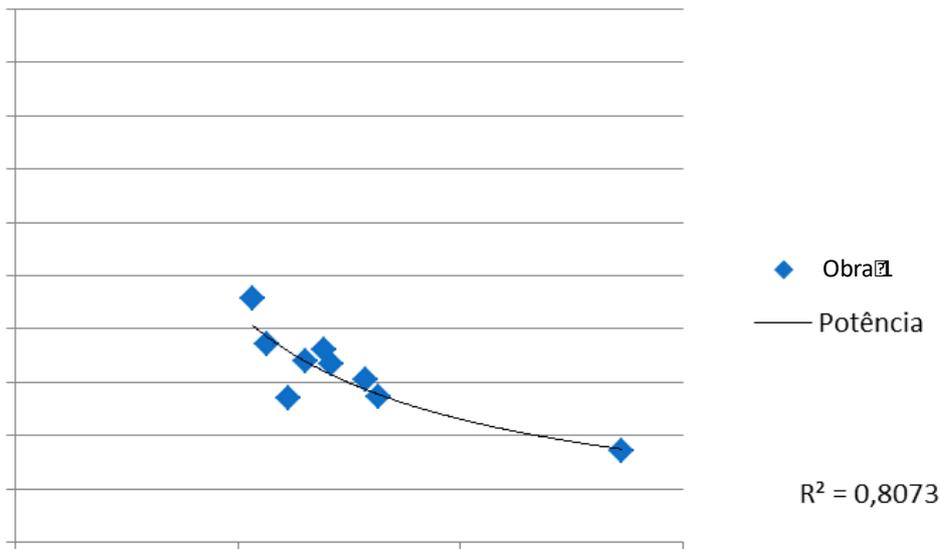


Figura 4 – Regressão entre índices de quebra (y) e investimentos em oficina (x), obra 1. Eixos ocultos, por confidencialidade.

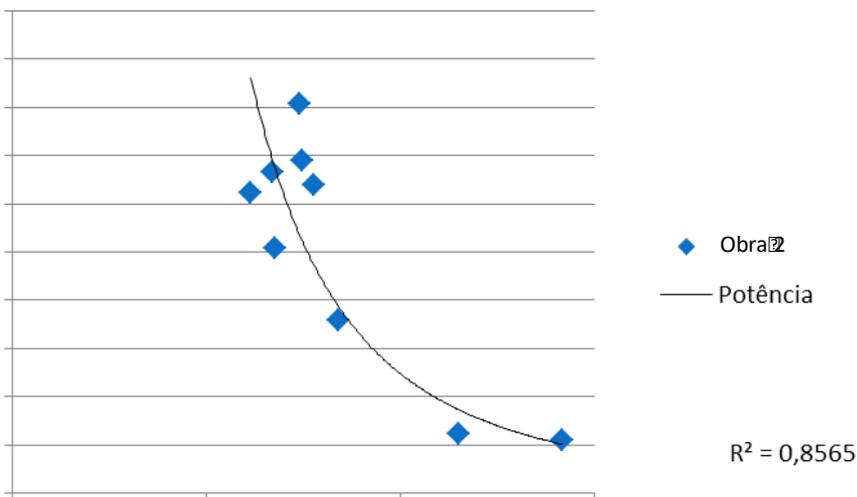


Figura 5 – Regressão entre índices de quebra (y) e investimentos em oficina (x), obra 2. Eixos ocultos por confidencialidade.

Valores de coeficientes de determinação,  $R^2$ , acima de 80% em ambos os gráficos permite adoção das conclusões como relativamente robustas, mesmo com amostragem pequena. O tipo de regressão apresentada utiliza metodologia OLS, como descrito na literatura estudada.

Considera-se que o dimensionamento ótimo para os investimentos em oficina é aquele em que o valor da derivada  $dy/dx$  na função obtida seja igual a -1. O sinal negativo indica que maiores investimentos em oficina geram menores taxas de quebra. O valor unitário significa que o valor investido em oficina retorna exatamente o mesmo valor financeiro em menores índices de quebra, ou seja, investimentos acima do ponto ótimo indicam oficina superdimensionada e aqueles abaixo o contrário, ou seja, subdimensionada.

## 5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a concepção e aplicação de quatro iniciativas de otimização em obras civis de projetos eólicos, aplicando-as em seis obras no Nordeste brasileiro, com mais de 1,4GW de capacidade instalada. Essas ações, embasadas na literatura de diversas ferramentas de modelagem diferentes, trouxeram ganhos consideráveis nas atividades estudadas.

Exemplos de ganhos obtidos são: redução de 53 mil km nos deslocamentos usina-base em uma única obra; balanceamento de equipamentos envolvidos em operações de concretagem e pavimentação, a partir de um modelo de

simulação de eventos discretos, o qual pode incluir comportamentos estocásticos; redução de 25% nos custos com o transporte do concreto, tendo em vista maior previsibilidade da duração das concretagens e assim melhor dimensionamento de caminhões betoneira; e adoção de políticas de manutenção que definem orçamentos ótimos de oficina em função da geografia da obra.

As iniciativas aqui apresentadas se agregam dentro de uma sistemática pré-definida de identificação de atividades críticas em obras civis de parques eólicos, sistemática essa baseada em um estudo global do projeto. Os testes e validações em campo das iniciativas conferem maior robustez à eficácia delas. Por fim, a continuação de sua aplicação e refinamento traz um horizonte futuro de endereçamento dos desafios enfrentados durante os testes primários aqui apresentados.

Espera-se que com, além dos resultados já obtidos e apresentados neste trabalho, a continuação da utilização desses modelos de otimização agregue ao setor eólico nacional uma maior viabilidade técnico-financeira, por reduzir riscos e custos operacionais em projetos de infraestrutura estratégicos à segurança energética do país.

## REFERÊNCIAS

- Ballobás, B., 1998. *Modern Graph Theory*. Nova Iorque: Springer, 1ª edição.
- Bhargava, A., Anastasopoulos, P. Ch., Labi, S., Sinha, K. C., Mannering, F. L., 2010. Three-Stage Least-Square Analysis of Time and Cost Overruns in Construction Contracts. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 136, pp. 1207-1218.
- Bluhm, B. B., Monteiro, A., 2015. Estudo Logístico do Processo de Concretagem da Base de Torre Eólica. *Brazil Wind Power*.
- Büchmann-Slorup, R., Niclas, A., Lars, F. P., 2012. *Criticality in Location-Based Management of Construction*. Copenhagen: Technical University of Denmark.
- Catalani, G., Ricardo, H. S., 2007. *Manual Prático de Escavação: Terraplenagem e Escavação em Rocha*. Rio de Janeiro: Pini.
- Chwif, L., Medina, A., Vieira, D. R., Pércora Jr, J. E., Pereira, W. I., 2012. *Introdução ao SIMUL8: Um Guia Prático*. São Paulo: Ed. dos Autores.
- Côrtes, C. S., 2011. *Modelo de Decisão para a Programação de Entrega de Concreto Produzido em Centrais*. Universidade de São Paulo.
- Dekker, R., 1996. Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51, pp. 229-240.
- Edwards, D. J., Holt, G. D., 2009. Construction Plant and Equipment Management Research: Thematic Review. *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 186-206.
- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E. (ed.), 2013. *Graph Theory for Operations Research and Management: Applications in Industrial Engineering*. Hershey: IGI Global.
- Fernandes, T. C., 2015. *Avaliação de Desempenho na Construção de Parques Eólicos Baseada em Simulação de Eventos Discretos*. Universidade Federal do Ceará.
- Gkritza, K., Labi, S., 2008. Estimating Cost Discrepancies in Highway Contracts: A Multistep Econometric Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 134, pp. 953-962.
- Golumbic, M. C., 2004. *Algorithmic Graph Theory and Perfect Graphs*. San Diego: Elsevier, 2ª edição.
- Goodrich, M. T., Tamassia, R., 2014. *Algorithm Design and Applications*. Nova Iorque: Wiley, 1ª edição.
- Halpin, D. W., Riggs, L. S., 1992. *Planning and Analysis of Construction Operations*. Nova Iorque: John Wiley & Sons.
- Harris, R. B., Ioannou, P. G., 1998. *Repetitive Scheduling Method*. Ann Arbor: University of Michigan.
- Hoffman, K. L., Padberg, M., Rinaldi, G., 2016. Traveling Salesman Problem. *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, pp. 1573-1578.
- Kenley, R., Seppänen, O., 2010. *Location-Based Management for Construction: Planning, Scheduling and Control*. London: Spon Press.
- Lima, R. X., Nobre Júnior, E. F., Prata, B. A., Weissmann, J., 2013. Distribution of Materials in Road Earthmoving and Paving: Mathematical Programming Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 139, pp. 1046-1054.
- Oliveri, H., Granja, A. D., Picchi, F. A., 2016. Planejamento Tradicional, Location-Based Management System e Last Planner System: Um Modelo Integrado. *Ambiente Construído*, Vol. 16, No. 1, pp. 265-283.
- Prata, B. A., Nobre Júnior, E. F., Barroso, G. C., 2005. Dimensionamento de Equipes Mecânicas em Obras de Terraplenagem Usando Redes de Petri Coloridas. Universidade Federal do Ceará.
- Smith, S. D., Osborne, J. R., Forde, M. C., 1995. Analysis of Earth-Moving Systems Using Discrete-Event Simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 121, pp. 388-396.
- Sztrik, J., 2012. *Basic Queueing Theory*. Debrecen: University of Debrecen.
- Wu, S., Gebrael N., Lawley, M. A., Yih, Y., 2007. A Neural Network Integrated Decision Support System for Condition-Based Optimal Predictive Maintenance Policy. *Transactions of Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol. 37, No. 2, pp. 226-236.
- Zankoul, E., Khoury, H., 2014. Simulation of On-Shore Wind Farm Construction Process in Lebanon. *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining*.

## **WIND FARM CONSTRUCTION CRITICAL ACTIVITIES OPTIMIZATION: COST REDUCTION THROUGH LOGISTICS, PAVING, CONCRETE AND MAINTENANCE MODELLING**

**Abstract.** *Aiming to obtain cost reduction in wind farm construction projects, this study presents the conception and utilization of new civil works optimization initiatives, by creating specific modelling of critical activities. This theme is particularly relevant in Brazil, for the wind sector has presented a steady growth in the past decade, construction productivity indicators present historic low levels and there is considerable margin in applying infrastructure academic studies in new wind farm projects. This article has been applied in six recently built Brazilian onshore wind farms, with more than 1.4 GW of installed capacity and average turbine power of 2.0 MW. The modelled activities are: layout design; construction planning; heavy equipment maintenance policy; roads and pads paving; and foundations concrete pouring. These activities have been identified as critical using a work breakdown structure approach. First implementation tests obtained financial gains such as: reduction of 53 thousand km in concrete truck routing (56% reduction); a discrete event simulation model to balance equipment utilization in paving and earthmoving operations; 25% cost reduction in concrete transport; and conception of optimal maintenance policies depending on local geographies. Continuing these initiatives in new projects has the potential to further enhance wind energy's position as a technically and financially feasible energy alternative for Brazil.*

**Key words:** *Wind Energy, Civil Engineering, Optimization.*