



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO BEZERRA BLUHM

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

FORTALEZA

2017

BRUNO BEZERRA BLUHM

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

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B62i Bluhm, Bruno.
Otimização de Atividades Críticas de Obras Civas de Parques Eólicos: Redução de Custos Através de Modelagem de Logística, Cronograma, Manutenção, Pavimentação e Concretagem / Bruno Bluhm. – 2017.
96 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profª. Dra. Carla Freitas de Andrade.
1. Energia eólica. 2. Engenharia civil. 3. Modelagem. 4. Otimização. 5. Redução de custos. I. Título.
CDD 620.1
-

BRUNO BEZERRA BLUHM

OTIMIZAÇÃO DE ATIVIDADES CRÍTICAS EM OBRAS CIVIS DE PARQUES
EÓLICOS: REDUÇÃO DE CUSTOS ATRAVÉS DE MODELAGEM DE LOGÍSTICA,
CRONOGRAMA, MANUTENÇÃO, PAVIMENTAÇÃO E CONCRETAGEM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 20/09/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Carla Freitas de Andrade (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a família, mestres e companheiros.

RESUMO

Com o objetivo de redução de custos em projetos de implantação de parques eólicos, este estudo 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 no cenário brasileiro, pois o setor eólico apresentou crescimento consistente na última década, a produtividade na construção civil tem histórico de índices baixos e poucas melhorias, e há margem de aplicabilidade de estudos acadêmicos de infraestrutura em novos projetos eólicos. O presente trabalho foi aplicado em 6 complexos eólicos brasileiros recém-construídos, com capacidade instalada de mais de 1,4GW. Foram modeladas as atividades de: projeto geométrico de *layout*; planejamento de obras; 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; 20% menores tempos de mobilização das equipes de fundação, armação e concretagem via melhora no planejamento; identificação de causas raiz de problemas no desempenho de caminhões basculantes; 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. Modelagem. Otimização. Redução de custos.

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 dissertation has been applied in six recently built Brazilian wind farms, with more than 1,4GW of installed capacity. The modelled activities are: layout project; construction planning; roads and pads paving; foundations concrete pouring; and heavy equipment maintenance policy. 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; 20% less field time for the foundation, steeling and concrete teams; root cause identification for issues in dump truck performance; 25% cost reduction in concrete transport; and creation 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, modelling, optimization, cost reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Evolução trimestral da construção civil no Brasil. Destaque para os ciclos econômicos do setor	18
Figura 2	Índices de produtividade para os setores de manufatura e de construção.....	18
Figura 3	Capacidade instalada acumulada global anual, consolidação do setor: período de 2000 a 2015.....	21
Figura 4	Capacidade instalada anual nova por região	22
Figura 5	Previsão de LCOE para o setor eólico, três tipos de tecnologias diferentes (<i>onshore</i> , <i>offshore</i> de fundação fixa e <i>offshore</i> flutuante).....	22
Figura 6	Previsão de mercado, por região, 2016-2020.....	23
Figura 7	Capacidade instalada de energia eólica no Brasil, série histórica – dados tracejados se referem a parques já contratados, porém não instalados.....	24
Figura 8	Matriz energética brasileira	24
Figura 9	Investimentos no setor eólico brasileiro, em US\$, e representatividade do montante eólico no total investido em energias renováveis.....	25
Figura 10	Comparativo de países: capacidade instalada nova referente ao ano de 2015.....	26
Figura 11	Fatores de capacidade no Brasil em 2015.....	28
Figura 12	Potencial eólico brasileiro a 50m de altura e distribuição dos parques eólicos em operação no Brasil.....	29
Figura 13	Potencial eólico sazonal a 100m de altura, estado da Bahia.....	30
Figura 14	Infraestrutura: sistema elétrico e malha viária, estado da Bahia.....	31

Figura 15	Exemplo de layout de projeto para aplicação de uma LBMS.....	35
Figura 16	Árvore de localidades para o exemplo de projeto de edificação apresentado.....	35
Figura 17	Exemplo de modelo de simulação de eventos discretos em SIMUL8.....	38
Figura 18	Exemplo de modelo de simulação aplicado à implantação de parques eólicos: etapa de fundações.....	39
Figura 19	Níveis de produtividade de mão de obra em operações de construção.....	45
Figura 20	Exemplo de divisão da obra por abordagem <i>top down</i>	50
Figura 21	Exemplo de divisão da obra por abordagem <i>bottom up</i>	50
Figura 22	Esquema dos diferentes tipos de serviço da parte geotécnica.....	55
Figura 23	Esquema dos diferentes tipos de serviço da parte civil.....	58
Figura 24	Esquema dos serviços para execução de acessos.....	59
Figura 25	Esquema dos serviços para execução de fundações.....	60
Figura 26	Esquema geral da estrutura analítica de projeto da obra.....	60
Figura 27	Modelo de pavimentação, feito em SIMUL8.....	67
Figura 28	Gráfico com análise de Pareto dos principais itens de custo da concretagem..	73
Figura 29	Redução dos deslocamentos usina-base através de realocação da usina de concreto com utilização de modelagem logística.....	77
Figura 30	Aplicação do modelo de otimização de cronograma através de análise das linhas de balanço das atividades de fundação (HCM) e concretagem.....	79
Figura 31	Acompanhamento do desempenho dos caminhões basculantes em obra, com identificação do grupo de melhores resultados.....	82
Figura 32	Modelo preditivo de concretagem aplicado na primeira obra.....	83
Figura 33	Modelo preditivo de concretagem aplicado na segunda obra.....	84
Figura 34	Comparativo entre investimentos na oficina e taxas de quebras, obra 1.....	86
Figura 35	Comparativo entre investimentos na oficina e taxas de quebras, obra 2.....	86

Figura 36	Regressão simples não linear entre índices de quebra (y) e investimentos em oficina (x), obra 1.....	87
Figura 37	Regressão simples não linear entre índices de quebra (y) e investimentos em oficina (x), obra 2.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Crescimento relativo previsto, 2015-2020, por região.....	23
Tabela 2	Fatores de capacidade, por região do globo: América do Sul destacada.....	27
Tabela 3	Sumário dos escopos das partes da macroestrutura da obra.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CPM	<i>Critical Path Method</i> (Método do Caminho Crítico)
EAP	Estrutura Analítica de Projetos
FC	Fator de Capacidade
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i> (Conselho Global de Energia Eólica)
HCM	Hélice Contínua Monitorada
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia Renovável)
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> (Indicador Chave de Performance)
LBMS	<i>Location-Based Management System</i> (Sistema de Gestão Baseado em Localidade)
LPS	<i>Last Planner System</i> (Sistema do Último Planejador)
LCOE	<i>Levelised Cost of Energy</i> (Custo Nivelado de Energia)
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> (Mínimos Quadrados Ordinários)
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i> (Rede de Políticas de Energia Renovável para o Século 21)
SMS	Segurança, Meio ambiente e Saúde ocupacional
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> (Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS DO TRABALHO	20
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	Setor eólico	21
3.2	Planejamento e orçamentação de obras	32
3.3	Simulação de eventos discretos	36
3.4	Teoria de grafos	39
3.5	Operações de obras civis	42
4	METODOLOGIA	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Construção da estrutura analítica de projeto	52
5.1.1	<i>Detalhamento de escopo: parte terraplenagem geral</i>	52
5.1.2	<i>Detalhamento de escopo: parte civil geral</i>	55
5.1.3	<i>Detalhamento de escopo: itens auxiliares</i>	58
5.1.4	<i>Integração de diferentes escopos</i>	59
5.2	Identificação de atividades críticas da estrutura analítica de projeto	60
5.3	Modelagem das atividades críticas	61
5.3.1	<i>Modelagem dos sistemas logísticos chave</i>	61
5.3.2	<i>Modelagem das operações de pavimentação</i>	64
5.3.3	<i>Modelagem das operações de concretagem</i>	70
5.3.4	<i>Modelagem dos índices de confiabilidade mecânica</i>	75
5.4	Otimização operacional: aplicações e discussões de diretrizes	76
5.4.1	<i>Diretrizes de otimização de projeto</i>	76
5.4.2	<i>Diretrizes de otimização de planejamento</i>	78
5.4.3	<i>Diretrizes de otimização de operações</i>	80
5.4.4	<i>Análise de ganhos</i>	89
6	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS	92

1. INTRODUÇÃO

O cerne do presente trabalho é agregar 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.

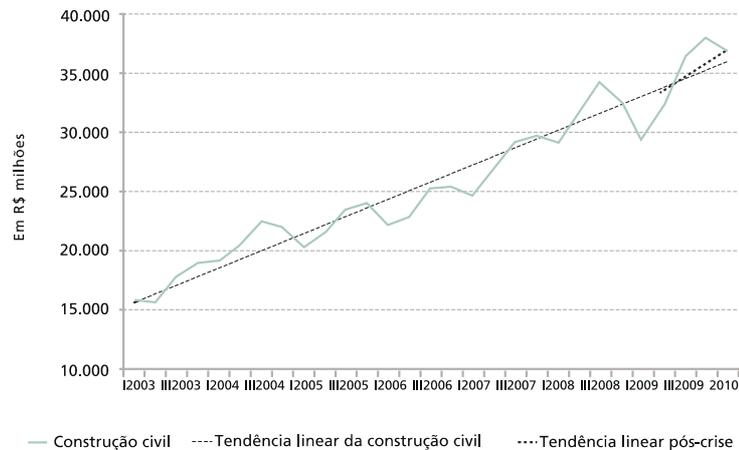
Sua relevância deriva do fato de o setor eólico brasileiro ter adquirido recente maturação mercadológica, de modo que passou a ter relevância real, e do crescimento na sua série histórica recente dentro da matriz energética brasileira.

Embora o mercado apresente expectativa transicional gradual da etapa de instalação de novos parques para a de operação e manutenção de parques com ciclos de vida cada vez mais próximos de seus limites previstos, o cenário eólico brasileiro, por ser ainda relativamente recente – aproximadamente uma década – perante sua contrapartida mundial, tem ainda dependência direta de uma política de implantação e de compra de nova energia, particularmente de reserva, mantendo o estado de importância de estudos que visem a melhorias da viabilidade de tal modalidade energética (ABEEólica, 2015).

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.

O setor de construção civil tem características cíclicas, apresentando variações sensíveis com a situação macroeconômica, como explicitado na Figura 1. No setor eólico brasileiro, o balanceamento de oferta – tanto de equipamentos como de mão-de-obra – e de demanda está diretamente ligado ao setor de infraestrutura nacional, o qual é dependente de interesses e políticas estratégicas da Federação (BNDES, 2011).

Figura 1: Evolução trimestral da construção civil no Brasil. Destaque para os ciclos econômicos do setor.

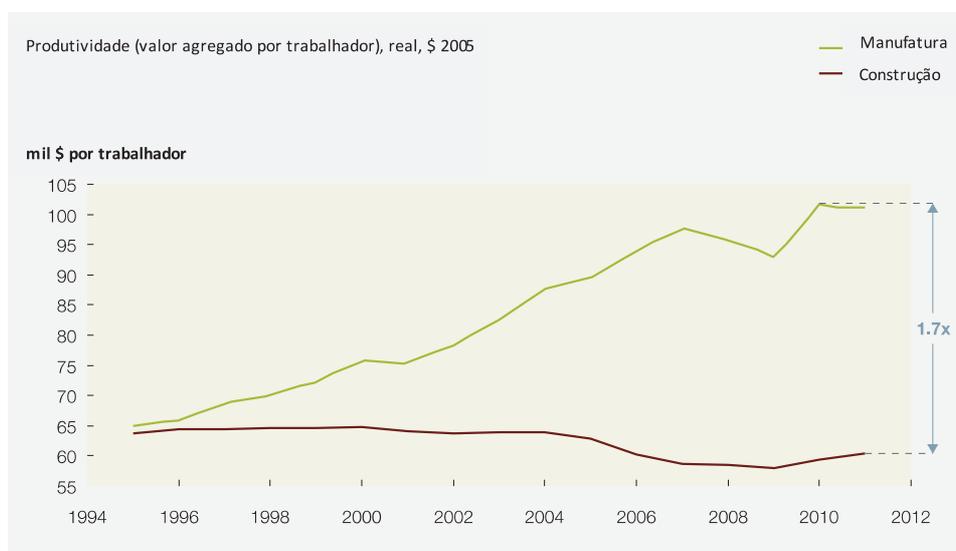


Fonte: IBGE.

Fonte: BNDES, 2011.

Outra característica chave do setor é a criticidade dos índices de produtividade como desafio global para melhorias. A produtividade por trabalhador de construção civil não apresentou melhorias significativas nas últimas décadas, contrapondo avanços significativos em outros setores, como o de manufatura, tal como exemplificado na Figura 2. Atrelado a essa problemática, atrasos de cronogramas e excedentes de custos são comuns em grandes projetos de infraestrutura (Changali *et al.*, 2015).

Figura 2: Índices de produtividade para os setores de manufatura e de construção



Fonte: CHANGALI, et al., 2015.

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 de simulação de eventos discretos, e, por consequente, obtenção de iniciativas de redução de custos nos processos envolvidos. É, então, nesse contexto que esta pesquisa se posiciona como inovação para o setor eólico brasileiro.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta pesquisa tem como objetivo trazer maior viabilidade técnico-financeira ao setor eólico brasileiro através de melhorias operacionais dentro do sistema de obras civis de parques eólicos. Para tanto, definem-se os objetivos específicos da pesquisa:

- Mapeamento da estrutura analítica de projeto (EAP) do sistema, ou seja, de suas etapas (subsistemas);
- Identificação dos principais itens quanto à orçamentação e ao cronograma e, por consequente, definição dos subsistemas críticos e detalhamento deles;
- Visitas em campo para melhor entendimento das operações e também divulgação da importância de iniciativas de otimização para melhor aceitação delas no mercado;
- Modelagem matemática dos subsistemas críticos e elaboração de estratégias específicas para otimização individual deles;
- Balanceamento entre os modelos individuais dos subsistemas para obtenção de estratégias generalistas de otimização global para obras civis de parques eólicos.
- Compilação da convergência de literatura de energia eólica e de engenharia civil, para identificação de oportunidades de melhorias em obras civis de parques eólicos.

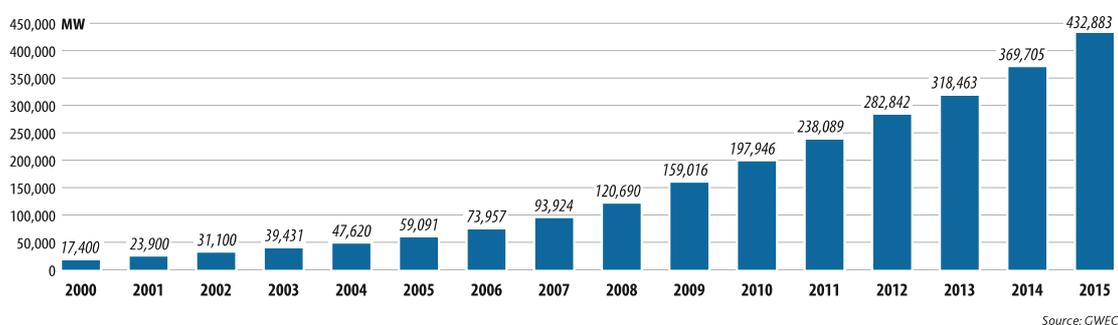
Atingindo-se os objetivos propostos, espera-se que a presente dissertação contribua para a criação de recomendações aplicáveis em campos e que tragam, com sua execução, iniciativas de redução de custos através de otimizações operacionais. Além disso, o presente trabalho se encaixa como um estudo agregador em ambos os tópicos abordados – energia eólica e engenharia civil – trazendo ao corpo técnico envolvido nas obras de parques eólicos conhecimentos específicos referentes a tal modalidade energética. Por fim, graças às interações com equipes de campo – tanto via entrevistas como via coleta de dados – espera-se que o presente estudo sirva como elemento de convergência para que sejam implementadas iniciativas de otimização, tanto as aqui propostas, como aquelas apresentadas na literatura aqui revisada, para avanço produtivo e redução de ociosidades nas obras futuras.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Setor eólico

O setor eólico atingiu maturidade tecnológica no cenário global, o que permitiu sua consolidação como fonte de energia alternativa, principalmente a partir da década de 2000. A Figura 3 apresenta tal evolução. Com foco histórico na Europa e América do Norte, o setor apresentou expansão global, com crescimento absoluto significativo, a partir dos anos 2000, na Ásia, majoritariamente devido à China. A América Latina também apresentou crescimento, embora tardiamente – a partir da década de 2010 – muito devido ao Brasil, foco do presente trabalho. Dados por região são mostrados na Figura 4, com destaque para significativos crescimentos em países emergentes: Ásia em termos absolutos e América Latina em termos relativos (GWEC, 2015).

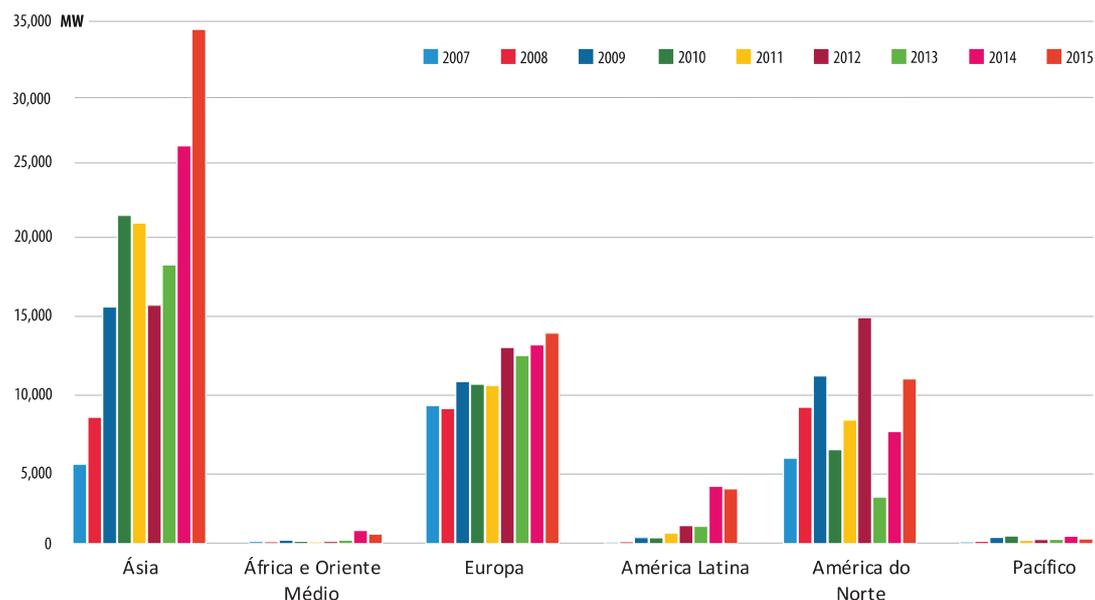
Figura 3: Capacidade instalada acumulada global anual, consolidação do setor: período de 2000 a 2015.



Fonte: GWEC (2015), adaptado.

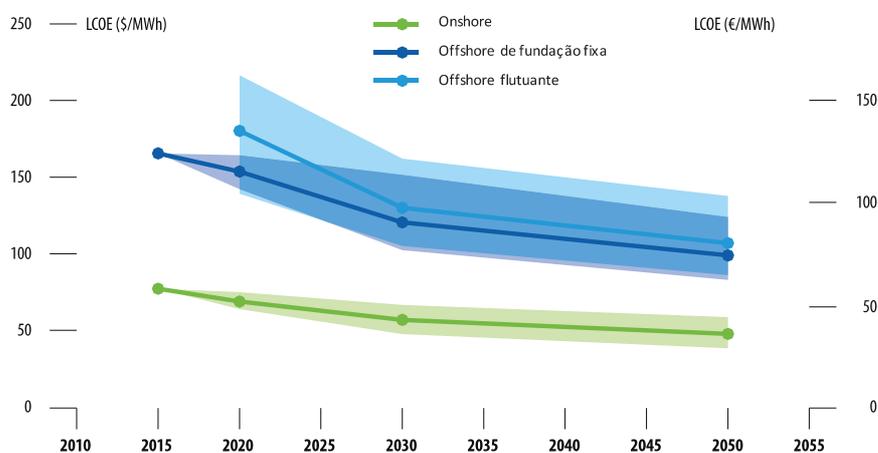
Tal maturidade se traduz em viabilidade financeira, constatada pelo indicador de custo energético, *levelized cost of energy* (LCOE). Há perspectiva de continuidade na redução dos custos da energia eólica, os quais variam consideravelmente de acordo com a tecnologia adotada: *onshore*, *fixed-bottom offshore* e *floating offshore*, como apresentado na Figura 5 (GWEC, 2016).

Figura 4: Capacidade instalada anual nova por região.



Fonte: GWEC, 2015, adaptado.

Figura 5: Previsão de LCOE para o setor eólico, três tipos de tecnologias diferentes (*onshore*, *offshore* de fundação fixa e *offshore* flutuante).



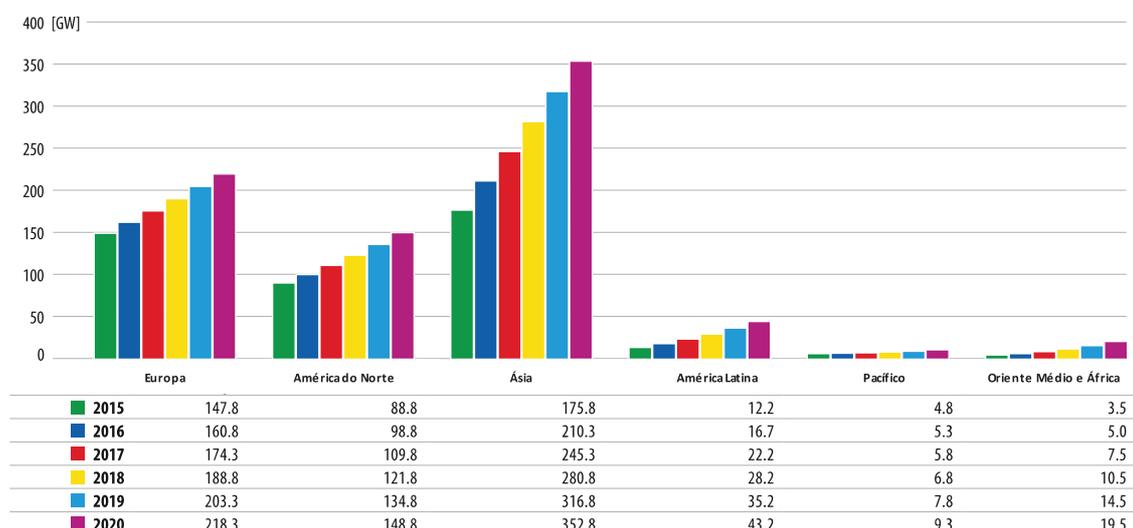
Fonte: GWEC, 2016, adaptado.

Essa continuidade em melhorias de eficiência financeira da modalidade impacta diretamente nas previsões de mercado para o setor, as quais apresentam crescimento para a próxima década, embora diferenciado de acordo com a região. Quanto à capacidade instalada anual nova, Ásia continua na liderança absoluta; América Latina tende a continuar com seu crescimento relativo em índices altos, com uma baixa

temporária no período 2017-2018 atrelada ao cenário macroeconômico brasileiro; e África e Oriente Médio surgem como novos emergentes no setor, como ilustrado na Figura 6. Em termos de crescimento relativo, regiões emergentes têm destaque: expectativa de 557% para África e Oriente Médio e de 354% para América Latina (Tabela 1) (GWEC, 2015).

Como há expectativa de fortalecimento do setor eólico no cenário latino-americano, iniciativas de melhoria de viabilidade técnico-financeira, como o presente trabalho, se colocam dentro de um contexto de concretização dessas previsões. Isso se dá mesmo no cenário brasileiro, o qual passa por um momento de incerteza macroeconômica, mas é historicamente força-motriz do avanço eólico no continente.

Figura 6: Previsão de mercado, por região, 2016-2020.



Fonte: GWEC, 2015, adaptado.

Tabela 1: Crescimento relativo previsto, 2015-2020, por região.

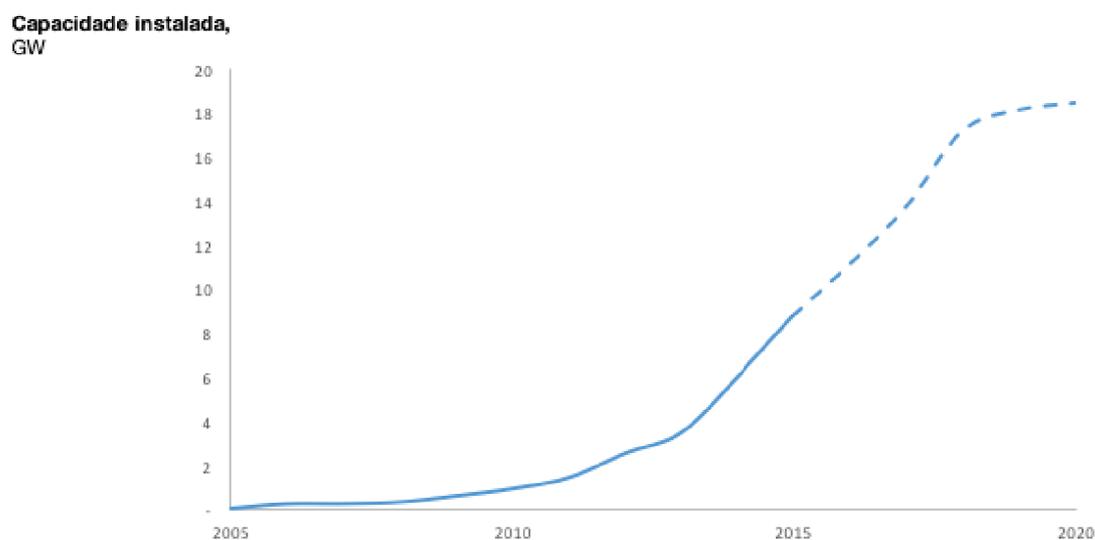
Região	Europa	América do Norte	Ásia	América Latina	Pacífico	África e Oriente Médio
Crescimento (%)	148	168	201	354	194	557

Fonte: Autor, dados GWEC.

Analisando o mercado local, o Brasil apresenta setor eólico com crescimento significativo. Embora indústria relativamente jovem, o aumento na potência instalada

nas últimas décadas permitiu maturação do setor, percebida na forma de instalação e especialização de sua cadeia produtiva. A década dos anos 2010 se mostra como um momento disruptivo para o cenário nacional, apresentado na Figura 7. Dessa forma, a energia eólica passa a ter caráter gradualmente mais representativo dentro da matriz elétrica brasileira, a qual é majoritariamente termo-hídrica. Dados da matriz brasileira são apresentados na Figura 8.

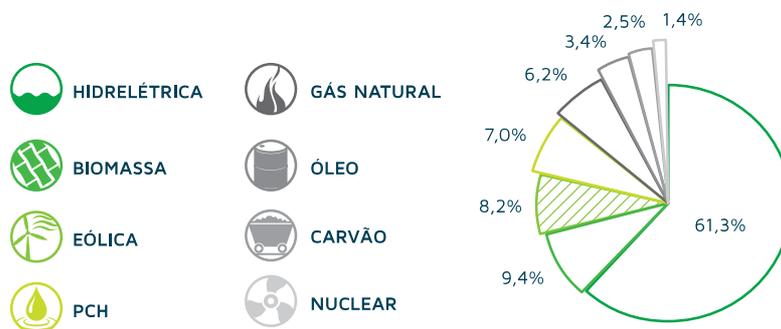
Figura 7: Capacidade instalada de energia eólica no Brasil, série histórica – dados tracejados se referem a parques já contratados, porém não instalados.



Fonte: Autor, dados ANEEL/ABEEÓLICA.

Figura 8: Matriz elétrica brasileira.

Matriz elétrica brasileira



Fonte: ABEEÓLICA, 2015.

Com histórico de fontes nativas e até inovadoras para compor sua matriz energética – por exemplo hidroeletricidade e etanol – o país adotou, graças às secas do início dos anos 2000, políticas de incentivos governamentais para instalar uma matriz eólica em seu território. Destacam-se, historicamente, o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas (PROINFA) e o modelo de leilões de energia, como o Leilão de Energia de Reserva (LER) e o Leilão de Fontes Alternativas (LFA) (IRENA, 2013).

A transição do setor elétrico brasileiro, de um sistema de monopólio estatal para um mercado competitivo ocorreu em meados da década de 1990 (Wanderley et al., 2011). Com tal abertura, o PROINFA permitiu desenvolvimento inicial do setor eólico, o qual se consolidou em seguida através do sistema de leilões. A partir de 2009, o setor atingiu taxas consideravelmente elevadas de crescimento, correlacionadas ao sistema de financiamento e nacionalização do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (UNEP, 2010).

O investimento no setor eólico, na última década, está diretamente correlacionado com os leilões realizados pelo Governo Federal. Destaca-se o período de 2011 a 2015 como um momento crítico, positivamente, para sua maturação econômica, como demonstrado na Figura 9. Entretanto, a não contratação, via leilões, de novos projetos em 2016 sinaliza uma retração quanto à expectativa de crescimento para o setor.

Figura 9: Investimentos no setor eólico brasileiro, em US\$, e representatividade do montante eólico no total investido em energias renováveis.

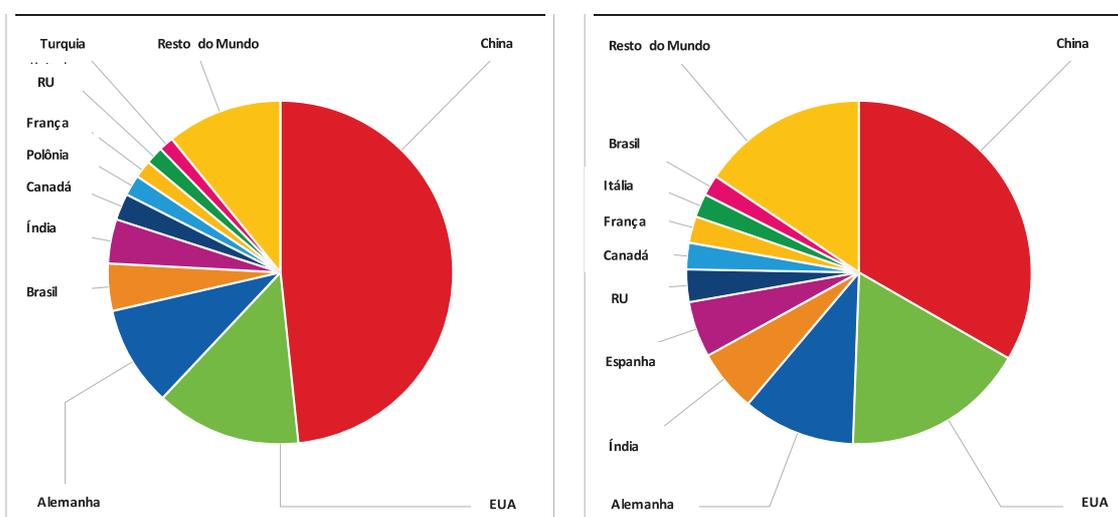


Fonte: Bloomberg New Energy Finance - BNEF/ABEEólica

Fonte: ABEEÓLICA, 2015.

Esses investimentos trazem o Brasil a uma posição de relevância global: enquanto ocupou, ao final de 2015, a décima posição em capacidade instalada acumulada, o país foi o quarto colocado no mundo em termos de capacidade instalada nova. Os dados são apresentados na Figura 10, na qual o Brasil destaca-se em novas instalações. Aliado a questões históricas já delineadas neste trabalho, as características naturais dos ventos brasileiros foram determinantes para que o país passasse a ocupar lugar de destaque no cenário global.

Figura 10: Comparativo de países: capacidade instalada nova referente ao ano de 2015.



Fonte: GWEC, 2015.

O conceito de fator de capacidade é fundamental no entendimento do papel em que os ventos brasileiros desempenharam como atrativos de investimentos para o setor. Fator de capacidade é a razão entre a energia gerada e a capacidade instalada, em medições relativas a um período específico (Pinto, 2013). Assim, o fator de capacidade pode ser escrito como:

$$FC = \frac{EG}{CI} \quad (1)$$

onde FC indica *fator de capacidade* (adimensional, comumente escrito em %), EG a *energia gerada* (comumente em MWh) e CI a *capacidade instalada* (no caso

comumente em MWh, em vez dos usuais MW ou GW, por se tratar de um período na análise).

A região da América do Sul é privilegiada em termos de aproveitamento, quanto ao fator de capacidade, de seus ventos. Dentro de um panorama regional comparativo, ela apresenta-se na segunda posição dentro de um total de doze regiões, com uma média ponderada de fator de capacidade de 42,6%, como apresentado na Tabela 2 (REN21, 2016). O Brasil, especificamente, apresentou uma média ponderada de 38,1% no ano de 2015 (ou 39,9% considerando apenas parques participantes de leilões), com picos da ordem de 52% (ABEEólica, 2015). Ainda na Tabela 2, pode-se ranquear, na média ponderada dos valores de FC, as principais regiões de melhor desempenho: América Central e Caribe em primeiro, América do Sul em segundo e Oriente Médio em terceiro.

A sazonalidade tem influência direta nos fatores de capacidade. No Brasil, é comum picos nos meses de agosto, setembro e outubro e de vales nos meses de fevereiro, março e abril. A Figura 11 ilustra tal sazonalidade.

Tabela 2: Fatores de capacidade, por região do globo: América do Sul destacada.

Região	FC - mínimo	FC - máximo	FC – média ponderada
África	0,214	0,456	0,346
Ásia	0,172	0,435	0,243
América Central e Caribe	0,296	0,520	0,434
Eurásia	0,272	0,350	0,344
Europa	0,139	0,412	0,277
Oriente Médio	0,313	0,390	0,372
América do Norte	0,166	0,516	0,352
Pacífico	0,275	0,436	0,337
América do Sul	0,257	0,534	0,426
China	0,221	0,360	0,242
Índia	0,172	0,258	0,234
Estados Unidos	0,166	0,608	0,358

Fonte: REN21, 2016.

Figura 11: Fatores de capacidade no Brasil em 2015.

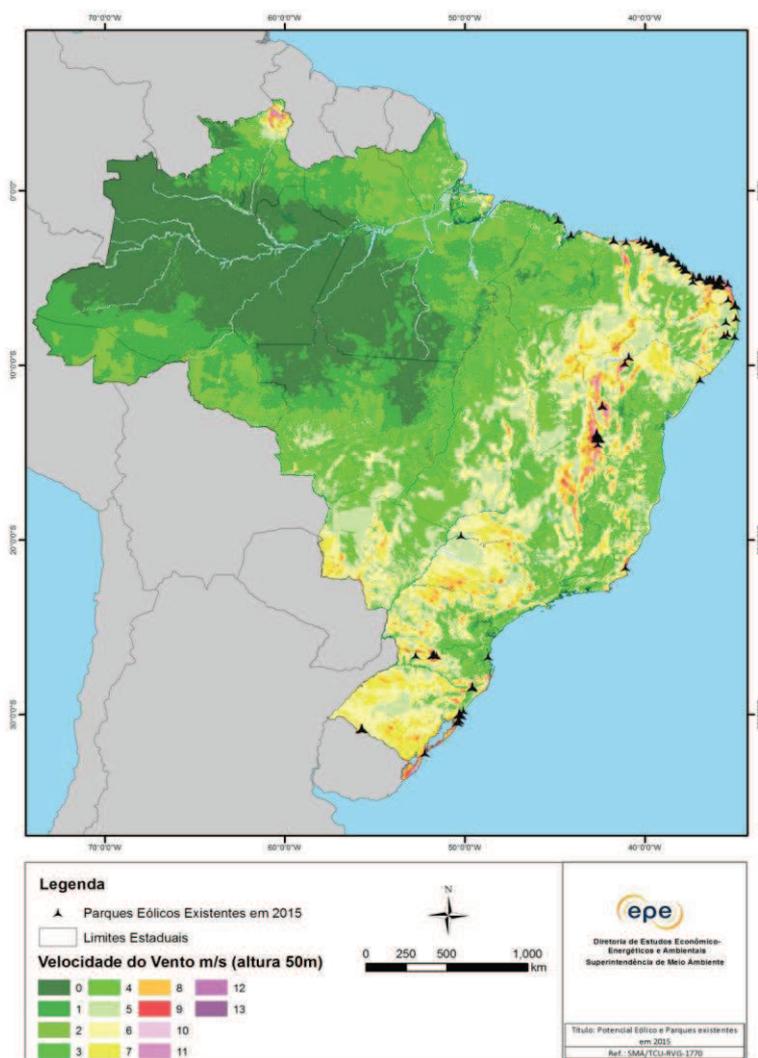


Fonte: ABEEÓLICA, 2015.

Além da sazonalidade, variação temporal, os ventos brasileiros apresentam considerável variação geográfica, por exemplo: relevo, altitude, vegetação, tipo de solo. Tal característica está atrelada à grande extensão territorial do país. Dessa forma, são instalados parques eólicos em cenários diversos, como sertão semiárido, planícies subtropicais, serras e litoral.

A análise de potencial eólico é feita através da elaboração de um atlas eólico. Tal atlas indica, para diferentes alturas estudadas, as características dos ventos – como velocidades – para determinação do potencial energético e embasamento estratégico para alocação de parques (Pinto, 2013). A Figura 12 mostra o atlas eólico brasileiro.

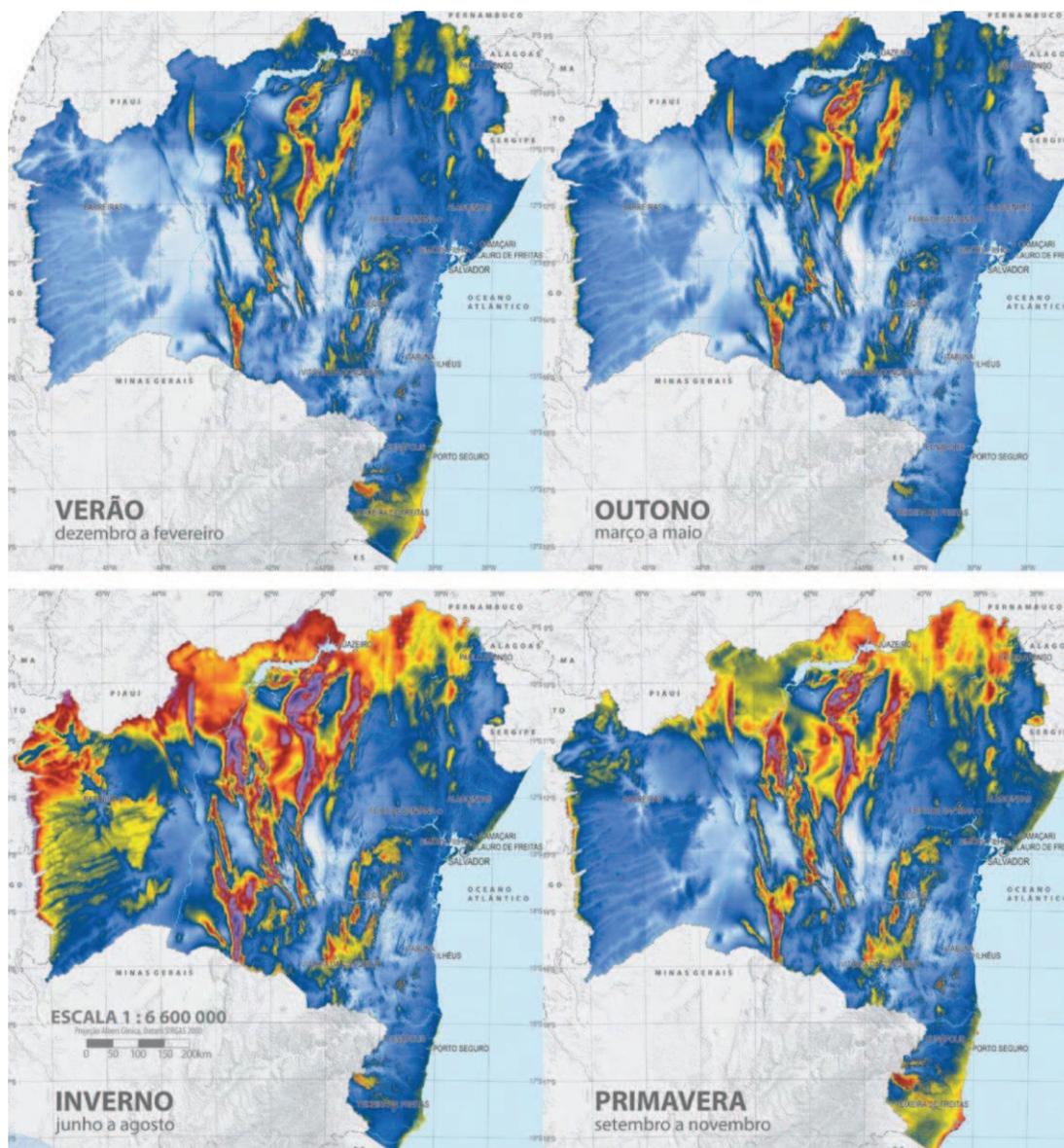
Figura 12: Potencial eólico brasileiro a 50m de altura e distribuição dos parques eólicos em operação no Brasil.



Fonte: AMARANTE, 2001 e ANEEL, 2015 *apud* EPE, 2016.

Atualizações dos atlas são continuamente feitas, com o objetivo de elevação das alturas analisadas, para adaptação do documento a novas tecnologias. Um exemplo é o atlas eólico do estado da Bahia, apresentado nas Figuras 13 e 14. Ele foi desenvolvido em parceria entre o governo e a iniciativa privada, incluindo concessionárias e empresas de capital público. A análise de potencial é feita de maneira interdisciplinar, incluindo estudos de climatologia, de ecologia, e de infraestrutura de transportes (Camargo-Schubert Engenharia, 2013).

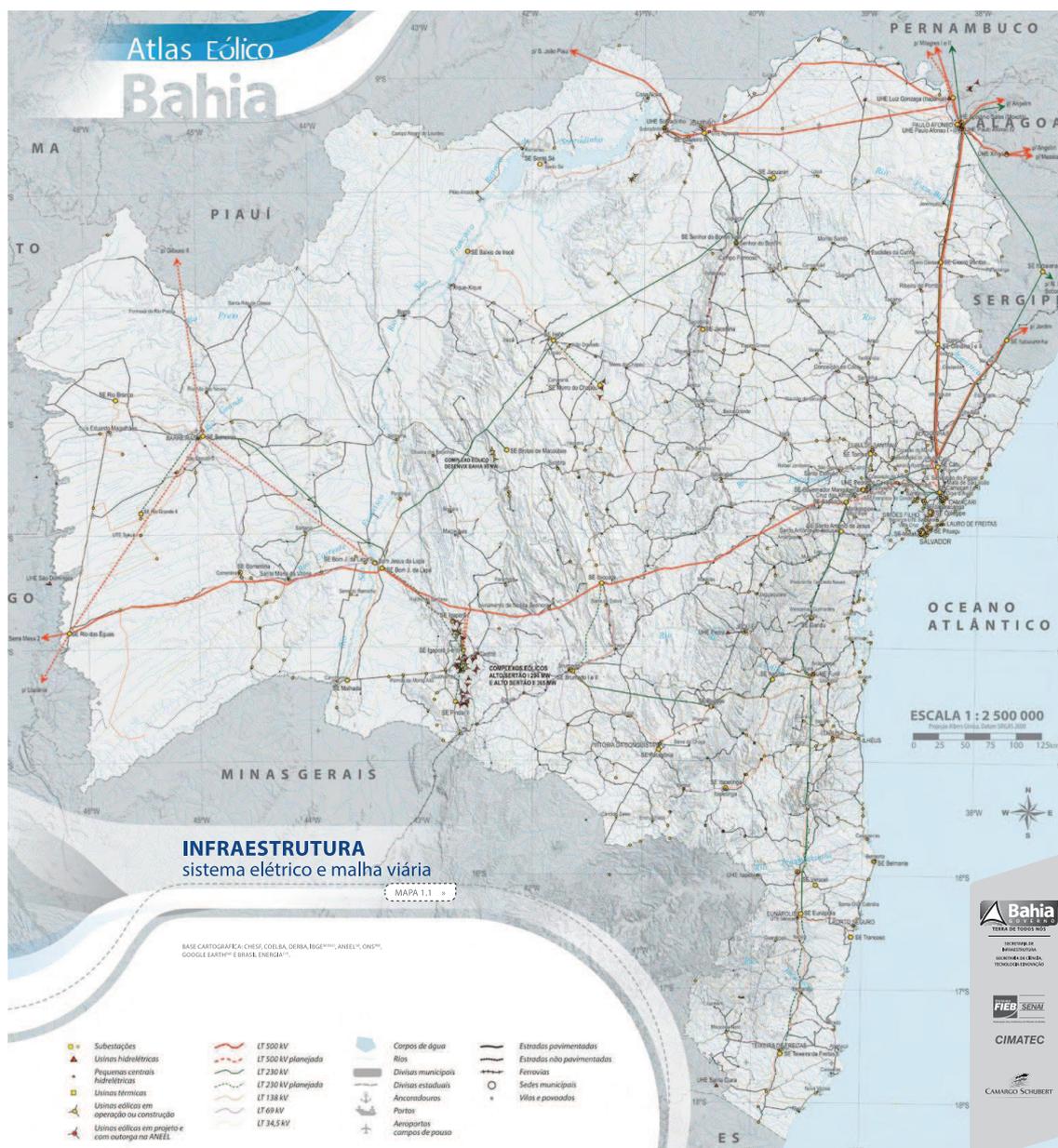
Figura 13: Potencial eólico sazonal a 100m de altura, estado da Bahia.



Fonte: CAMARGO-SCHUBERT ENGENHARIA, 2013.

Na Figura 13, observa-se uma variação sazonal do potencial eólico, à medida que mudam-se as estações do ano. Nela, áreas em tons de azul apresentam menores potenciais e áreas em tons de vermelho apresentam maiores potenciais. O objetivo dos mapas apresentados é uma análise comparativa em duas frentes: geográfica (destaque às regiões serranas do interior baiano) e temporal (destaque para os ventos de inverno).

Figura 14: Infraestrutura: sistema elétrico e malha viária, estado da Bahia.



Fonte: CAMARGO-SCHUBERT ENGENHARIA, 2013.

Na Figura 14, detalha-se a infraestrutura do estado da Bahia, mapa o qual, se associado aos mapas da Figura 13, auxilia consideravelmente os agentes públicos e privados no processo decisório de investimento em novos projetos eólicos. Por exemplo, o interior norte baiano, de alto potencial eólico, apresenta um gargalo de infraestrutura de transporte, o que pode afetar a viabilidade financeira de alguns projetos em tal região.

A importância de uma análise aprofundada na questão de infraestrutura de transportes está diretamente correlacionada com os comuns gargalos logísticos

enfrentados na instalação de parques eólicos. Como muitas localidades ótimas em termos de potencial eólico ficam em regiões isoladas do país, comumente o interior do Nordeste, dificuldades de acesso – tanto de insumos como de pessoal – têm peso na análise de viabilidade para implantação dos projetos. Um exemplo de medida de endereçamento de tal questão se dá em estudos específicos das vias vicinais de acesso às principais áreas potenciais de implantação de parques eólicos.

3.2. Planejamento e orçamentação de obras

Devido ao foco do presente trabalho se tratar de otimizações aplicadas a obras civis de parques eólicos, conceitos de planejamento e orçamentação de obras funcionam como fundamentação primária para atingimento dos objetivos esperados na pesquisa. São apresentados fundamentos específicos de planejamento e orçamentação em obras de infraestrutura, com foco em *time and cost overruns* (problemática dos atrasos de cronograma e dos excedentes de custos) e em *location based planning* (planejamento baseado em localização).

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 macroprojetos, 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. Primeiramente, entendeu-se que ambos os problemas (de cronograma e de custos) devem ser analisados concomitantemente, visto sua relação intrínseca. Dessa forma, modelos que o fazem se mostram como mais robustos que aqueles que contém apenas análises desagregadas. Isso ocorre devido à criação de viés na ferramenta matemática utilizada: mínimos quadrados ordinários (ou OLS, do inglês *ordinary least squares*). Entre as variáveis estatisticamente significantes estão: duração planejada, tamanho do projeto, tipo de obra, clima e nível de competição.

Para mitigar tal problemática, diferentes técnicas de planejamento e orçamentação de obras são delineadas. Oliveri, Granja e Picchi (2016) mostraram que

três estratégias principais são comumente utilizadas em projetos de infraestrutura: planejamento tradicional, *location-based management system* e *last planner system*.

Ainda segundo esses autores, tem-se que planejamento tradicional, assim denominado pela sua vasta aplicação em projetos de construção, baseia-se no conceito de que cada atividade pode ser descrita como um pacote independente e que a relação entre atividades se dá através de restrições temporais. Um exemplo de ferramenta que se enquadra nessa abordagem é o método do caminho crítico (CPM, do inglês *critical path method*). Nele, otimizam-se as durações dos projetos, visto que sua metodologia minimiza o tempo inativo entre atividades. Embora amplamente utilizado, há, na literatura, críticas severas à aplicação de CPM em projetos de infraestrutura, devido ao fato do método em questão não levar em consideração restrições de recursos e, assim, não trazer otimizações financeiras diretas.

Devido a isso, uma abordagem diferente de planejamento e controle, denominada *location-based management system* (LBMS) passou a historicamente ter maior utilização em projetos complexos. Sua diferença com relação ao planejamento tradicional inicia-se na sua conceituação: em vez de baseada em atividades, tal metodologia é baseada em localização. A fundamentação teórica e também histórica do LBMS é amplamente discutida por Kenley e Seppänen (2010).

Esses autores apresentam a motivação em se introduzir um sistema mais amplo de planejamento – um que incluísse controle dentro de sua sistemática – e que considerasse a localidade como item focal de análise, em vez de atividades subdivididas em pacotes. Com isso, permite-se inclusão das restrições de recursos – mão de obra, equipamentos e insumos principalmente – e de geografias nas análises de otimização nos planejamentos.

Outro exemplo de sistema de planejamento de obras é o *last planner system* (LPS), o qual, assim como o CPM, é um método baseado em atividades. Sua principal contribuição à literatura e aos projetos de sua aplicação se dá na sua segmentação em diferentes focos de análise. Dessa forma, o LPS aborda planejamento de projetos desde seu nível mais estratégico – denominado *masterplan* – ao seu nível mais tático – denominado planejamento de curto prazo, sendo que variações quanto ao prazo ocorrem de acordo com o tipo de projeto trabalhado. Para conectar ambos níveis, o sistema inclui outros intermediários, como o planejamento faseado, os quais endereçam incertezas inerentes das execuções das atividades. (Kim e Ballard, 2010)

Como obras civis de parques eólicos são caracterizadas como projetos de considerável complexidade, de cronogramas longos – da ordem de meses – de alta diversidade de recursos e de repetições nas atividades baseadas em localidades – usualmente estacas nas obras de acessos e bases nas obras de fundações – o presente trabalho utiliza-se como meio de estudos de otimização de planejamento a metodologia LBMS, em particular linhas de balanço.

Büchmann-Slorup, Niclas e Lars (2012) apresentaram uma análise de criticidade em metodologias baseadas em localidades. A principal questão dentro de tal análise é a falta de melhoria nos índices de produtividade, a qual é enfrentada pelo setor de construção civil. Fatores endereçados são, por exemplo, o retrabalho e ociosidades das equipes, os quais podem ser minimizados através da sistemática baseada em localidades. O princípio da criticidade é definido por quatro fundamentos, segundo Büchmann-Slorup, Niclas e Lars (2012, p. VII, tradução nossa):

Atividades no caminho mais longo ou em caminhos nos quais a rede de dependência do projeto apresenta flutuação zero são críticas.

Atividades são críticas se elas estão alocadas em uma localidade que impõe atrasos em atividades no caminho mais longo ou em caminhos nos quais a rede de dependência do projeto apresenta flutuação zero.

Atividades que causam discontinuidades em atividades no caminho mais longo ou em caminhos nos quais a rede de dependência do projeto apresenta flutuação zero são críticas.

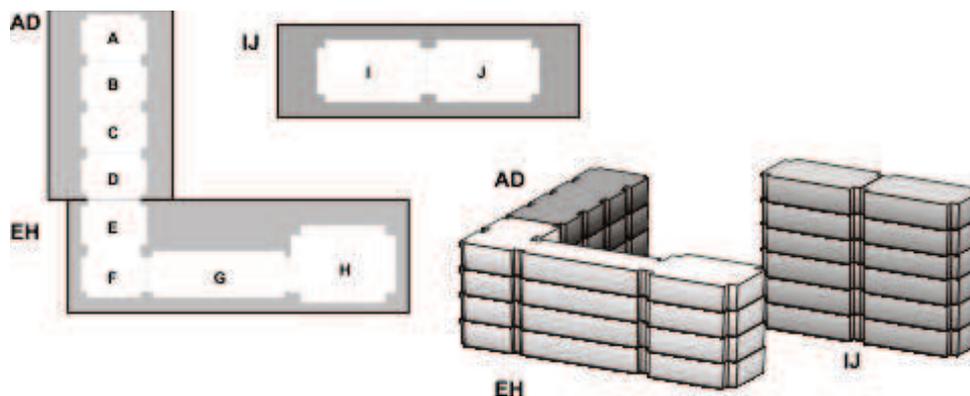
A atividade mais crítica é aquela que apresenta menor taxa de produção no caminho mais longo ou em caminhos nos quais a rede de dependência do projeto apresenta flutuação zero.

Ainda segundo esses autores, a identificação de criticidades dentro de um planejamento de projeto se mostra fundamental, pois, ao se combinar tal princípio com a metodologia baseada em localidade, obtém-se mais atividades críticas, priorizam-se tais atividades com mais facilidade, previnem-se com mais segurança taxas de lentidão maior do que as esperadas, reduzem-se flexibilidades sequenciais de trabalhos das equipes de mão de obra e aumentam-se as sensibilidades das taxas de produção com relação a flutuações e distúrbios inesperados.

A repetição observada em obras civis de parques eólicos, como descrito neste trabalho em termos de estacas e bases, permite aplicação da metodologia LBMS

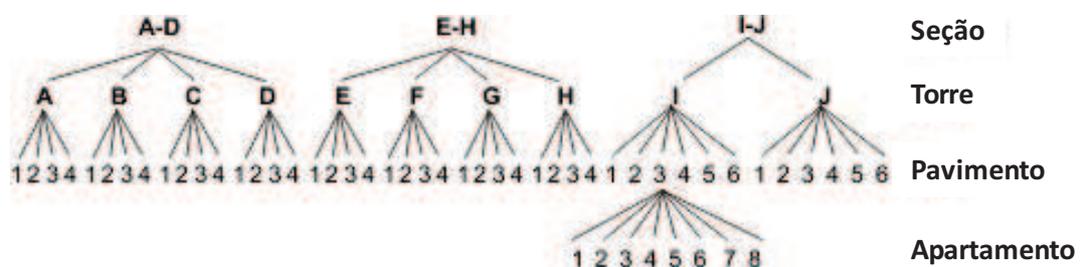
(adaptação do presente trabalho com inclusão da parte referente ao controle, em inglês, *management*) de maneira análoga à apresentada por Kenley e Seppänen (2009) para edificações. A ilustração desses conceitos ocorre nas Figuras 15 e 16. No exemplo apresentado, cria-se uma árvore de localidades e atividades correlatas, para melhor controle tanto durante as fases de planejamento como de execução. Ressalta-se uma diferença quanto à utilização desse paralelo: no caso de obras *horizontais*, como as abordadas no presente trabalho, há maior flexibilidade sequencial das localidades – embora não das atividades – visto que particularidades restritivas (por exemplo falta de licenciamento ambiental em uma base específica) não limitam a continuidade das atividades em outras localidades, criando descontinuidades apenas geográficas, e não temporais, no projeto.

Figura 15: Exemplo de *layout* de projeto para aplicação de uma LBMS.



Fonte: Kenley e Seppänen, 2009.

Figura 16: Árvore de localidades para o exemplo de projeto de edificação apresentado.



Fonte: Kenley e Seppänen, 2009, adaptado.

3.3. Simulação de eventos discretos

Como as operações no setor de construção civil são majoritariamente discretas, ou seja, podem ser subdivididas em unidades de trabalho, suas modelagens usualmente seguem esse paradigma. Assim como comumente encontrado na literatura, o presente trabalho utiliza-se de uma abordagem de análise discreta, e não contínua, nas análises de otimização para as operações estudadas.

Para tanto, inicialmente é apresentada uma conceituação geral de teoria de filas. Segundo Sztrik (2012), um sistema de filas é aquele que apresenta propriedades probabilísticas quanto ao fluxo de entrada e ao de serviço. Através de tais propriedades, caracteriza-se o seu tipo. Exemplos de classificações são FIFO (primeiro a chegar, primeiro a sair, do inglês *first in first out*), LIFO (último a chegar, primeiro a sair, do inglês *last in first out*), RS (serviço aleatório, do inglês *random service*) e P (serviço através de prioridades, do inglês *priority*).

O autor ainda apresenta os conceitos de convergência e de divergência em sistemas de filas. Tais conceitos se baseiam na intensidade de tráfego, definida por:

$$\rho = \frac{\text{tempo médio de serviço}}{\text{tempo médio de entrada}} = \frac{1/\mu}{1/\lambda} = \frac{\lambda}{\mu} \quad (2)$$

onde ρ indica intensidade de tráfego, μ indica taxa de serviço por unidade de tempo e λ indica taxa de entrada por unidade de tempo. Através do valor de ρ identifica-se o tipo de convergência esperado para o estado do sistema: convergente se ρ menor que 1, constante se ρ igual a 1 e divergente se ρ maior que 1.

Harris e Ioannou (1998) apresentaram o conceito de método de programação repetitiva (RSM, do inglês *repetitive scheduling method*). Embora associado diretamente a metodologias de planejamento e orçamentação de obras, conforme já apresentado no presente trabalho, tal conceito tem vasta aplicação em simulações de eventos discretos, principalmente por trabalhar a repetição de entradas nos sistemas e, conseqüentemente, de operações, tanto em si como entre si. Sua forma de mensuração, de unidades completadas, permite flexibilidade a planejamentos que trabalham com repetição de atividades, desde que elas sejam arranjadas de acordo com uma sequência lógica pré-estabelecida.

Críticas a tal metodologia se baseiam no fato de que RSM é um método gráfico que se utiliza de geometria clássica para analisar programações repetitivas. Embora de fácil compreensão, principalmente visual, tal abordagem tem limitações nos casos de alta complexidade dos pontos de controle, onde haja consideráveis incertezas de execução, interferências entre atividades críticas e dinamicidade das criticidades de projeto. A literatura apresenta outros modelos, de menor abrangência, para endereçar tais questões, como o método de programação de produtividade (PSM, do inglês *productivity scheduling method*), o qual altera a ferramenta matemática, da geometria analítica para o cálculo básico, com maior foco em índices de produtividade. (Lucko, 2008)

Outros métodos, tanto analíticos como estocásticos, são largamente abordados na literatura de simulação de eventos discretos, porém, por fugir do escopo do presente trabalho, não são aqui apresentados. Como exemplos de outros métodos, tem-se PERT (do inglês *program evaluation and review technique*), redes de Petri e redes neurais.

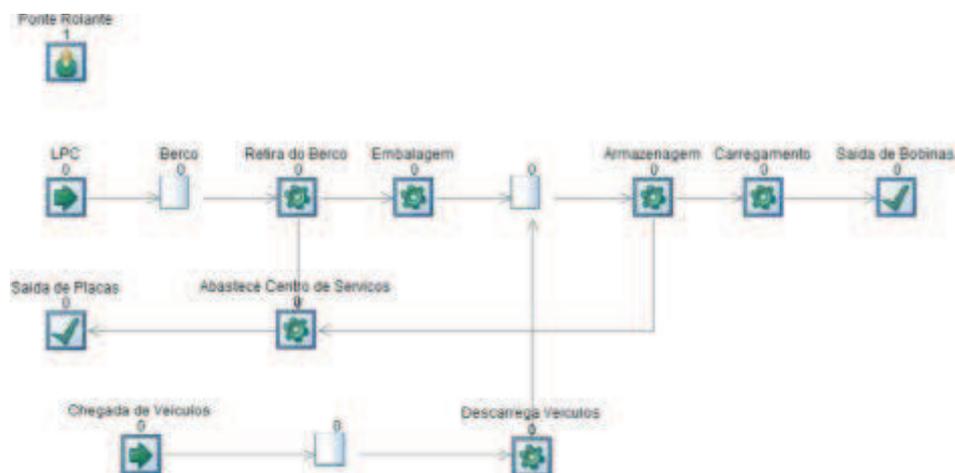
A utilização de simulação computacional na criação de modelos de análise de operações no setor de construção civil tem como principal vantagem a baixa necessidade de recursos para que se analisem diversas possibilidades de dimensionamentos e operações, o que seria altamente demandante caso testado puramente de forma empírica. A mitigação de riscos operacionais para fundamentação da análise decisória através de simulação computacional também pesa na utilização de tal metodologia como recomendada para modelagem e otimização, como visto no presente trabalho.

Chwif et al (2012) apresentaram uma introdução à simulação de eventos discretos, através do *software SIMUL8*, exemplificada na Figura 17. Nesta figura é apresentado um modelo industrial, apenas para fins didáticos de familiarização com o *software*. Tal plataforma, criada na Universidade de Strathclyde, Glasgow, Escócia, foi escolhida como ferramenta de simulação de eventos discretos utilizada no presente trabalho, visto sua flexibilidade, acessibilidade e capacidade de trabalho para as modelagens propostas. Maiores detalhes quanto ao *software* são apresentados no item 4. *Metodologia*.

Ainda segundo esses autores, a abordagem via simulação permite introdução de análise de filas, introdução de curvas de probabilidade para as produtividades das atividades, criação de um fluxograma de atividades em série e em paralelo,

requerimento e compartilhamento de recursos para ocorrência delas, e relatórios de pós-processamento que permitem, com significância estatística, identificação de gargalos operacionais.

Figura 17: Exemplo de modelo de simulação de eventos discretos em *SIMUL8*.



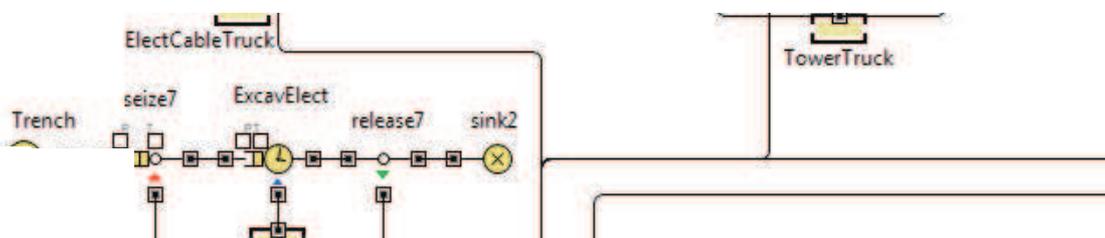
Fonte: Chwif et al., 2012.

Para o setor de construção, a literatura apresenta diversos exemplos de modelagens de operações através de simulação de eventos discretos. Smith et al. (1995), por exemplo, apresentaram aplicação para sistemas de terraplenagem, os quais apresentam filas prévias às etapas de manobra e carregamento.

Para o caso específico de implantação de parques eólicos, Zankoul e Khoury (2014) mostraram uma modelagem feita na plataforma *AnyLogic*. O modelo, de maior complexidade, simula diversas etapas – paralelas e sequencias – da construção de um parque eólico, da equipe de sondagens, à montagem das torres, incluindo as obras civis. A Figura 18 mostra tal modelo. Tal trabalho permite identificação de gargalos quanto aos recursos utilizados, com o objetivo de otimização no balanceamento de máquinas e equipes. De maneira similar, mas aplicado à realidade local do Nordeste brasileiro, Fernandes (2015) apresentou um modelo, na plataforma *SIMUL8*, para avaliação de desempenho na construção de um parque eólico localizado no litoral cearense. A abordagem do presente é mais minuciosa no sentido de especificar os detalhes das atividades críticas selecionadas, de acordo com cada tipo de solução matemática. No caso de simulação de eventos discretos, o presente trabalho é mais específico por utilizar tal solução apenas na modelagem de operações de pavimentação, e não na

modelagem do parque eólico como um todo, como apresentado nos trabalhos aqui estudados.

Figura 18: Exemplo de modelo de simulação aplicado à implantação de parques eólicos: etapa de fundações.



Fonte: Zankoul e Khoury, 2014, adaptado.

3.4. Teoria de grafos

A importância do entendimento prévio de teoria de grafos no presente trabalho se dá através da capacidade de tal ferramenta em traduzir a realidade do *layout* de parques eólicos em um modelo matemática e claramente definido. Isso também se dá associado à aplicação de conceitos básicos de pesquisa operacional, como o atingimento de máximos e mínimos de funções objetivo específicas das modelagens. Considera-se, então, que a teoria de grafos, e seus algoritmos associados, mostra-se como a melhor abordagem para tal tradução de um *layout* eólico em um modelo confiável.

Grafo é um conjunto de pares (N, A) onde N representa os nós (também chamados vértices) e A representa os arcos. Um arco xy representa uma ligação entre os nós x e y . Se xy é um arco de um grafo, então os vértices x e y são classificados como adjacentes entre si e incidentes com o arco xy , enquanto que arcos são adjacentes entre si se possuem um nó em comum. Arcos são considerados como ponderados no caso de haver um coeficiente – uma grandeza numérica – que seja associado a cada arco, de modo a agregar um peso a eles (Ballobás, 1998).

Várias formas podem ser utilizadas para representação de grafos, e.g.: vetores para os conjuntos de vértices e arcos; matrizes representando adjacências e incidências; e programação computacional, incluindo, por exemplo, linear e orientada a objetos (Biggs, 2001).

A vantagem da aplicação de grafos na modelagem de layouts se dá através da associação de nós a pontos de interesse (como cruzamentos entre acessos, plataformas de torres eólicas, entrada do parque) e de arcos com acessos rodoviários. Nota-se que ambos os pontos focais de obras civis de parques eólicos – acessos e fundações – podem ser traduzidos em grafos.

Diversos algoritmos consagrados na literatura abordam problemas clássicos da teoria de grafos (Golumbic, 2004). Entre eles, destacam-se neste trabalho: o problema de menor caminho (associado ao algoritmo de Dijkstra), caixeiro viajante e carteiro chinês.

Segundo Goodrich e Tamassia (2014), o problema de menor caminho, dado por uma única origem, depende, inicialmente, da definição do caminho (P) entre dois vértices, definição essa dada por:

$$w(P) = \sum_{i=0}^{k-1} w(e_i) \quad (3)$$

onde e_i representa os arcos do caminho P e w representa o peso (ou distância) associado a cada vértice. Uma maneira de solucionar o problema de minimização de caminho é a aplicação do algoritmo de Dijkstra, o qual é a utilização de um algoritmo do tipo *greedy* (guloso ou míope nas traduções mais consagradas), via método de origem única, para o problema de menor caminho. Ainda segundo os mesmos autores, o algoritmo, em linguagem de alto nível, pode ser representado por:

input grafo G não direcional, ponderado, com arcos não negativos

output uma classificação $D[u]$ para cada vértice u na qual são mostradas as distâncias entre o vértice v e o vértice u em G

$D[v] \rightarrow 0$

para cada vértice $u \neq v$ de G , **fazer**

$D[u] \rightarrow +\infty$

Fila de prioridades Q contém todos os vértices de G que usam rótulos de D como chave

Enquanto Q vazio, **fazer**

Puxar novo vértice u do total

$u \rightarrow Q.removeMin()$

para cada vértice z adjacente a u tal que z esteja em Q , **fazer**

Relaxar arco (u,z)

Se $D[u] + w((u,z)) < D[z]$, então

$$D[z] \leftarrow D[u] + w((u,z))$$

Mudar para $D[z]$ a chave do vértice z em Q

Retornar $D[u]$.

Fonte: Goodrich e Tamassia (2014).

O problema do caixeiro viajante é definido como o problema de menor caminho em um grafo G desde que sejam visitados todos os nós, partindo-se e retornando-se de um mesmo nó, o qual é chamado de origem. Ele é um problema representativo de uma classe de problemas de otimização combinatória. Diversos algoritmos já foram elaborados para sua resolução, incluindo métodos heurísticos. Para obtenção de melhor tempo de solução, assim como para o algoritmo de Dijkstra, uma redução no número total de nós trabalhados é interessante e recomendada (Hoffman, Padberg e Rinaldi, 2016).

Davendra (2010) apresenta um exemplo para a formulação de tal problema:

$$MIN \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \tag{4}$$

sujeito a

$$\sum_i x_{ij} = 1, \forall j \tag{5}$$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \forall i \tag{6}$$

O último problema abordado na literatura revisada neste trabalho é o do carteiro chinês, o qual é um problema de caminho mínimo no qual devem ser percorridos todos os arcos do grafo G. Ele pode ser entendido como uma aplicação do conceito de caminho euleriano. Tal problema tem diversas subdivisões, como: direcionado, não direcionado, misto, entre outros (Farahani e Miandoabchi, 2013).

Diversos algoritmos já foram desenvolvidos para a resolução de tal problema, cada um com um foco específico de formulação e de particularidade (Eiselt, Gendreau e Laporte, 1995).

3.5. Operações de obras civis

Dado o histórico baixo índice de produtividade enfrentado pelo setor de construção civil, a literatura endereça tal questão através de estudos na área de operações de obras civis e técnicas de planejamento e, principalmente, controle delas para que se obtenham menores índices de ociosidades. Dada a vastidão dessa área do conhecimento, a presente revisão se limita a análises de esferas específicas da engenharia civil e de importância chave para obras civis de parques eólicos: terraplenagem e pavimentação; fundações e concretagem; controle e manutenção de equipamentos pesados; e avaliação de produtividade de mão de obra.

Halpin e Riggs (1992) introduziram o conceito de otimização através de análise e planejamento de operações na construção civil, com inclusão de modelos para diversas etapas, de diferentes tipos de obras. Por combinar conceitos de planejamento baseado em localidades, teoria de filas, simulação e modelagens específicas (por exemplo para construções habitacionais e pesadas), tal trabalho serve como base para diversos estudos posteriores na seara de otimizações aplicadas a obras.

Quanto à 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.

Órgãos governamentais também apresentam estudos e bancos de dados largamente utilizados em obras de terraplenagem. Deles, destacam-se os sistemas SICRO/SICRO2 e manuais de custos do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de

Transportes (DNIT). Para esta dissertação, são especialmente relevantes os volumes 1 e 4, tomo 1. (DNIT, 2003)

A problemática da concretagem em obras de fundações de parques eólicos se divide em duas áreas principais: qualidade e transporte. A primeira, por se tratar de ciência dos materiais – traço, definição de aditivos e de controle de resistência através de ensaios normatizados – e, assim, fugir do escopo da presente dissertação, não é aprofundada. O foco deste trabalho, quanto às operações de concretagem, é 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 se tratarem de operações intensivas – principalmente em termos de volumes deslocados – as atividades estudadas na implantação de um parque eólico, majoritariamente, dependem de uma frota de equipamentos pesados para serem executadas. Exemplos de máquinas comumente utilizadas são: trator de esteiras, escavadeira hidráulica, escavadeira com rompedor hidráulico, moto niveladora, bomba-lançadora de concreto, perfuratriz, caminhão basculante, caminhão pipa, caminhão betoneira, caminhão melosa, caminhão *munck*, guindaste, rolo compactador, rolo vibratório, pá carregadeira, retroescavadeira e trator de pneus com grade.

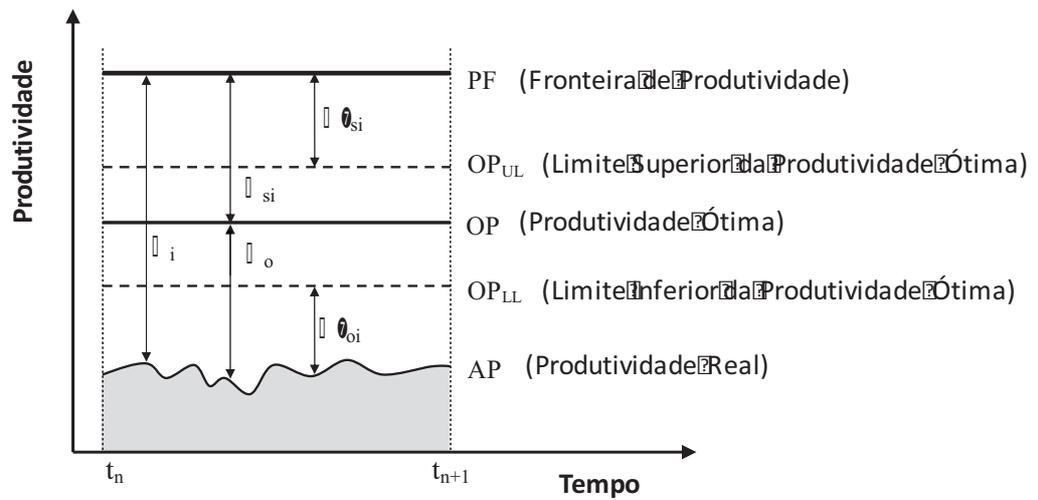
Pela alta diversidade de máquinas utilizadas, aliada aos comuns números consideráveis de unidades de tipos específicos, a gestão da manutenção de equipamentos é uma área especialmente relevante na boa execução de operações de obras civis de parques eólicos. A literatura de tal área, comumente associada a trabalhos

de engenharia mecânica, aborda os princípios definidos para a gestão de ativos (ISO 55000, 2014), comumente através de modelos específicos.

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.

Por fim, quanto à otimização de equipes de mão de obra e melhoria de produtividade destas no setor de construção, Kisi (2015) apresentou tanto uma revisão como técnicas específicas de estimativas de produtividades ótimas. São definidos os conceitos de produtividade ótima, fronteira de produtividade (cenário ideal sem perturbações no sistema) e produtividade real e do significado das diferenças entre tais valores, ilustrado na Figura 19. O autor argumenta que são necessárias duas abordagens na definição de produtividade ótima. Primeiramente, uma *top-down*, na qual se definem a fronteira de produtividade e o limite superior da ótima, através de entrevistas com especialistas e da técnica de *qualitative factor model*. Por fim, uma *bottom-up*, na qual se definem a produtividade real e o limite inferior da ótima, através de observações em campo e de simulações de eventos discretos. A convergência de metodologias recomendadas pelo autor com os assuntos abordados neste trabalho permite a criação de modelos específicos com fundamentação teórica já validada pela literatura.

Figura 19: Níveis de produtividade de mão de obra em operações de construção.



Fonte: Kisi, 2015, adaptado.

Percebe-se, então, que a multidisciplinaridade inerente a projetos de instalação de parques eólicos deve fundamentar as ações do presente trabalho, principalmente aquelas de campo. Dessa forma, a presente revisão da literatura traz insumos teóricos, além de metodologias práticas, que auxiliam o desenvolvimento deste trabalho, tanto na formatação da coleta de dados, como na análise crítica dos resultados obtidos.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho é dividido, para que se atinjam os objetivos esperados, em dois focos: estratégico e tático. Tal divisão tem o intuito de criação de diferentes abordagens científicas para resolução dos problemas enfrentados pelos agentes decisórios no setor de obras civis de parques eólicos.

O foco estratégico aborda o sistema a partir de uma visão global e generalista da obra, sendo assim atrelado às áreas de planejamento e orçamentação de obras. São avaliadas todas as etapas da EAP da obra de maneira interligada, objetivando-se um entendimento dos impactos, quando existentes, de uma atividade nas outras, tanto consecutivas como paralelas. A partir de tal entendimento, determinam-se metodologias específicas de otimização, de acordo com a literatura da área e aplicação nos casos estudados no presente trabalho.

O foco tático aborda os subsistemas de uma obra civil de parque eólico a partir de uma visão específica das atividades críticas. Dessa forma, ele é atrelado à área de operações e logística. As etapas da EAP são abordadas individualmente, buscando-se um entendimento dos seus detalhes e das variáveis que impactam nas suas produtividades. A partir de tal entendimento, determinam-se modelos específicos para traduzir os problemas reais em modelos matemáticos que podem ser otimizados individualmente.

O trabalho na presente pesquisa, por sua vez, se divide 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, detalhes de tais complexos não necessários às análises presentes neste relatório (por exemplo nome, proprietário, número de torres e localização) não serão divulgados.

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;
- Ensaio 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;
- 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.

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 – nos *softwares SIMUL8* e *Microsoft Excel* – e formatação de uma estrutura de inteligência gerencial para o acompanhamento dos projetos.

O principal item da presente análise metodológica, então, é a divisão da macroestrutura de projetos eólicos, a qual é parte integrante de um entendimento global deste trabalho. Com tal divisão, pode-se definir os agentes do projeto, suas atividades e suas interações.

A etapa de implantação de obras civis de um parque eólico envolve diversas atividades, tanto sequenciais como paralelas. Os construtores, comumente, dividem suas equipes em diferentes setores para melhor gerenciamento. Exemplos de divisão setorial são: divisão entre sala técnica, campo e serviços de apoio; ou divisão por natureza da execução, no caso entre terraplenagem e civil.

O primeiro tipo de divisão se mostra particularmente útil perante o ponto de vista gerencial e de controle financeiro. Com ele, pode-se melhor dimensionar equipes de mão de obra, contratar e acompanhar o desempenho de profissionais específicos e avaliar indicadores chave de gestão, principalmente os contábeis. Tal divisão, então, é seguida no sentido *top down*, no qual são estabelecidas hierarquias internas das equipes, a qual se inicia pelo gestor de obra (ou gestor de contrato, ou *site manager*) e vai se desdobrando dentro de uma árvore de organograma. Exemplos de segundo nível da árvore são: engenheiro de produção, engenheiro de sala técnica, engenheiro de segurança do trabalho e engenheiro de meio ambiente.

A avaliação de tal processo de divisão é de que são obtidas vantagens à diretoria empresarial por um melhor controle gerencial, porém não se cria uma hierarquia clara para as equipes de campo, as quais são fundamentais na execução de obra. Como o foco do presente trabalho é justamente o estudo dos processos de campo, entende-se que se deve seguir o outro processo de divisão.

O segundo tipo, então, por natureza da execução, tem um foco *bottom up*, ou seja, são definidas atividades de campo que fazem parte do escopo de contrato, e a partir delas são construídas equipes de mão de obra e também um sistema gerencial condizente com suas naturezas. Comumente, os construtores realizam a divisão da obra

em duas partes: terraplenagem e civil. A primeira se refere a todas as atividades que envolvam movimentação e trabalhos em terra, incluindo os sistemas de pavimentação. Já a segunda, com foco usual nos processos de concretagem, refere-se ao ciclo da base de fundação e às atividades de drenagem.

Um comparativo entre ambas propostas de divisão é apresentado nas Figuras 20 e 21.

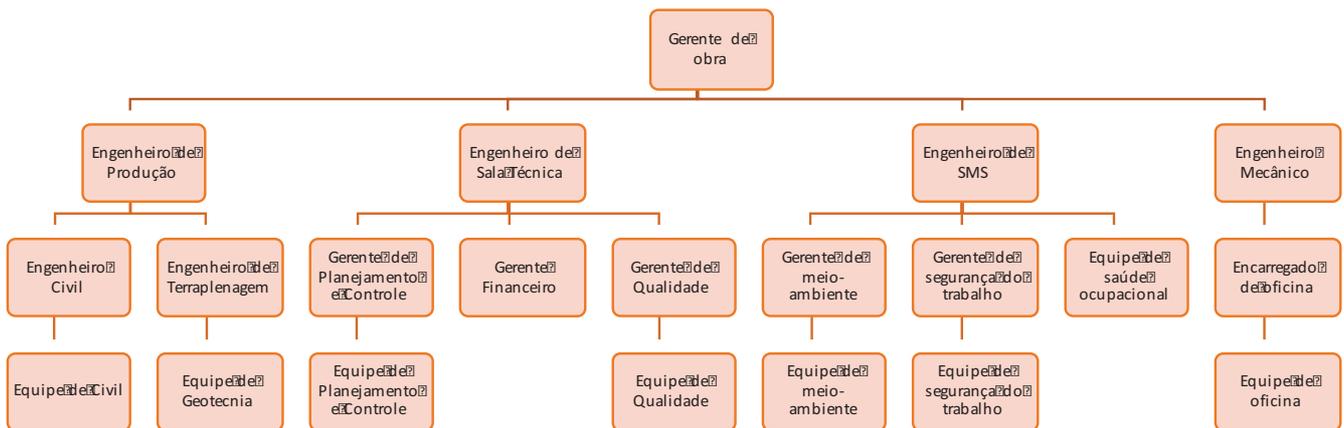
Por sua consagração no mercado, o presente trabalho também adota a divisão dual por natureza da execução. Definem-se então os termos: *terraplenagem geral* para atividades de movimentação de terra (incluindo terraplenagem e pavimentação de acessos e plataformas); e *civil geral* para os serviços civis (incluindo execução do ciclo da base, drenagem e obras d'arte). Para que se evitem ambiguidades, o termo *terraplenagem geral* se refere à parte da obra, neste parágrafo especificada; o termo *terraplenagem* se refere às atividades de corte e aterro; o termo *base* se refere à base de concreto da torre eólica; o termo *base* só se refere à camada de pavimentação, localizada sobre a sub base, quando o texto se tratar especificamente de pavimentação.

Os escopos de cada parte são apresentados na Tabela 3.

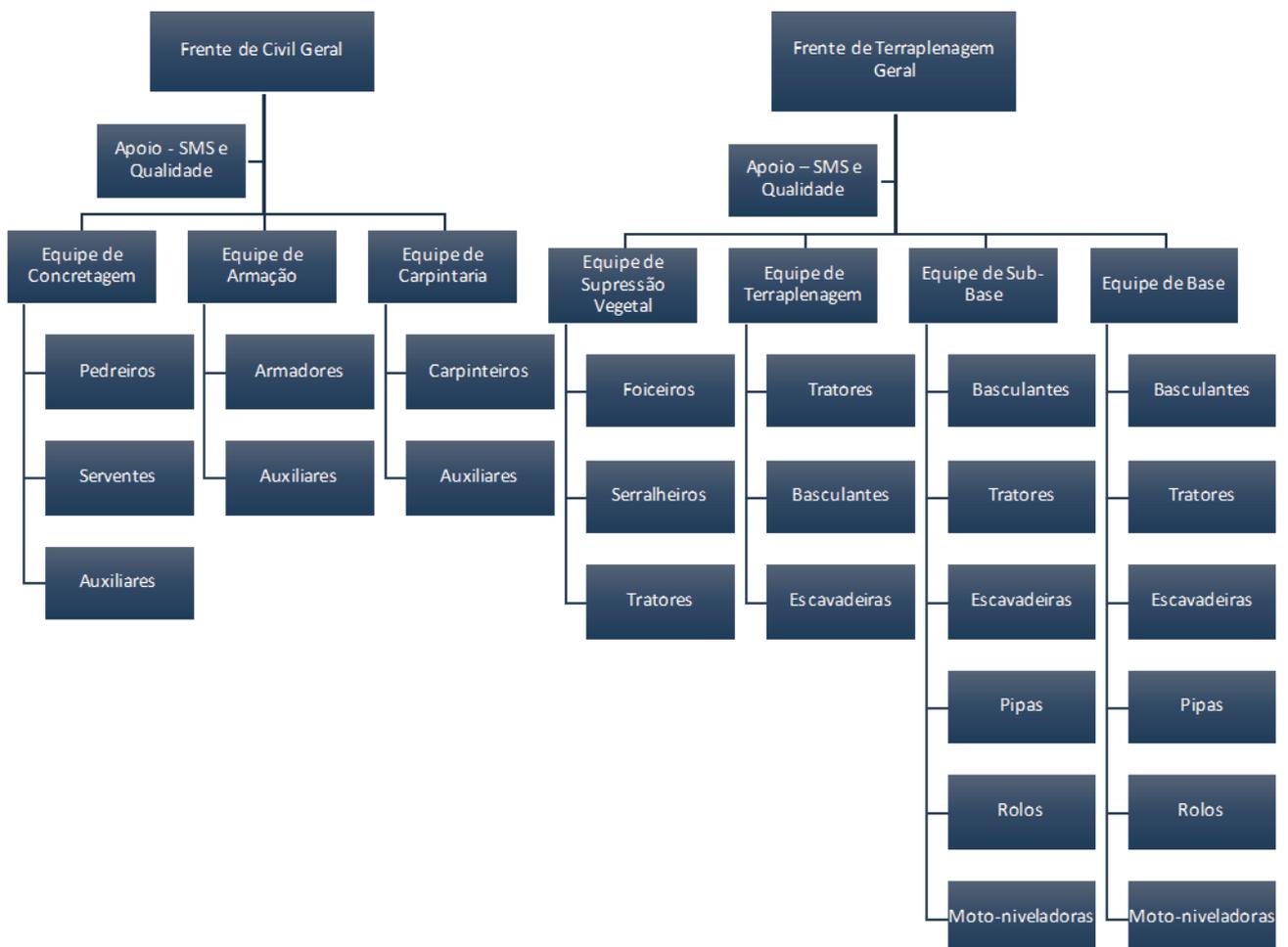
Tabela 3: Sumário dos escopos das partes da macroestrutura da obra.

Parte da Macroestrutura	Escopo
Terraplenagem Geral	Execução dos acessos
	Execução das plataformas
Civil Geral	Execução do ciclo da base
	Execução da drenagem e obras d'arte

Fonte: Autor.

Figura 20: Exemplo de divisão da obra por abordagem *top down*.

Fonte: Autor.

Figura 21: Exemplo de divisão da obra por abordagem *bottom up*.

Fonte: Autor.

Além da divisão já explanada, há outra análise divisória inerente à natureza de obras de parques eólicos: a geográfica. Por comumente se tratarem de projetos com longas extensões lineares e de áreas, obras de parques eólicos se dividem geograficamente em acessos e plataformas. Além disso, é também prática comum a execução, em uma só empreitada, de um complexo eólico, o qual engloba vários parques próximos.

Para melhor identificação dessas partes, são criados códigos específicos. Por exemplo, acessos podem ser catalogados por: número e estacas; enquanto que plataformas são catalogadas por: tipo (por exemplo para base, canteiro, pátio de estocagem, bota-fora ou jazida), parque e número.

Tal divisão geográfica se mostra particularmente útil na alocação de atividades dentro da estrutura analítica de projeto.

Assim, considera-se que seguir a metodologia de divisão das atividades aqui apresentada permite ao presente trabalho a obtenção dos resultados esperados, como: especificação das atividades de terraplenagem geral e de civil; definição das atividades críticas; modelagem de otimização; testes e validação dos resultados das execuções em campo das iniciativas, através da aplicação dos modelos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Construção da estrutura analítica de projeto

5.1.1. Detalhamento de escopo: parte terraplenagem geral

Como explicitado no item 4. *Metodologia*, a parte geotécnica se refere a todas as atividades que envolvem movimentações e trabalhos com terra. Desde a prospecção inicial, como ensaios de sondagem e mapeamento pedológico da área e pesquisa geológica de jazidas, ao comissionamento final, como análise laboratorial de índices de resistência e ensaios de *crane pad*, a parte geotécnica envolve toda a obra, tanto temporal como geograficamente.

Informalmente denominada “terraplenagem”, a parte geotécnica é classificada como intensiva no sentido de utilização de equipamentos pesados. Estimativas levantadas no presente trabalho, com base nos bancos de dados coletados em campo, mostram que aproximadamente 67% dos equipamentos mobilizados em obra, em termos financeiros, são destinados à parte geotécnica. Tal estimativa se baseia em preços de locação, mão de obra e tempos de mobilização das máquinas. No caso de compartilhamento de uma mesma máquina em diferentes frentes, são considerados coeficientes de ponderação temporal para cada parte.

Listam-se os principais equipamentos – majoritariamente de linha amarela – comumente utilizados nessa parte da obra:

- Trator de esteiras;
- Trator de pneus;
- Escavadeira hidráulica;
- Escavadeira com rompedor hidráulico;
- Retroescavadeira;
- Rolo compactador;
- Moto-niveladora;
- Caminhão basculante;
- Caminhão pipa;
- Recicladora.

O dimensionamento das equipes de máquinas depende de diversos fatores, entre eles: geografia da obra, nível de aceleração previsto no cronograma, distâncias médias

de transporte, tipo de material trabalhado, topografia local e dimensionamento das camadas, através de projetos de terraplenagem e de pavimentação.

Seguindo a proposta de divisão geográfica dos serviços, segmenta-se a presente explicação em atividades de acesso e de plataforma. Além de ambas, também são delineadas atividades preliminares e de suporte.

São aqui definidos códigos para identificação facilitada das atividades. A parte geotécnica é identificada pelo código G, enquanto que a civil pelo C. Os demais códigos, quando apresentados pela primeira vez, são mostrados entre parênteses.

Quanto aos serviços preliminares (G-A), são necessários:

- Ensaio de sondagem (G-A-1);
- Levantamentos topográficos (G-A-2);
- Levantamentos do tipo de fauna e flora encontrados (G-A-3);
- Mapeamento das comunidades presentes no complexo eólico (G-A-4);
- Obtenção de licenciamento ambiental (G-A-5);
- Obtenção de permissão de execução (G-A-6);
- Definição das permissões para supressão vegetal (G-A-7);
- Recebimento das diretrizes de projeto (equipamentos e cargas críticas) (G-A-8);
- Análise laboratorial dos solos da área estudada (G-A-9)
- Elaboração de projeto de terraplenagem (G-A-10);
- Elaboração de projeto de pavimentação (G-A-11);
- Mobilização de equipes e máquinas (G-A-12).

Quanto aos serviços de execução de acessos (G-B), são necessários:

- Supressão vegetal (G-B-1);
- Terraplenagem – cortes e aterros (G-B-2);
- Pavimentação – sub-base (G-B-3);
- Pavimentação – base (G-B-4);
- Ensaio de comissionamento do pavimento (G-B-5);
- Manutenção (G-B-6).

Quanto aos serviços de execução de plataformas (G-C), são necessários:

- Supressão vegetal (G-C-1);
- Terraplenagem (G-C-2);
- Escavação mecânica (G-C-3);
- Nivelamento de fundo de cava (G-C-4);

- Limpeza fina (G-C-5);
- Re-aterro da plataforma (G-C-6);
- Pavimentação – sub-base (G-C-7);
- Pavimentação – base (G-C-8);
- Execução final da plataforma (G-C-9);
- Ensaio de comissionamento e *crane pad* (G-C-10);
- Manutenção (G-C-11).

Quanto aos serviços auxiliares (G-D), são necessários:

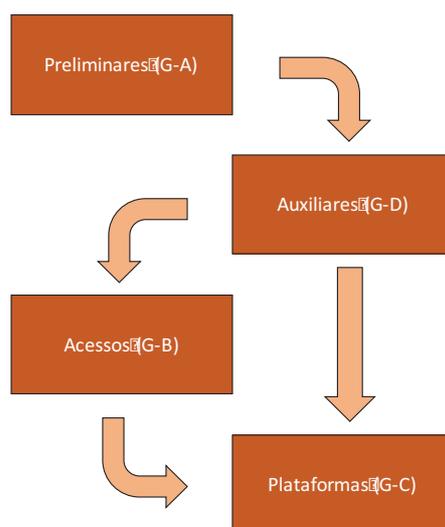
- Supressão vegetal na jazida (G-D-1);
- Escavação de materiais de jazida (G-D-2);
- Umidificação de acessos para minimização de poeira nas comunidades (G-D-3);

As atividades da parte geotécnica são representadas na Figura 22.

Ressalta-se que os códigos apresentados não são necessariamente sequenciais. Por exemplo, no caso da sequência G-C, as atividades do ciclo de base (G-C-3 a G-C-6 especificamente) devem ocorrer a partir do momento em que há operacionalidade dos equipamentos de tal ciclo, como caminhão *munck*, guindaste, caminhão betoneira e bomba-lança de concreto. Tal operacionalidade depende das condições *in-situ*, podendo ser a partir da execução da terraplenagem, como apresentado na lista, ou a partir da execução da sub-base. Casos mais raros podem requerer execução de toda a pavimentação para que tal requisito seja atendido.

Outro ponto de observação quanto à lista apresentada, é que a sequência G-C, como apresentada, só se aplica a plataformas do tipo base – ou seja, aquelas nas quais serão executadas bases de torres eólicas. Outros tipos de plataforma, como de canteiro e de jazida, não requerem tantas atividades, podendo ser excluídas, por exemplo, as atividades G-C-3, G-C-4, G-C-5, G-C-9 e G-C-10.

Figura 22: Esquema dos diferentes tipos de serviço da parte geotécnica.



Fonte: Autor.

5.1.2. Detalhamento de escopo: parte civil geral

Como explicitado no item 4. *Metodologia*, a parte civil se refere às atividades com foco no ciclo de base, drenagem e obras d’arte. A parte civil varia, em termos de intensidade de contratação de mão-de-obra e equipamentos, sensivelmente ao longo da obra. Com início tímido, por se mostrar necessária apenas à montagem das estruturas básicas, como canteiro e mobilização de usina, a parte civil ganha momento à medida que a parte geotécnica avança.

O maior volume financeiro da parte civil ocorre durante as etapas de concretagem, tendo em vista o peso financeiro dos insumos envolvidos, em especial *diesel* e cimento, os dois principais itens da estrutura de custos em uma obra eólica. Embora o *diesel* seja mais ligado à parte geotécnica – por sua importância já destacada quanto às máquinas pesadas – a utilização de cimento é exclusiva à civil.

Diferentemente da geotécnica, a civil se mostra intensiva de mão de obra e não de máquinas. Isso se dá muito pela sua natureza especialista, na qual existem detalhes na execução de sua atividade que requerem equipes especializadas e o nível de automação ainda é relativamente baixo. Destacam-se nesse sentido as etapas de armação, carpintaria e concretagem. Tais equipes comumente requerem encarregados específicos, além de um time de serventes, auxiliares e ajudantes, os quais podem montar equipes de até 12 pessoas. Também é comum a flexibilidade entre equipes,

incluindo junção de diversas em uma mesma frente ou de mudança nos dimensionamentos delas ao longo da obra.

Mesmo não sendo financeiramente tão representativos – em termos relativos – os equipamentos da parte civil são fundamentais para um bom andamento do cronograma de obra. São eles:

- Caminhão *munch*;
- Caminhão basculante;
- Caminhão pipa;
- Caminhão betoneira;
- Betoneira móvel;
- Retroescavadeira;
- Pá carregadeira;
- Bomba-lança de concreto;
- Bomba-estacionária de concreto;
- Guindaste.

Outros equipamentos de maior porte, embora se destaquem financeiramente, são comumente delegados a serviços terceirizados. São eles:

- Britador;
- Usina dosadora de concreto;
- Máquinas de fundação (por exemplo raiz e hélice contínua monitorada).

Variações nas especificações de projeto de base, tal como tipo de fundação, geometria da base e materiais de *anchor bolt* alteram sensivelmente índices de produtividade das equipes, sendo, então, fundamentais nos dimensionamentos de pessoas e máquinas. Exemplos de tais variações ocorrem, por exemplo, de acordo com a geografia de obra. Em projetos em dunas, é comum a solução de fundação ser homogênea em hélice contínua monitorada, enquanto que em obras em sertão é comum uma heterogeneidade de soluções, por exemplo fundações do tipo raiz e direta.

Os serviços, na presente parte, são divididos por sua caracterização, e não apenas geograficamente. São, então, definidos serviços do tipo preliminares, de drenagem, de ciclo da base e auxiliares. Possíveis obras d'arte são incluídas em serviços auxiliares. Por sua baixa presença em projetos reais visitados, elas não são detalhadas minuciosamente.

Assim como apresentado no item anterior, listam-se a seguir os serviços da parte de civil e seus códigos respectivos.

Quanto aos serviços preliminares (C-A), são necessários:

- Recebimento das diretrizes de projeto (equipamentos e cargas críticas) (C-A-1);

- Elaboração de projeto de fundação (C-A-2);
- Elaboração de projeto de base de concreto (C-A-3);
- Elaboração de estudo hidrológico e de projeto de drenagem (C-A-4);
- Adoção de solução construtiva (C-A-5);
- Mobilização e instalação de canteiro de obras (C-A-6);
- Mobilização de equipes e máquinas (C-A-7).

Quanto aos serviços de drenagem (C-B), são necessários:

- Execução de calhas laterais (C-B-1);
- Execução de meio-fio (C-B-2);
- Execução de saídas rápidas (C-B-3);
- Execução de bueiros e passagens molhadas (C-B-4);
- Manutenção (C-B-5).

Quanto aos serviços do ciclo da base de concreto (C-C), são necessários:

- Execução da solução de fundação (C-C-1);
- Arrasamento de estacas (C-C-2);
- Execução do concreto de nivelamento de fundo – magro (C-C-3);
- Identificação topográfica das posições de gabarito (C-C-4);
- Colocação de *anchor bolt* (C-C-5);
- Armação da estrutura metálica (C-C-6);
- Aterramento elétrico da base (C-C-7);
- Colocação de tubulações elétricas (C-C-8);
- Montagem da forma (C-C-9);
- Concretagem da base (C-C-10);
- Cura e acompanhamento do concreto (C-C-11);
- Comissionamento civil da base, aprovação pelo fiscal (C-C-12).

Quanto aos serviços auxiliares (C-D), são necessários:

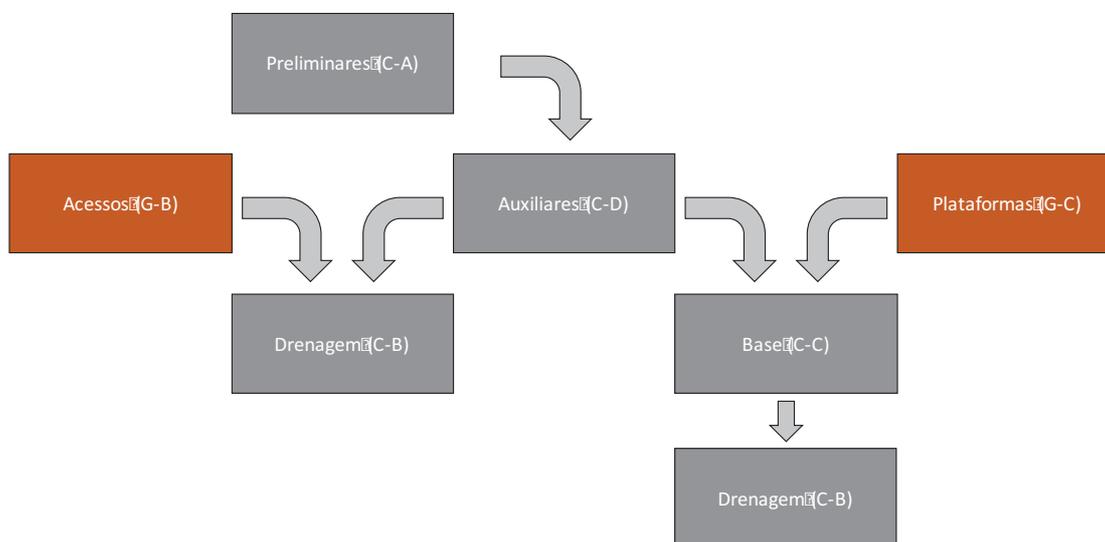
- Identificação da posição ótima para britador (C-D-1);
- Instalação de britador (C-D-2);
- Identificação da posição ótima para usina dosadora de concreto (C-D-3);
- Instalação de usina dosadora de concreto (C-D-4);
- Execução de projetos paralelos à obra principal (C-D-5);

- Execução de projetos de obras d'arte (C-D-6).

As atividades da parte civil são apresentadas na Figura 23, a seguir.

Ressalta-se a flexibilidade necessária quanto à ordenação e existência dos serviços listados nas sequencias apresentadas. Isso porque diferentes soluções de projeto podem apresentar variações significativas nas soluções construtivas e, conseqüentemente, na execução da parte civil. Exemplos observados em campo, além dos já citados quanto aos tipos de fundação, são: necessidade de escavação dupla por haver dois níveis distintos de armação e fundação; e variação no encaixe do *anchor bolt* com a estrutura metálica.

Figura 23: Esquema dos diferentes tipos de serviço da parte civil.



Fonte: Autor.

5.1.3. Detalhamento de escopo: itens auxiliares

Outras atividades também devem ser executadas em paralelo à obra para que se atinja a entrega de escopo com qualidade. Por não se encaixarem diretamente na estruturação *top down* prevista na presente dissertação, tais atividades não foram detalhadas nos itens anteriores. Portanto, considera-se relevante uma menção das principais áreas auxiliares que compõem tacitamente a estrutura analítica de projeto.

São elas:

- Meio ambiente;
- Segurança do trabalho;

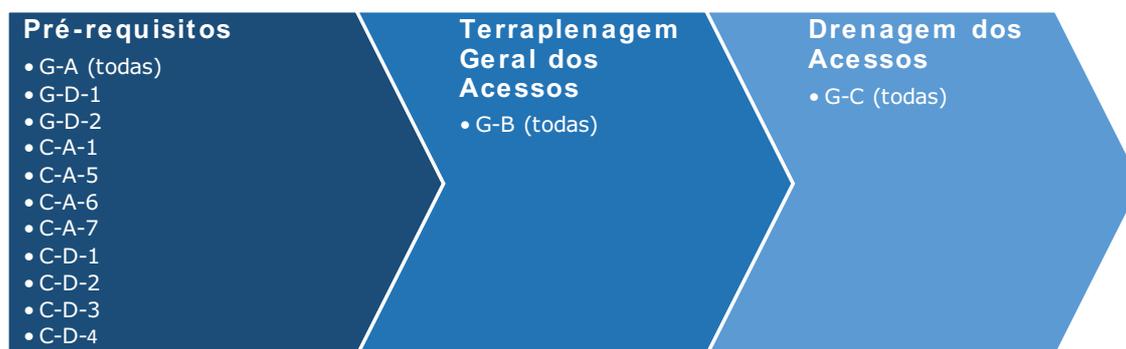
- Saúde ocupacional;
- Almojarifado;
- Gestão da qualidade;
- Gestão jurídica de contratos;
- Gestão financeira de contratos e de faturamento.

Tais itens se mostram essenciais na construção de uma EAP através da metodologia *top down*, tendo em vista seu foco gerencial. Como explicitado, no caso aqui estudado, *bottom up*, seu caráter auxiliar permite uma não necessidade de especificação de suas sequencias de atividades. Mesmo assim, são tais atividades, em especial as relacionadas à gestão da qualidade e dos contratos, que permitem a coleta de dados em campo que embasam análises na presente dissertação.

5.1.4. Integração entre os diferentes escopos

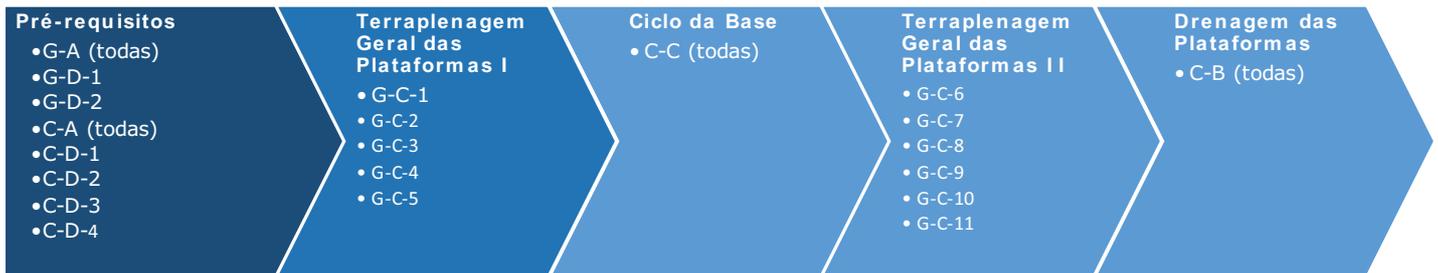
Para construção final da EAP, tal como proposto neste item, são integradas ambas as partes – geotécnica e civil – dentro de uma mesma análise. As entregas, então, se dividem em diferentes ciclos: de acessos e fundações, como apresentado nas Figuras 24 e 25. A integração total das atividades é mostrada no quadro esquemático da Figura 26, considerada, por sua abrangência, a demonstração mais direta da construção final da EAP de obras civis de parques eólicos.

Figura 24: Esquema dos serviços para execução de acessos.



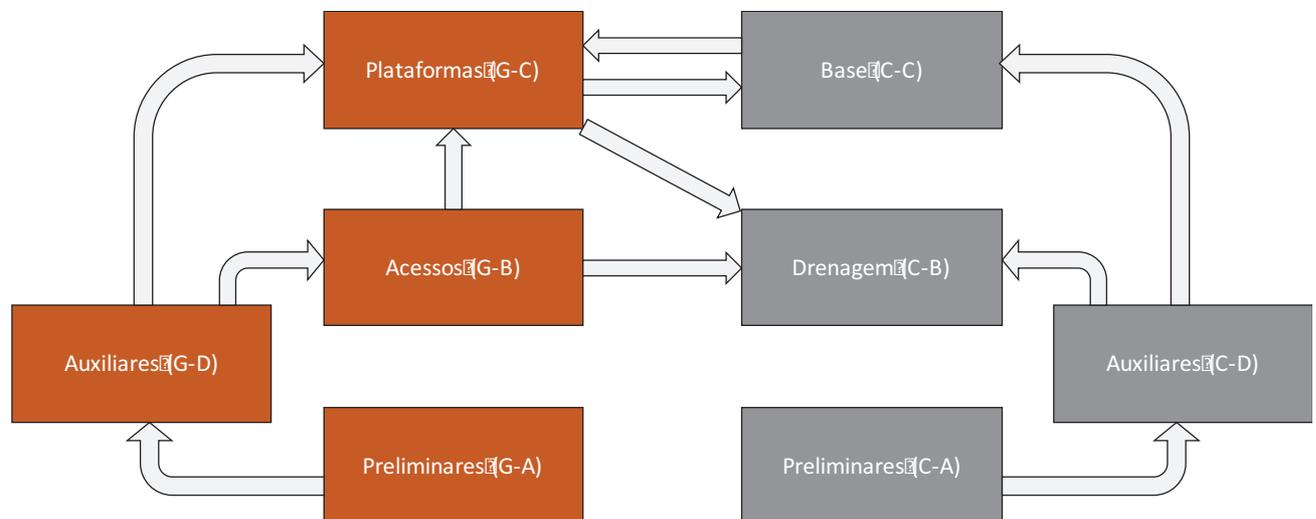
Fonte: Autor.

Figura 25: Esquema dos serviços para execução de fundações.



Fonte: Autor.

Figura 26: Esquema geral da estrutura analítica de projeto da obra.



Fonte: Autor.

5.2. Identificação de atividades críticas da estrutura analítica de projeto

Através de uma análise do peso de cada atividade dentro da obra como um todo, peso esse tanto temporal como financeiro, pode-se determinar um índice de priorização das atividades em termos de relevância de estudos. Quanto à parte geotécnica, as operações de pavimentação merecem destaque. Quanto à parte civil, as operações de concretagem das bases são críticas. Entretanto, atividades e sistemas paralelos e periféricos também são passíveis de modelagens de alto impacto. Destacam-se, nesse sentido: o projeto geométrico do parque e a alocação de posições chave; o planejamento do cronograma da obra; e a política de manutenção de equipamentos pesados.

5.3. Modelagem das atividades críticas

Este item apresenta individualmente as diretrizes e os modelos, concebidos e utilizados, neste trabalho. Com base na análise crítica das atividades, foram abordados os sistemas logísticos, de pavimentação, de concretagem, de manutenção e de acompanhamento de produtividade de mão de obra.

5.3.1. Modelagem dos sistemas logísticos chave

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 da natureza das obras de eólica, três posições chave neste trabalho: usina dosadora de concreto, oficina mecânica centralizada e bomba para abastecimento de combustível.

Por terem funções diferentes quanto à distribuição dos deslocamentos associados a elas, as posições citadas devem ser analisadas de maneiras particulares. Todas as abordagens de deslocamento em obras civis de parques eólicos devem levar em consideração condicionantes de limitação dos deslocamentos dentro da área do parque, tendo em vista políticas de utilização de acessos previamente liberados pelos agentes responsáveis pela construção. Assim, estudos de *layout* do parque, incluindo mapeamento dos acessos acessíveis, são parte integrante dessas abordagens.

Assim, conclui-se que uma modelagem através de grafos se mostra como a estruturação matemática mais adequada para a obtenção de otimizações logísticas ainda na fase de planejamento de obras. Reforça-se tal decisão tendo em vista a vasta literatura disponível em termos de algoritmos já existentes para otimização em grafos.

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.

Contempla-se, então, no modelo de otimização deste trabalho, a alocação de três posições chave: usina, bomba e oficina.

A primeira problemática se refere ao processo de concretagem da base. Tal processo é discutido em detalhe tanto na literatura específica como no item 5.3.3. deste trabalho. De maneira geral, o 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:

$$MIN \sum_{v=1}^n D[u, v] \quad (7)$$

onde n indica o número total de bases, $D[a, b]$ indica a aplicação do algoritmo de Dijkstra para cálculo do caminho mínimo entre os vértices a e b , v indica o nó em que está localizada a base concretada e u indica a variável de trabalho da otimização, a qual é o nó em que se localiza a usina de concreto.

As condicionantes para a aplicação do modelo são:

- u deve ser um nó pertencente ao grafo G , mesmo nas suas formas derivadas;
- idealmente a busca se dá para todas as possibilidades de u , ou seja, para todas as estacas dos acessos do parque eólico.

Uma maneira de solucionar tal problema, evitando um número excessivo de nós a se trabalhar, e, portanto, evitando um alto tempo de processamento, é alterar

individualmente os grafos trabalhados. Isso se dá através da aplicação do algoritmo a seguir:

```

DIST ← +∞
utilizar grafo global derivado
u ← 1
enquanto u ≠ m fazer
    utilizar subgrafo específico
    D' ←  $\sum_{v=1}^n D[u, v]$ 
    Se D' < DIST então
        DIST ← D'
    u ← u + 1
output DIST.

```

Fonte: Autor.

Onde todos os vértices do grafo global derivado são numerados de 1 a m , onde m é o número total de estacas no complexo eólico. Para agilidade de cálculo, os subgrafos específicos devem utilizar o número mínimo de nós. Tal número é dado por 2 (nó da usina e nó da base) somado ao número de intercessões entre acessos.

A segunda problemática diz respeito ao processo de abastecimento. Tal processo é dado por um conjunto de bomba e caminhões melosa. A bomba é considerada fixa, enquanto que os caminhões devem abastecer, diariamente, todos os equipamentos em trabalho na obra.

Para a localização da bomba, o algoritmo de solução é semelhante ao de localização da usina. A única diferença se dá no cadastro dos grafos, pelo tipo do vértice v . Em vez de base a ser concretada, ele agora deve se referir a um ponto médio dos acessos, sendo a média ponderada pelos volumes de trabalho de movimentação de terra. Isso é uma consideração feita para incluir no modelo o fato de que as frentes de serviço têm localidades variáveis ao longo da obra, fato inerente a construções de acessos.

Para otimização das rotas dos caminhões melosa, pode-se utilizar tanto a solução do problema do caixeiro viajante como a do carteiro chinês. A primeira é mais recomendada em caso de frentes de serviço concentradas (nós a serem percorridos são, então, a bomba e as frentes de serviço), já a segunda é mais recomendada quando os

equipamentos se encontram espalhados pelos acessos e plataformas (arcos, então, são os acessos com frente de serviço e aqueles necessários para que se chegue aos primeiros). A bomba é nó de origem e de fim em ambos os casos.

Já para a terceira problemática, de manutenção de máquinas, o processo é dado pelo conjunto oficina e caminhões oficina. As abordagens de localização ótima da oficina e das rotas ótimas dos caminhões oficina são as mesmas daquela usada para a bomba e caminhões melosa, respectivamente. Isso se dá porque ambas se referem a deslocamentos entre um ponto central e as frentes de serviço, onde estão os equipamentos. Inclusões estocásticas podem ser agregadas ao modelo, por exemplo, probabilidades de quebras de diferentes tipos de máquinas e de diferentes tipos de geografia trabalhada. Mais especificamente, cita-se os casos de obras em dunas e de obras em montanhas, os quais são consideravelmente discrepantes entre si e por isso requerem diferentes políticas de manutenção. O modelo permite também a inclusão de restrições adicionais, como limitações de área quanto aos licenciamentos ambiental ou fundiário.

Percebe-se, então, que a criação de uma modelagem, no caso via grafos, da logística de posições chave em de uma obra eólica permite análise de cenários e obtenção de fundamentação para tomada de decisões com o objetivo de redução de custos, atingindo-se, assim, a otimização proposta.

5.3.2. 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.

Os projetos de pavimentação devem levar em consideração as características geográficas do local da construção, principalmente em termos geológicos. Obras eólicas no Brasil, particularmente, tendem a ocorrer em regiões de dunas e de montanhas, sendo que essas últimas também incluem regiões sertanejas de chapadas.

Dessa forma, a alta incidência de solos com altos teores arenosos ou rochosos faz com que o aproveitamento de solos locais seja mais recomendado às atividades de terraplenagem, em particular aterros, e não às atividades de pavimentação. É comum, portanto, a utilização de materiais de empréstimo de jazidas, idealmente localizadas o mais próximo possível das regiões de execução dos pavimentos.

As atividades de pavimentação, quando focadas no item material de jazida, seguem um ciclo de: extração do material, carregamento dos caminhões basculante, transporte à frente de serviço, descarregamento dos caminhões basculante e deslocamento de volta. Já quando focadas no item execução da frente de serviço, elas seguem um ciclo de: regularização do trecho, deposição de material, espalhamento, nivelamento, umidificação, homogeneização e compactação.

Observando tais sequenciamentos de atividades, percebe-se a utilização de diversos tipos diferentes de equipamentos, como escavadeiras hidráulicas (extração na jazida e carregamento dos caminhões), caminhões basculante (transporte), tratores de esteira (espalhamento), motoniveladoras (nivelamento), caminhões pipa (umidificação), tratores de pneus com grade (homogeneização) e rolos compactadores (compactação).

O principal desafio nessa 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).

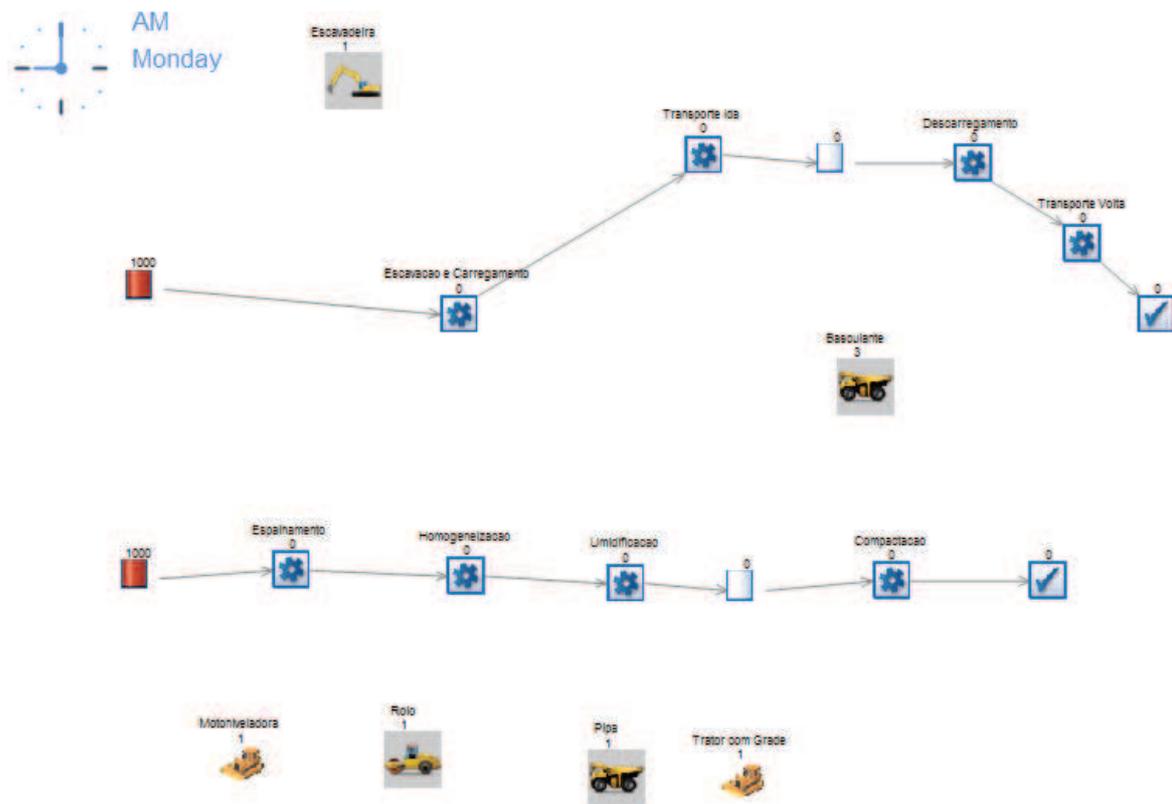
Utiliza-se simulação de eventos discretos como a ferramenta matemática mais adequada à modelagem das atividades de pavimentação, tendo como objetivo de otimização do modelo o correto balanceamento entre máquinas e o dimensionamento das patrulhas. Ressalta-se a inclusão da logística de transporte de material 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.

A Figura 27 apresenta a modelagem de pavimentação através de simulação de eventos discretos.

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 10m^3 são considerados razoáveis em tal determinação.

O primeiro processo, de transporte da jazida até a frente de serviço é apresentado na parte superior da Figura 27. Ele inicia-se em uma representação da jazida de materiais, mostrada como uma fila inicial preenchida com um número elevado de unidades de trabalho. A quantidade certa não é relevante para o modelo, desde que permita que a fila inicial não fique vazia ao longo do período analisado. Denomina-se esse conceito como *fila infinita*. Quantidades específicas podem ser incluídas, para considerar a escassez de material da jazida. Não é recomendado trabalhar com tal escassez, tendo em vista que, à medida que a jazida for consumida, deve-se alterar o *layout* das escavadeiras hidráulicas presentes nela, o que impacta diretamente nos índices de produtividade, comprometendo os resultados da modelagem.

Figura 27: Modelo de pavimentação, feito em SIMUL8.



Fonte: Autor.

A movimentação do elemento de trabalho, da fila inicial para a primeira atividade (*Escavação e Carregamento*) se dá com a utilização do recurso *Escavadeira* e da disponibilidade e presença do recurso *Basculante*. O tempo de duração é função diretamente dos índices de produtividade das escavadeiras hidráulicas mobilizadas na jazida, os quais dependem de fatores como: posicionamento, tipo de material extraído, experiência do operador e índices de disponibilidade mecânica dos equipamentos. O número de atividades paralelas possíveis nesta etapa é função da disponibilidade dos recursos *Escavadeira* alocados em paralelo com os recursos *Basculante*, a uma razão 1:1.

Com alocação do recurso *Basculante*, o material de trabalho é movido à atividade *Transporte Ida*. A duração de tal atividade é função de diversos fatores, como: distância percorrida, tipo de acesso de ligação, velocidade média que o condutor impõe ao veículo e nível de interferências externas no percurso, como colocação e retirada de lonas de proteção. O número de atividades paralelas possíveis nesta etapa não é limitado por nenhum fator, o que se traduz na não necessidade de filas prévias à entrada do elemento de trabalho nesta etapa.

Após chegada na frente de serviço, o elemento de trabalho fica alocado em uma fila para poder ingressar na atividade *Descarregamento*. Isso se dá devido à atividade *Descarregamento*, que ocorre com necessidade de alocação de um recurso *Basculante*, ter uma limitação quanto ao número de atividades paralelas possíveis. Tal limitação é função da natureza da frente de serviço. Normalmente, observa-se em campo leiras sequenciais, logo é comum haver filas de basculantes para descarregamento. Recomenda-se um planejamento do descarregamento em diferentes frentes de leira para aumentar o limite de caminhões descarregando em paralelo e evitar-se, assim, filas. Tal planejamento é função da gerência de campo, seja pelo engenheiro ou seja pelo encarregado responsáveis. A duração da atividade de descarregamento é função da agilidade operacional da equipe envolvida.

Após a atividade *Descarregamento*, considera-se que o elemento de trabalho já está alocado na sua posição final dentro do processo de transporte. Entretanto, o recurso *Basculante* que vinha sendo alocado em todas as atividades predecessoras ainda não pode ser liberado de volta ao *pool* de recursos, tendo em vista que na realidade tal *pool* se localiza na jazida, enquanto o recurso em questão continua na frente de serviço. Assim, inclui-se no modelo uma atividade adicional, *Transporte Volta*, no qual o caminhão volta vazio. Sua duração depende de fatores semelhantes àqueles do *Transporte Ida*, com algumas particularidades, como: a rota pode ser diferente, atividades de lona não mais são necessárias e é comum observar-se velocidades mais elevadas no caminhão vazio do que no caminhão carregado.

Dessa forma, finaliza-se o processo de transporte do material de jazida, o qual é linear do ponto de vista do elemento de trabalho e cíclico do ponto de vista dos recursos (havendo dois ciclos diferentes, o ciclo curto do recurso *Escavadeira* e o ciclo longo do recurso *Basculante*). O volume de material transportado é a quantidade de atividades *Descarregamento* completadas dentro do período analisado.

O segundo processo, de execução, segue um modelo mais linear. Ele se inicia em uma fila infinita de elementos de trabalho, a qual representa as leiras de material de jazida depositadas na frente de serviço. O balanceamento entre as produtividades de transporte e de execução, é um cálculo direto que pode ser feito usando-se os *outputs* do presente modelo, de modo a se chegar a uma conclusão de quantas leiras são necessárias no momento inicial da execução para que a patrulha de máquinas de pavimentação não fique ociosa aguardando o transporte de material.

A primeira atividade, *Espalhamento*, representa a transformação das leiras em material espalhado ao longo do acesso. Ela pode ser realizada com diferentes equipamentos, como motoniveladora (recurso aqui representado no modelo, por razão didática) e trator de esteiras. O tempo de duração da atividade depende de diversos fatores como: tipo de equipamento utilizado, índice de produtividade do equipamento, índice de disponibilidade mecânica da máquina, experiência do operador e níveis de interferências externas como presença de obstáculos no acesso. Ressalta-se a transição na obtenção de dados de produtividade e de acompanhamento da execução, a qual pode variar entre volume (unidade utilizada no elemento de trabalho do modelo) e avanço linear. Tal transição pode ocorrer, por exemplo, através de um fator de conversão, a ser obtido em campo, de acordo com a espessura da camada que se deseja executar. Recomenda-se a obtenção de tal fator de conversão através de observações empíricas do espalhamento de leiras. A utilização dessa grandeza permite determinação do espaçamento ótimo entre leiras, o que traz considerável potencial de aumento dos índices de produtividade, tendo em vista que se evita a superposição de material e o consequente retrabalho.

A segunda atividade, *Homogeneização*, representa a movimentação do solo em si mesmo, de modo a minimizar diferenças de densidade dentro de uma mesma amostra, através desse movimento de mistura. Para tanto, utiliza-se comumente um trator de pneus com grade, representado no recurso *Trator com Grade*. A quantidade de passadas e também o tempo de duração da atividade é função de fatores como: especificação do equipamento, experiência do operador e nível de heterogeneidade do solo.

A terceira atividade, *Umidificação*, representa a participação dos caminhões pipa, com espalhamento de água, borrifando-a no solo homogeneizado. O objetivo dessa atividade é conferir maior resistência ao solo, ao atingir-se a umidade ótima. Para tanto, é necessário a utilização do recurso *Pipa*. Na prática, entende-se que caminhões pipa podem participar das atividades de pavimentação também durante a homogeneização, dependendo do tipo de solo trabalhado. De toda forma, para melhor representação na modelagem, são dissociadas as atividades de homogeneização e umidificação. O tempo de duração dessa atividade é consideravelmente variável, tendo em vista a importância do tipo de solo trabalhado e alta variabilidade dos índices de umidade ótima. Recomenda-se um entendimento específico das condições do solo trabalhado e dos padrões de umidade ótima atingidos, para se conferir maior previsibilidade ao modelo.

Por fim, há a atividade de *Compactação*, a qual apresenta um limite quanto ao número de atividades paralelas que podem ser executadas, função do número de recursos *Rolo* mobilizados na frente de serviço. O tempo de duração dessa atividade é função de diversos fatores, como: número de passadas, índice CBR a ser obtido, tipo de material trabalhado, presença de caminhões pipa de apoio, características do rolo (liso, pé de carneiro, vibratório) e experiência do operador.

O pavimento final, com camada de sub-base e base, então, é considerado como executado com a finalização da compactação. As principais maneiras de mensuração de tal execução são por volume e por avanço linear. Em termos contratuais, é mais interessante uma avaliação por volume, pois leva diretamente em consideração o esforço depreendido para conformar qualquer tipo de solo à condição adequada de trafegabilidade pré-estabelecida. Isso é importante pois há situações em que o subleito não fornece suporte suficiente e as camadas de sub-base e base devem ser reforçadas, o que aumenta consideravelmente o esforço necessário para a execução do pavimento. A segunda maneira, de avanço linear, mostra-se mais interessante apenas de um ponto de vista gerencial, pois é facilmente identificada visualmente e também permite o avanço de outras atividades subsequentes, como aquelas de execução civil.

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

5.3.3. 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.

Operações menores de concretagem, como as comumente observadas na construção civil, podem ser realizadas com o concreto de preparo *in loco*. Os volumes trabalhados em obras de infraestrutura, como os observados em obras de parques

eólicos, normalmente inviabilizam tal preparo *in loco*, havendo, assim, necessidade de estrutura específica e de grande porte.

No caso de obras eólicas, tal estrutura se dá através do conjunto usina (também chamada central dosadora de concreto, ou, simplesmente, central) e caminhões betoneira. Suas funções são, respectivamente, a de junção de insumos e a de mistura deles.

A usina é composta por silos misturadores, os quais recebem os insumos de areia, brita (com diferentes graduações, incluindo a possibilidade de pó de pedra), cimento, água e potenciais aditivos. A entrada dos insumos nos silos se dá através de operação centralizada, a qual pode ser feita automática ou manualmente, dependendo do nível de avanço tecnológico presente no sítio. Tal operação se dá por vácuo ou por esteiras, dependendo do tipo de insumo. Há também uma área com as caixas de entrada de cada insumo, e as com água também recebem gelo, cuja funcionalidade é o controle de temperatura. A entrada do cimento nos silos se dá diretamente do caminhão. A alimentação da entrada dos insumos se dá através de carregamento mecanizado, por pá carregadeira ou retroescavadeira, nos casos de areia, brita e pó de pedra. As caixas d'água são alimentadas por caminhões pipa, e a colocação de gelo normalmente é feita de maneira manual. Há, nos arredores da usina, um pátio de estocagem de insumos. A minimização dos deslocamentos das máquinas carregadeiras é uma iniciativa interessante de ser implementada pela gerência de obra no momento de concepção do *layout* do canteiro onde se localiza a usina.

A especificação do concreto, em termos de traço, resistência e tempo de cura, depende da finalidade para a qual o material é destinado. Por exemplo, concreto de nivelamento de fundo com f_{ck} de 25MPa, concreto da base com f_{ck} de 35MPa e o do fuste central superior com f_{ck} de 40MPa.

Os silos da usina agregam os insumos utilizando a gravidade, depositando-os verticalmente, na forma de concreto não totalmente misturado, no caminhão betoneira, quando ele se posiciona na área de carregamento, a qual fica logo abaixo dos silos. Os caminhões betoneira têm função dupla: transporte do concreto até a base e mistura dos insumos, através da rotação de sua estrutura de armazenamento traseira. Essa mistura é um passo importante no entendimento do processo, tendo em vista, por exemplo, que em bases próximas da usina há a recomendação de que os caminhões fiquem parados durante um período prévio ao início do deslocamento, para que haja tempo suficiente

para que a mistura dos materiais ocorra corretamente e o concreto apresente o desempenho esperado.

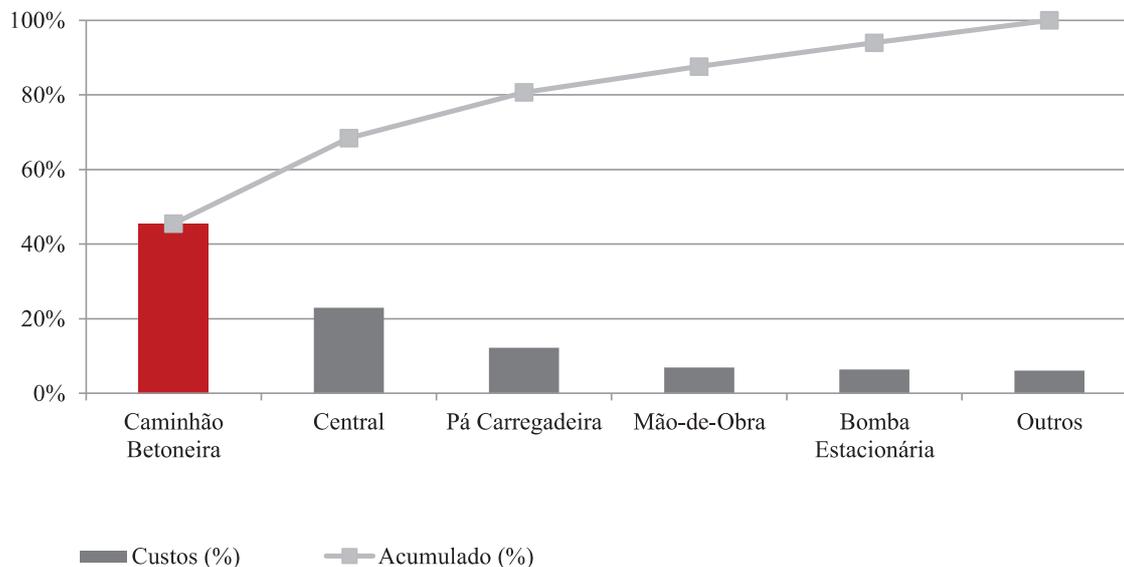
Na base, o concreto é depositado mecanicamente. Usualmente, utiliza-se bomba lança ou bomba estacionária, que são equipamentos específicos para a deposição de concreto. O transporte do material, na base, se dá diretamente do caminhão para a bomba e da bomba para a base, sendo essa última parte feita verticalmente e controlada manualmente. Para tanto, há necessidade de uma equipe multidisciplinar de apoio.

Ao chegar à base, o concreto passa por validações específicas para conferência de seu bom estado. Os mais comuns são inspeção visual e ensaio de *slump* (traduzido como queda, ensaio que representa o espalhamento cônico do concreto quando depositado verticalmente utilizando-se de um corpo de prova). Após validado, o material é transferido diretamente à bomba. Com a deposição do concreto na base, por um tubo polimérico, uma equipe de pedreiros, serventes e ajudantes se responsabiliza por espalhar homogeneamente o material por toda a base, vibrar (com auxílio de vibradores elétricos) o concreto ainda pastoso e nivelar a base para que se atinja a geometria de projeto. Fornecer as ferramentas corretas a essa equipe é fundamental para a qualidade do produto final: a base concretada.

Além da equipe de pedreiros, serventes e ajudantes supracitada, há a mobilização de mão de obra e instrumentos de apoio na periferia da base. Essa mão de obra inclui: técnico de qualidade, técnico de meio ambiente, técnico de segurança do trabalho e outros ajudantes. E esses instrumentos incluem: lona de proteção, formas para corpos de prova, containers de apoio, banheiros químicos, torres de iluminação, geradores (para a bomba, vibradores e torres).

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. A Figura 28 apresenta tal análise. Nela, destaca-se o principal item de custo: caminhões betoneira. Dessa forma, entende-se que a modelagem do transporte usina-base é o principal foco da modelagem da concretagem.

Figura 28: Gráfico com análise de Pareto dos principais itens de custo da concretagem.



Fonte: Bluhm e Monteiro, 2015.

Bluhm e Monteiro (2015) apresentam as equações que regem o cálculo do tempo de concretagem como função de três parâmetros básicos: volume da base, distância usina-base e número de caminhões betoneira utilizados. 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 dessas equações é:

$$TTO = t_{intervalo,u} + n_{ciclos,u} \cdot t_{padr\tilde{a}o} + t_{filas,u} + t_{acabamento}$$

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.

O modelo também apresenta uma equação específica para as filas, que são do tipo *first in, first out* (FIFO), ou seja, o primeiro elemento a entrar em fila também é o primeiro a sair dela. Ela é uma condicionante dada por:

$$t_{filas} = \begin{cases} \text{filas cumulativas, Caso (A)} \\ (i_{\text{último}} - 1) \cdot (t_{\text{descarregamento}} - t_{\text{carregamento}}), \text{Caso (B)} \\ (n_{\text{ciclos},u} - 1) \cdot ((n_{\text{caminhões}} \cdot t_{\text{carregamento}}) - t_{\text{padrão}}), \text{Caso (C)} \\ 0, \text{Caso (D)} \end{cases}$$

onde i indica o índice do último caminhão, ordenado por números naturais, t indica tempo, *descarregamento* indica a operação total de descarregamento (incluindo *slump*), *carregamento* indica a operação de carregamento do caminhão, n indica número, *padrão* indica o tempo de ciclo padrão como já explicado neste trabalho. Os casos de filas, denominados (A), (B), (C) e (D) representam a situação encontrada em campo. São eles:

- Caso (A): fila no descarregamento e saturação na volta do primeiro caminhão;
- Caso (B): apenas fila no descarregamento;
- Caso (C): apenas saturação na volta do primeiro caminhão;
- Caso (D): nenhuma das duas situações.

A saturação na volta é um fenômeno que ocorre no caso de o primeiro caminhão terminar seu primeiro ciclo padrão e voltar à usina em um instante de tempo no qual ainda há caminhões sendo carregados.

As condicionantes para a aplicação dessas equações é que a capacidade de fornecimento de concreto pela usina seja superior ao consumo requerido pelos caminhões. O modelo não fornece um valor exato para o tempo previsto de concretagem no caso (A) de filas, no qual ele apenas indica que há congestionamento de betoneiras, com ocorrência de filas excessivas desnecessariamente. Nesses casos, o presente trabalho recomenda a utilização, como *input* de dados, do menor número de caminhões mais próximo ao real utilizado em campo.

O modelo de concretagem, associado a uma análise crítica de todas as etapas do processo, confere maior previsibilidade à operação estudada, agregando

fundamentação teórica para obtenção de melhor cenário, desde que validado em campo, através de acompanhamentos periódicos.

5.3.4. 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.

A confiabilidade mecânica é de fundamental importância aos agentes construtores, pois lhes confere previsibilidade em seus resultados de produção. O próprio dimensionamento de equipamentos leva em consideração tal confiabilidade, pois se há expectativa de altas taxas de quebra, equipamentos adicionais são mobilizados na obra para que as frentes de serviço não fiquem comprometidas.

Por se tratar de um sistema de fenômenos indesejados e de natureza imprevista, 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 trabalho 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 OLS para minimização das diferenças entre o modelo previsto e as amostras reais.

A vantagem da utilização de tal ferramenta se dá na conferência de uma correlação entre os itens estudados e uma maior previsibilidade de um dos itens em função do outro. A desvantagem se dá na constante necessidade de refinamento do modelo, pois uma quantidade maior de amostras influencia diretamente a qualidade das conclusões obtidas.

Como o modelo aqui concebido varia obra a obra, ele é apresentado apenas no item seguinte deste trabalho, no qual discute-se a aplicação das diretrizes de otimização em projetos eólicos reais.

5.4. Otimização operacional: aplicações e discussões de diretrizes

As diretrizes de otimização apresentadas neste trabalho, através das diferentes abordagens para modelagens, foram aplicadas em 6 obras de complexos eólicos no Nordeste brasileiro, durante um período de 18 meses. Foram realizadas visitas técnicas em todos os sítios, as quais totalizaram 15 visitas – uma média de 2,5 visitas por obra. A relevância dos projetos visitados se dá na capacidade instalada deles: mais de 1,4GW; e do número de torres instaladas: mais de 550 torres. A título de ilustração, caso esses projetos somados configurassem um país fictício, ele estaria entre os 10 principais do mundo em termos de energia eólica, no momento da configuração deste trabalho.

O presente item apresenta os resultados obtidos em campo e as discussões dos desafios enfrentados na aplicação dos modelos, identificando suas potencialidades e pontos de melhoria. São abordadas as diferentes fases da obra: projeto, planejamento e operação.

5.4.1. Diretrizes de otimização de projeto

Tendo em vista a natureza logística das otimizações de projeto, a aplicação delas em campo se dá através das diretrizes de alocação de posições chave. 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 logística na alocação da usina.

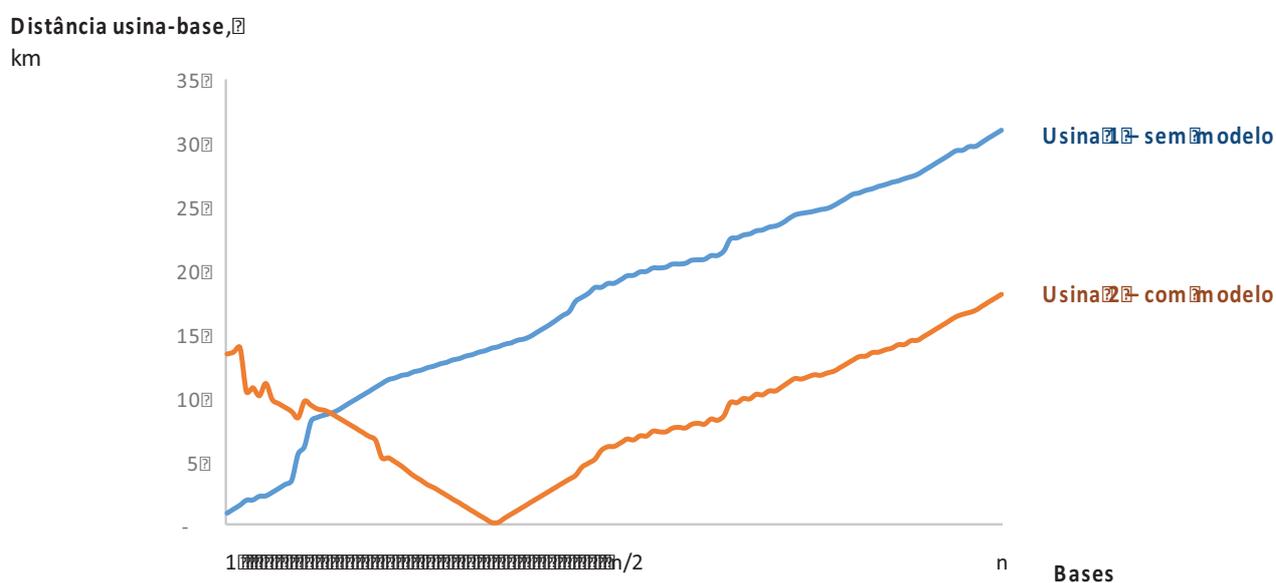
A solução inicialmente adotada, a qual não se utilizou do modelo deste trabalho, é a de instalar a usina em uma posição inicial e manter tal posição durante toda a duração da obra. Com aplicação da modelagem de otimização, foi identificada uma posição ótima para realocação da usina, diferente da posição 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.

A Figura 29 apresenta as reduções nos deslocamentos.

Figura 29: Redução dos deslocamentos usina-base através de realocação da usina de concreto com utilização de modelagem logística.



Fonte: Autor.

5.4.2. Diretrizes de otimização de planejamento

A otimização de planejamento tem como objetivo permitir que cada atividade atinja seu pleno potencial de produtividade, sem ser limitada por sua predecessora. Ela se mostra particularmente importante nos casos em que diferentes atividades sequenciais têm índices de produtividade potencial diferentes. Nesses casos, se não houver um intervalo adequado entre o início de tais atividades sequenciais, a sucessora necessariamente deve ter sua produtividade limitada superiormente pela produtividade da predecessora. Esse fenômeno ocorre em projetos caracterizados pela repetição em localidade, como discutido na revisão bibliográfica deste trabalho.

Obras eólicas são projetos assim caracterizados, principalmente no tocante a suas atividades civis. Isso pois há repetição, base a base, das atividades sequenciadas. Como delineado na identificação de atividades críticas, a produtividade da execução de fundações tem potencial de limitar o desempenho da execução de concretagem das bases. Isso pois ambos os índices de produtividade são discrepantes e a criação de um limitante artificial para o número de concretagens realizadas em um período de tempo (dia ou semana) traz maior ociosidade aos ativos mobilizados (como caminhões betoneira, usina dosadora de concreto e bombas lançadoras).

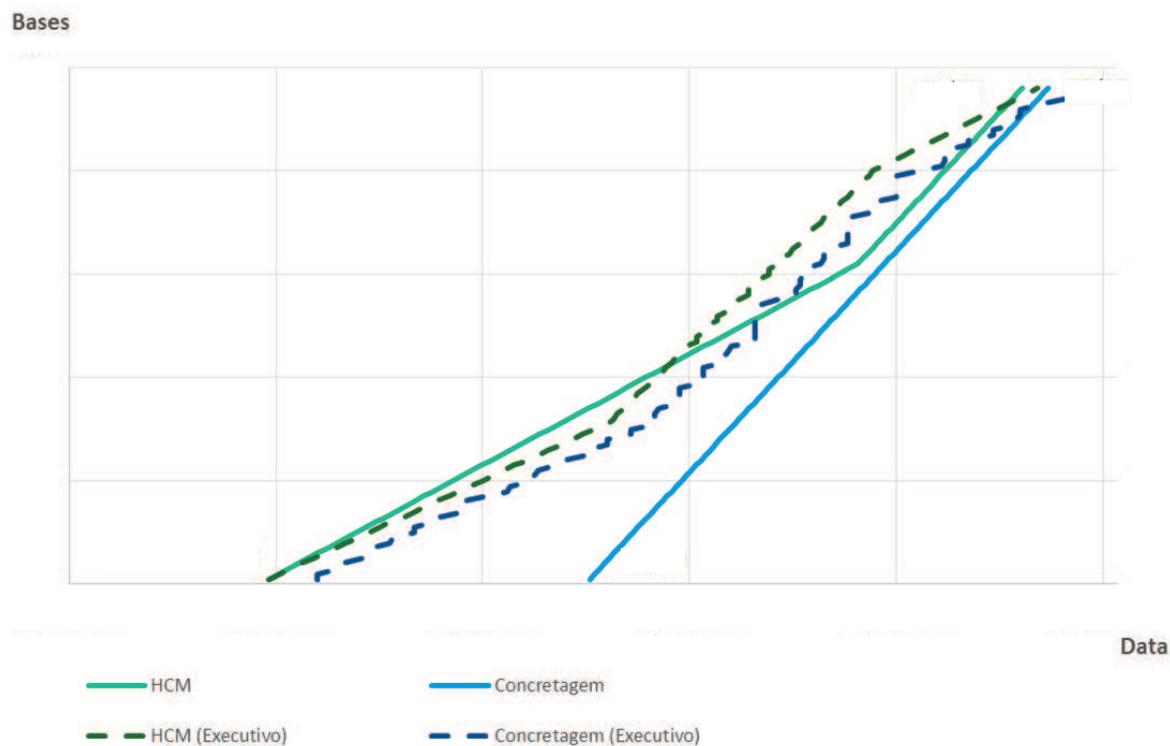
Tal discrepância ocorre devido ao fato de que a execução de fundação, no caso de fundações do tipo raiz ou hélice contínua monitorada (HCM), ocorre por estaca. Como cada base eólica usualmente contém várias estacas, a execução das fundações de uma única base não é discretizada por dia, e a execução de uma mesma base pode durar mais de um dia. Isso contrasta com a execução das concretagens, as quais são recomendadas que ocorram a uma taxa de uma concretagem por dia. Mais de uma concretagem por dia é possível, porém não recomendado. Uma concretagem com duração de mais um dia não é viável tecnicamente, pelo alto risco de ocorrência de juntas frias, o que pode comprometer estruturalmente a base.

O modelo de otimização de planejamento, seguindo as diretrizes de planejamentos baseados em localidade, foi implementado em uma obra. Nela, identificou-se ociosidade nas atividades de concretagem, ocasionada pela limitação de seus predecessores. Analisando individualmente tais predecessores (como carpintaria, armação, regularização de fundo de nível e fundações), identificou-se a causa raiz de tal limitação como a execução de fundações. Nesse projeto estudado, a solução de fundação adotada foi HCM, a qual tem uma produtividade diretamente proporcional ao número de máquinas hélice mobilizadas na obra. Pelo alto custo de tais máquinas, é comum evitar-se a mobilização de máquinas adicionais.

A Figura 30 indica a aplicação do modelo de otimização em comparação com o cronograma executivo adicional. Ela apresenta no eixo y a quantidade de bases executadas para ambas as atividades analisadas (HCM e concretagem) e no eixo x a linha do tempo. A política adotada é de aproveitar ao máximo a presença de apenas uma máquina HCM na obra. Porém, a condicionante externa de atendimento a marcos contratuais não permitiu a utilização de apenas uma máquina durante todo o período de execução de fundações. Foi definido como variável de controle, então, o intervalo entre o início das atividades de fundação e o início das atividades de concretagem,

entendendo, desde o princípio, a necessidade de mobilização de uma segunda máquina HCM.

Figura 30: Aplicação do modelo de otimização de cronograma através de análise das linhas de balanço das atividades de fundação (HCM) e concretagem.



Fonte: Autor.

A aplicação do modelo trouxe ganhos financeiros consideráveis ao projeto, tendo em vista que foram diminuídos os índices de ociosidade dos equipamentos de concretagem. A redução de custos obtida, levando-se em consideração a duração das atividades relativas a HCM, armação, concretagem e de mobilização da usina dosadora de concreto, foi da ordem de 20% dos custos totais dessas atividades.

5.4.3. Diretrizes de otimização de operações

A aplicação do modelo de simulação de eventos discretos nas operações de pavimentação tem como objetivo testar diferentes cenários sem com isso agregar custos adicionais aos investidores dos projetos eólicos. Para a avaliação e conseqüente comparação entre cenários, são identificados indicadores chave de performance, ou

KPIs (do inglês *key performance indicators*). No caso de pavimentação, aproveita-se a divisão do modelo nos dois processos (transporte e execução) e identifica-se diferentes indicadores específicos para ambos.

No caso do transporte, a principal variável de controle é o dimensionamento de escavadeiras hidráulicas e caminhões basculantes, com foco em caminhões basculantes tendo em vista a maior flexibilidade para mobilização e desmobilização deles, devido ao seu número mais elevado de equipamentos operando simultaneamente. Dessa forma, os KPIs para o transporte são: índice de ociosidade dos recursos *Escavadeira*; índice de ociosidade dos recursos *Basculante*; e quantidade de elementos de trabalho concluídos após a etapa *Descarregamento*. Os dois primeiros indicadores devem ser minimizados, enquanto que o terceiro deve ser maximizado. Mudanças nas variáveis de controle permite ganhos de balanceamento dos equipamentos através da comparação dos KPIs resultantes dos diferentes cenários.

No caso da execução, assim como no transporte, as principais variáveis de controle são as quantidades de equipamentos mobilizados em campo. Entretanto, neste segundo processo, há uma gama maior de equipamentos: motoniveladoras (ou tratores de esteira), tratores de pneus, caminhões pipa e rolos compactadores. Os KPIs continuam como os índices de ociosidade dos equipamentos, representados respectivamente pelos recursos *Motoniveladora*, *Trator com Grade*, *Pipa* e *Rolo*. Também se considera como um KPI a quantidade de elementos de trabalho que concluíram a etapa de *Compactação*.

Os ganhos da utilização do modelo se dão em dois sentidos: melhor dimensionamento através de otimização do balanceamento; e acompanhamento da performance real comparativamente à esperada. Com essas conclusões, pode-se analisar o desempenho individual dos caminhões e entender fatores que influenciam diretamente nos resultados finais.

A aplicação deste modelo em um complexo eólico específico permitiu a redução de caminhões basculantes sem comprometimento dos volumes diários transportados, tendo em vista redução no índice de ociosidade deles. Além disso, pôde-se analisar individualmente os caminhões, tanto em termos de viagens por dia, como, principalmente, em termos de custos por volume transportado.

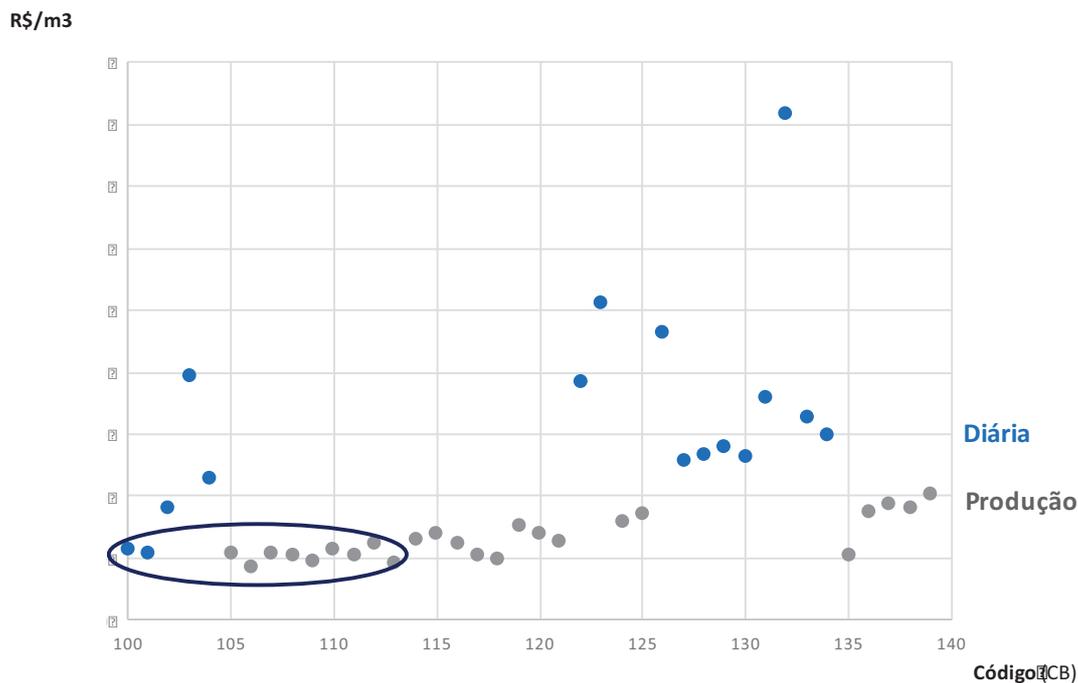
A Figura 31 apresenta uma análise crítica da performance individual dos caminhões basculantes no complexo em que se aplicou o modelo de otimização da pavimentação. Nela, o eixo y apresenta os custos por volume transportado (em R\$/m³)

e o eixo x indica o código de identificação dos caminhões (com o intuito de facilitar a visualização por parte da gerência de obra, não tendo, portanto, significado estatístico). Os pontos no gráfico de dispersão representam a performance, em termos de custos, dos caminhões, individualmente. Os valores financeiros foram ocultados por questões de confidencialidade. Percebeu-se uma alta variação nos custos de transporte, devidos a altas diferenças nas performances dos caminhões individualmente, mesmo após balanceamento provido pela modelagem.

O cenário modelado previa performances que gerassem custos dentro dos primeiros dois quadrantes inferiores apresentados no gráfico da Figura 31. Entretanto, diversos caminhões apresentaram comportamentos discrepantes ao previsto. Uma análise de causas-raiz permitiu à gerência de obra identificar fatores que influenciasssem tais resultados. Entre eles, um fator particular chamou a atenção: modelo de contratação. Ao se identificar qual tipo de modelo de contratação (por diária ou por produção), concluiu-se que os caminhões a diária, com poucas exceções, eram aqueles que apresentavam piores desempenhos. O gráfico, então, apresenta, por diferenciação de cores, os dois modelos de contratação, além de destacar o grupo de caminhões com menor custo.

A principal conclusão de aplicação do modelo é que ele fornece, além do balanceamento já esperado, também uma diretriz de previsão de custos, a qual, se não seguida pelos acompanhamentos dos desempenhos reais, indica falhas operacionais. O modelo, entretanto, não substitui a sensibilidade da equipe gerencial de campo, a qual é fundamental para a identificação da causa raiz nas falhas de desempenho. Dessa forma, o modelo é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, identificando oportunidades de melhoria, mas requerendo a complementaridade do senso crítico humano para emissão do diagnóstico final para as melhorias operacionais.

Figura 31: Acompanhamento do desempenho dos caminhões basculantes em obra, com identificação do grupo de melhores resultados.



Fonte: Autor.

Quanto à concretagem, o modelo preditivo traz a possibilidade de um melhor planejamento do período em que ocorrem concretagem da base. Como visto na modelagem do planejamento de cronograma de obra, 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.

Percebe-se que, como um dos parâmetros chave na entrada do modelo é a distância usina-base, e como tal parâmetro pode variar consideravelmente ao longo do período de concretagens, o dimensionamento ótimo de caminhões betoneira também pode ser variável. A política de mobilização de caminhões, então, é função do tipo de planejamento global esperado para a execução das bases e deve utilizar a modelagem preditiva como principal fundamentador técnico.

O modelo preditivo foi aplicado em duas obras. Na primeira, apresentada na Figura 32, ele foi aplicado com concretagens já em execução. Na segunda, apresentada na Figura 33, ele foi aplicado no início das concretagens. Observa-se, portanto, que a

principal diferença entre ambos os resultados apresentados é a presença, na segunda obra, de um período de curva de aprendizado inicial, no qual os executores de obra ainda estavam em processo de adaptação às atividades de concretagem.

Em ambos os gráficos, o eixo y representa a duração da concretagem e o eixo x a linha do tempo, o que classifica tais gráficos como séries históricas. O esquema de cores também é o mesmo, com o modelo representado em verde e o realizado em cinza. A diferença, em termos de formato, de ambos os gráficos se dá no sentido que o primeiro representa uma obra de maior duração (logo eixo x mais alongado) e o segundo representa uma obra com bases com menor variação de distância (diferença nas escalas do eixo y).

Figura 32: Modelo preditivo de concretagem aplicado na primeira obra.

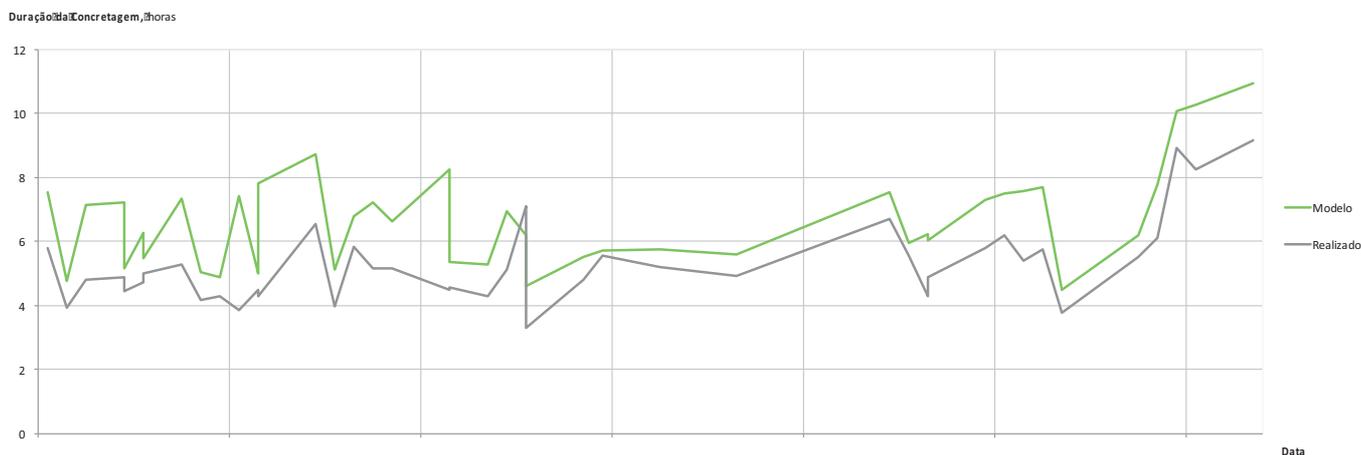
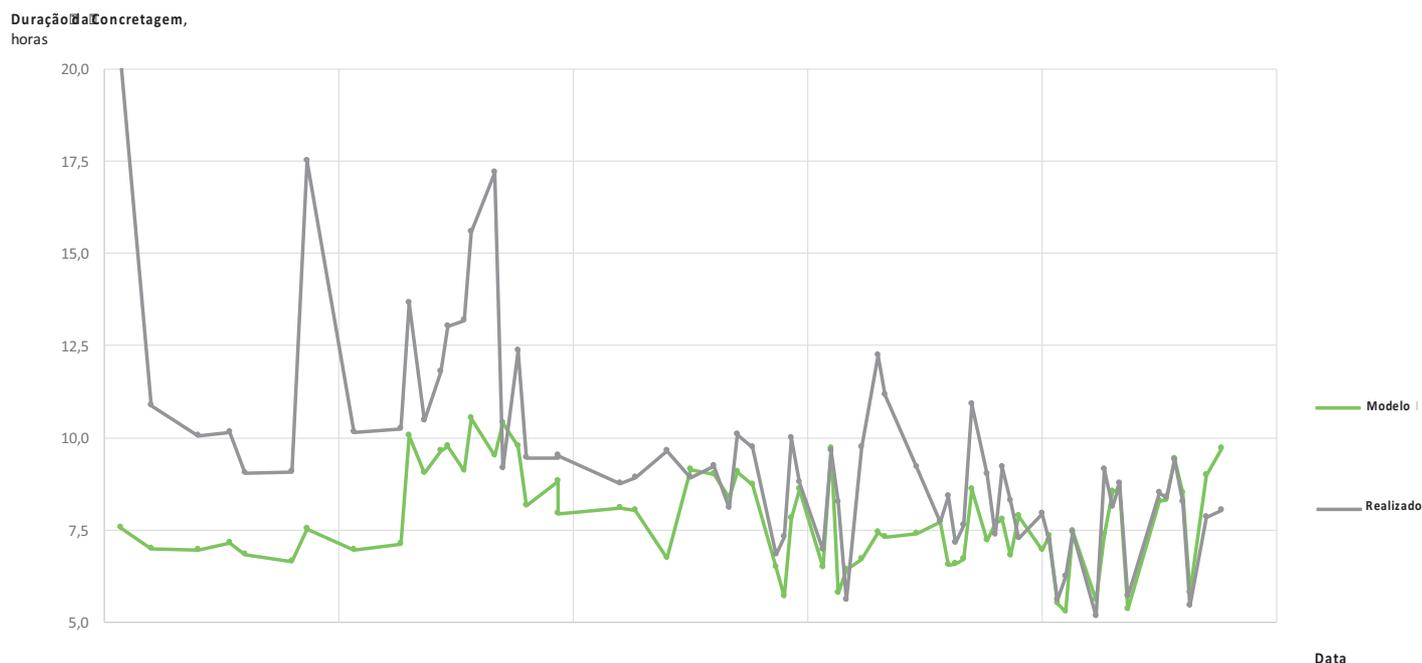


Figura 33: Modelo preditivo de concretagem aplicado na segunda obra.



Fonte: Autor.

Considera-se que o modelo prevê com robustez o comportamento das concretagens, podendo ser ajustado quanto a particularidades de cada obra (por exemplo nos dados de entrada de velocidade média dos caminhões). Destaca-se o último período de aplicação do modelo, no qual as correções foram feitas: as 20 últimas bases concretadas apresentadas na Figura 33 apresentam diferença entre modelo e realizado na ordem de 20 minutos, o que é consideravelmente baixo para um processo da ordem de 8h de duração e que apresenta, na realidade, diversas imprevisibilidades.

Além da robustez já citada, a utilização do modelo permitiu ganhos financeiros em um melhor dimensionamento de caminhões betoneira nas obras em que foi aplicado. Os ganhos financeiros são da ordem de 25% dos custos com transporte de concreto, excluindo-se da análise os gastos com combustível, os quais não são função da operação, e sim da localização da usina, assunto abordado nas otimizações de projeto.

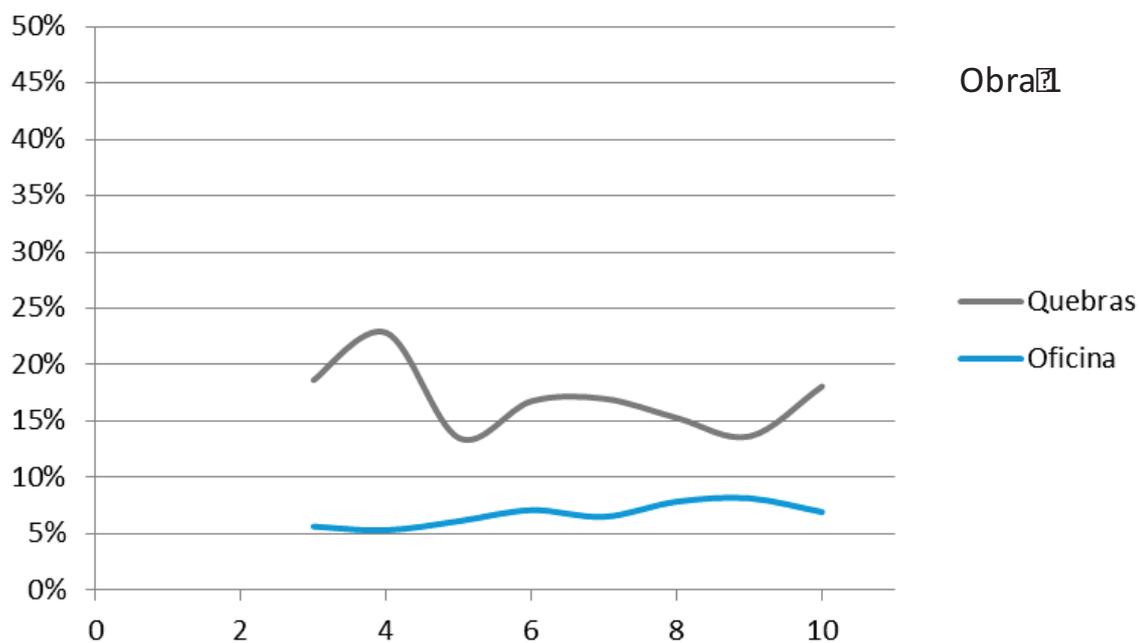
Quanto à aplicação do modelo de disponibilidade mecânica, foram coletados dados de quebras de máquinas em 5 das 6 obras visitadas. Tais dados permitiram a criação de um acompanhamento das quebras de acordo com desempenhos esperados pela modelagem obtida por análise de dados históricos. A aplicação de regressão não linear, por exemplo, permitiu otimização na determinação do orçamento alocado para a oficina, tendo em vista diferentes níveis de desgastes geográficos. Isso pode ser

observado, por exemplo, na comparação entre obras localizadas em dunas e aquelas localizadas em montanhas. Além dos valores absolutos nas quebras mecânicas, os tipos de quebra também variam consideravelmente com as condições geográficas.

Os resultados aqui expostos se referem à comparação de duas obras, as quais apresentaram geografias e políticas de manutenção consideravelmente distintas. Com o estudo comparativo, pôde-se criar uma política de investimentos em oficina, de modo a otimizar o retorno de tais gastos, minimizando-se, assim, os custos na balança perdas por taxas de quebras *versus* gastos com investimentos em manutenção. Para fins de apresentação dos resultados, as obras são chamadas de *obra 1* e *obra 2*. Ressalta-se que essas obras não são as mesmas apresentadas na análise da concretagem.

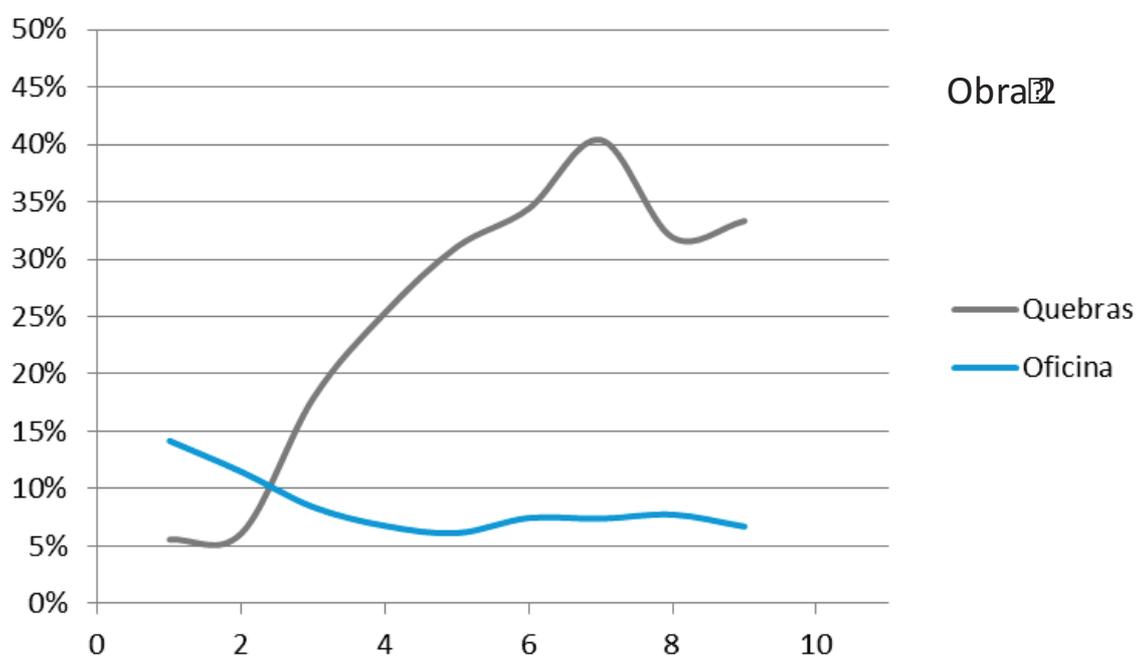
As Figuras 34 e 35 ilustram como há correlação negativa entre investimento despendido com pessoal na oficina e índice de quebras. Ambos os dados são dados em valores percentuais. Elas se referem, respectivamente, às obras 1 e 2. A obra 1, de geografia menos abrasiva e maior investimentos em oficina em seu início, apresenta desempenhos mecânicos melhores que a obra 2. Em ambos os gráficos o eixo y indica as porcentagens (tanto para quebras como para investimentos em oficina) e o eixo x indica os meses do ano.

Figura 34: Comparativo entre investimentos na oficina e taxas de quebras, obra 1.



Fonte: Autor.

Figura 35: Comparativo entre investimentos na oficina e taxas de quebras, obra 2.

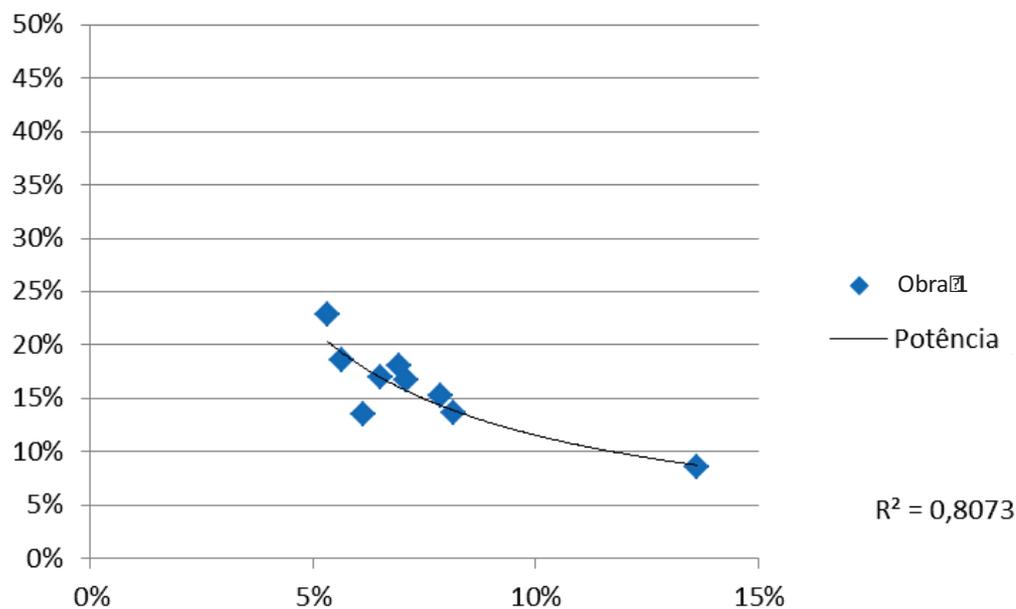


Fonte: Autor.

O comportamento espelhado dos gráficos das Figuras 34 e 35 indica a correlação negativa esperada entre ambas as taxas apresentadas. Entender matematicamente tal correlação permite a identificação do orçamento ótimo para oficina, em função das diferentes realidades de geografias das obras.

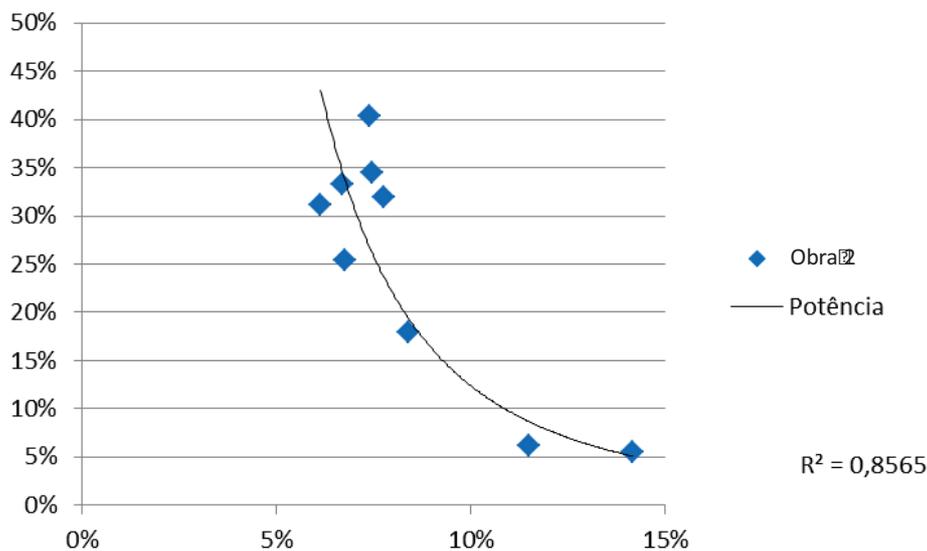
As Figuras 36 e 37 apresentam tal análise da correlação, através de regressão simples não linear. As Figuras 36 e 37 se referem às obras 1 e 2, respectivamente. Em ambas o eixo y indica as taxas de quebra e o eixo x os investimentos em oficina, ambos dados em valores percentuais. Cada ponto da análise representa os índices agregados de um mês de obra.

Figura 36: Regressão simples não linear entre índices de quebra (y) e investimentos em oficina (x), obra 1.



Fonte: Autor.

Figura 37: Regressão simples não linear entre índices de quebra (y) e investimentos em oficina (x), obra 2.



Fonte: Autor.

Valores de 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.

A diferença obtida nos resultados de oficina ótima entre as obras 1 e 2, na ordem de 2 pontos percentuais, mostra a influência direta da geografia sobre a política de manutenção. Os valores absolutos das oficinas ótimas não são aqui apresentados por questões de confidencialidade. De todo modo, a aplicação do modelo em campo foi considerada positiva por gerar uma política de manutenção melhor fundamentada e foram obtidos ganhos financeiros diretos com as mudanças em tal política.

5.4.4. Análise de ganhos

A aplicação dos diferentes modelos, nas diferentes fases de obra, em diferentes complexos eólicos confere ao presente trabalho uma validação técnica da viabilidade das iniciativas apresentadas. Tendo em vista a potencialidade de ganhos financeiros, incluindo aquela já obtida com as aplicações aqui apresentadas, considera-se que as presentes iniciativas devem ser incluídas dentro da sistemática de execução de obras civis de parques eólicos, em particular no Nordeste brasileiro, onde ocorreram as validações.

Os ganhos se dão individualmente, nas atividades críticas, seja nas esferas de projeto, planejamento ou operação. Entretanto, percebe-se potencial de integração dos modelos individuais, conferindo uma visão global das otimizações nas obras. Um exemplo de integração de modelos se dá na identificação de basculantes críticos, a qual inclui tanto o modelo de pavimentação (simulação de eventos discretos) como o de confiabilidade mecânica (regressão simples não linear).

Recomenda-se, como melhoria contínua das iniciativas aqui apresentadas, a implementação delas em novas obras e a coleta de um maior número ainda de dados, para melhor refinamento dos modelos e criação de um banco de dados universal de produtividades que embase melhor as decisões dos agentes responsáveis. Com isso, pode-se obter ainda melhores resultados financeiros e uma maior viabilidade técnico-financeira da fonte eólica como alternativa real no cenário energético brasileiro.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho concebeu e utilizou 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. As iniciativas, embasadas na literatura de diversas ferramentas de modelagem diferentes, trouxeram ganhos consideráveis nas atividades estudadas.

O estudo descritivo das obras civis de parques eólicos permitiu a identificação das atividades críticas, tanto em termos de cronograma como em termos de orçamento. Com isso, tais atividades foram individualmente modeladas. Os modelos gerados foram: projeto logístico de posições chave; planejamento de cronograma otimizado das atividades críticas; operações de pavimentação; operações de concretagem da base; e política de manutenção de máquinas. As soluções de modelagem adotadas foram, respectivamente: teoria de grafos; planejamento baseado em localidade; simulação de eventos discretos; teoria de filas; e regressão simples não linear.

Exemplos de ganhos obtidos são: redução de 53 mil km nos deslocamentos usina-base em uma única obra; redução de 20% dos custos com fundação, armação e concretagem graças a redução do tempo necessário de mobilização das equipes responsáveis por tais atividades; balanceamento de caminhões basculantes e identificação de causas raiz de mal desempenho no transporte de material de jazida para pavimentação dos acessos e plataformas; 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.

O presente trabalho, então, atingiu o objetivo de conceber e utilizar iniciativas individuais de otimização que 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. O teste e validação em campo das iniciativas confere maior robustez à eficácia delas. E 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

- Amarante, O. A. C. *et al.* *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*, 2011.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL*, 2015.
- Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica). *Boletim Anual de Geração Eólica 2015*. São Paulo, 2015.
- Ballobás, B. *Modern Graph Theory*. Nova Iorque: Springer, 1ª edição, 1998.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). *Perspectivas do Investimento 2010-2013*. Rio de Janeiro, 2011.
- Bhargava, A., Anastasopoulos, P. Ch., Labi, S., Sinha, K. C., Mannering, F. L. *Three-Stage Least-Square Analysis of Time and Cost Overruns in Construction Contracts*. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 136, pp. 1207-1218, 2010.
- Biggs, N. *Algebraic Graph Theory*. Cambridge: University of Cambridge Press, 2ª edição, 2001.
- Bluhm, B. B., Monteiro, A. *Estudo Logístico do Processo de Concretagem da Base de Torre Eólica. Brazil Wind Power 2015*, 2015.
- Büchmann-Slorup, R., Niclas, A., Lars, F. P. *Criticality in Location-Based Management of Construction*. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2012.
- Camargo-Schubert Engenharia. *Atlas Eólico Bahia*. Bahia, 2013.
- Catalani, G., Ricardo, H. S. *Manual Prático de Escavação: Terraplenagem e Escavação em Rocha*. Rio de Janeiro: Pini, 2007.

Changali, S., Mohammad, A., Nieuwland, M. *The Construction Productivity Imperative*. Nova Iorque: McKinsey & Company, 2015.

Chwif, L., Medina, A., Vieira, D. R., Pércora Jr, J. E., Pereira, W. I. *Introdução ao SIMUL8: Um Guia Prático*. São Paulo: Ed. dos Autores, 2012.

Côrtes, C. S. *Modelo de Decisão para a Programação de Entrega de Concreto Produzido em Centrais*. Universidade de São Paulo, 2011.

Davendra, D. *Traveling Salesman Problem and Applications*. Rijeka: InTech, 1^a edição, 2010.

Dekker, R. *Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis*. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51, pp. 229-240, 1996.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT). *Manual de Custos Rodoviários*. Rio de Janeiro, 2003.

Edwards, D. J., Holt, G. D. *Construction Plant and Equipment Management Research: Thematic Review*. *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 186-206, 2009.

Eiselt, H. A., Gendreau, M., Laporte, G. *Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem*. *Operations Research*, Vol. 43, Issue 2, pp. 231-242, 1995.

Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE). *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro, 2016.

Farahani, R. Z., Miandoabchi, E. (ed). *Graph Theory for Operations Research and Management: Applications in Industrial Engineering*. Hershey: IGI Global, 2013.

Fernandes, T. C. *Avaliação de Desempenho na Construção de Parques Eólicos Baseada em Simulação de Eventos Discretos*. Universidade Federal do Ceará, 2015.

Gkritza, K., Labi, S. *Estimating Cost Discrepancies in Highway Contracts: A Multistep Econometric Approach. Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 134, pp. 953-962, 2008.

Global Wind Energy Council (GWEC). *Global Wind Report: Annual Market Update 2015*. Bruxelas, 2015.

Global Wind Energy Council (GWEC). *Global Wind Energy Outlook 2016*. Bruxelas, 2016.

Golumbic, M. C. *Algorithmic Graph Theory and Perfect Graphs*. San Diego: Elsevier, 2^a edição, 2004.

Goodrich, M. T., Tamassia, R. *Algorithm Design and Applications*. Nova Iorque: Wiley, 1^a edição, 2014.

Halpin, D. W., Riggs, L. S. *Planning and Analysis of Construction Operations*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1992.

Harris, R. B., Ioannou, P. G. *Repetitive Scheduling Method*. Ann Arbor: University of Michigan, 1998.

Hoffman, K. L., Padberg, M., Rinaldi, G. *Traveling Salesman Problem. Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, pp. 1573-1578, 2016.

International Organization for Standardization (ISO). *ISO 55000 – Asset Management – Overview, Principles and Terminology*, 2014.

Kenley, R., Seppänen, O. *Location-Based Management for Construction: Planning, Scheduling and Control*. London: Spon Press, 2010.

Kenley, R., Seppänen, O. *Location-Based Management of Construction Projects: Part of a New Typology for Project Scheduling Methodologies. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 2009.

Kim, Y. W., Ballard, G. *Management Thinking in the Earned Value Method System and Last Planner System. Journal of Management in Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 223-228, 2010.

Kisi, K. P. *Estimation of Optimal Productivity in Labor-Intensive Construction Operations*. University of Nebraska-Lincoln, 2015.

Lima, R. X., Nobre Júnior, E. F., Prata, B. A., Weissmann, J. *Distribution of Materials in Road Earthmoving and Paving: Mathematical Programming Approach. Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 139, pp. 1046-1054, 2013.

Lucko, G. *Productivity Scheduling Method Compared to Linear and Repetitive Project Scheduling Methods. Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 134, pp. 711-720, 2008.

International Renewable Energy Agency (IRENA). *30 Years of Policies for Wind Energy: Lessons from 12 Wind Energy Markets*. Abu Dhabi, 2013.

Oliveri, H., Granja, A. D., Picchi, F. A. *Planejamento Tradicional, Location-Based Management System e Last Planner System: Um Modelo Integrado. Ambiente Construído*, Vol. 16, No. 1, pp. 265-283, 2016.

Pinto, M. *Fundamentos de Energia Eólica*. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Prata, B. A., Nobre Júnior, E. F., Barroso, G. C. *Dimensionamento de Equipes Mecânicas em Obras de Terraplenagem Usando Redes de Petri Coloridas*. Universidade Federal do Ceará, 2005.

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). *Renewables 2016 Global Status Report*. Paris, 2016.

Smith, S. D., Osborne, J. R., Forde, M. C. *Analysis of Earth-Moving Systems Using Discrete-Event Simulation. Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 121, pp. 388-396, 1995.

Sztrik, J. *Basic Queueing Theory*. Debrecen: University of Debrecen, 2012.

United Nations Environment Programme (UNEP). *Global Trends in Sustainable Energy Investment 2010: Analysis of Trends and Issues in the Financing of Renewable Energy and Energy Efficiency*. Paris, 2010.

Wanderley, C. A., Cullen, J., Tsamenyi, M. *Privatisation and Electricity Sector Reforms in Brazil: Accounting Perspective. Journal of Accounting in Emerging Economies*, Vol. 1, No. 1, pp. 53-77, 2011.

Wu, S., Gebraeel N., Lawley, M. A., Yih, Y. *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, 2007.

Zankoul, E., Khoury, H. *Simulation of On-Shore Wind Farm Construction Process in Lebanon. The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining*, 2014.

