

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Relatório de Estágio Supervisionado  
Realizado na Eólica Tecnologia Ltda.

Gustavo Barreto Rangel

Campina Grande - PB  
Novembro de 2015

GUSTAVO BARRETO RANGEL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO REALIZADO NA EÓLICA  
TECNOLOGIA LTDA.

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientadora: Professora Maria de Fátima Queiroz Vieira, PhD

Campina Grande - PB

Novembro de 2015

Dedico este trabalho aos meus pais, Fábio e  
Betina, exemplos de dignidade, amor e  
caráter, que com tanto esforço conseguiram  
realizar o sonho de ver os seus dois filhos  
formados.

# Lista de Tabelas

1	Turbinas e período dos dados fornecidos da Central Eólica . . . . .	17
2	Anomalias detectadas na CP do AEG06 . . . . .	26

# Lista de Figuras

1	Centrais eólica da Eólica Tecnologia . . . . .	12
2	Equipe de O&M da turbinas eólicas . . . . .	14
3	Equipe de O&M da infraestrutura elétrica . . . . .	15
4	Almoxarifado de peças sobressalentes da Central Eólica. . . . .	16
5	Almoxarifado da Central Eólica. . . . .	16
6	Tabela de produção, eficiência e velocidade do vento do parque . . . . .	19
7	Valores de produção gerada, esperada e fator de capacidade médios anuais. . . . .	20
8	Tabela da disponibilidade real e perda de produção do parque. . . . .	22
9	Valores de perda de produção devido ao tempo de parada, perda de produção online e disponibilidade médios anuais. . . . .	23
10	Curvas de Potência para a Turbina 06. . . . .	25
11	Tabela dos dados de produção, eficiência e velocidade do vento da Turbina 06. . . . .	27
12	Tabela dos dados de disponibilidade e perdas produtivas da Turbina 06. . . . .	28
13	Produção gerada, esperada e de capacidade médios anuais da Turbina 06. . . . .	29
14	Perda de produção devido ao tempo de parada, perda de produção <i>online</i> e disponibilidade médios anuais da Turbina 06. . . . .	29
15	Gráfico da tendência de aumento de um sinal de temperatura . . . . .	30
16	A ferramenta de CPA sendo aplicada a um sinal de temperatura . . . . .	31
17	Sinal de um conjunto de dados com 200 elementos . . . . .	35
18	Gráfico do <i>Cumulative Sum</i> (CUSUM) de um conjunto de dados . . . . .	36
19	Gráficos CUSUM do conjunto de dados na ordem original e de 4 amostras <i>bootstrap</i> . . . . .	38

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>8</b>
1.1	Objetivos . . . . .	8
1.2	Motivação . . . . .	9
1.3	Estrutura do Trabalho . . . . .	10
<b>2</b>	<b>A Empresa Eólica Tecnologia Ltda.</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Atividades Desenvolvidas</b>	<b>13</b>
3.1	Serviço de <i>Due Diligence</i> . . . . .	13
3.1.1	Equipe e Programa de O&M . . . . .	14
3.1.2	Análise do Estoque de Peças Sobressalentes . . . . .	15
3.1.3	Análise dos Dados SCADA . . . . .	17
3.1.3.1	Descrição dos Dados do SCADA . . . . .	17
3.1.3.2	Análise da Central Eólica . . . . .	17
3.1.3.3	Dados de Produção, Eficiência e Velocidade do Vento da Central Eólica . . . . .	18
3.1.3.4	Disponibilidade Real e Perda de Produção da Central Eólica	20
3.1.3.5	Análise Individual das Turbinas Eólicas . . . . .	24
3.2	Ferramenta de Detecção Automática de Falhas em Aerogeradores . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>32</b>
	<b>Referências</b>	<b>33</b>
	<b>Apêndice A - Análise de Mudança de Ponto</b>	<b>34</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Este relatório refere-se à modalidade de estágio supervisionado desenvolvido pelo autor como atividade curricular do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. O estágio foi realizado nas dependências da Eólica Tecnologia, tendo como supervisores, por parte da empresa, o engenheiro e diretor técnico Gustavo de Novaes Pires Leite e o engenheiro de projetos Guilherme Pedrosa, e, na UFCG, como orientadora, a professora Maria de Fátima Queiroz Vieira. O estágio se desenvolveu no período de 27 de julho de 2015 a 11 de setembro de 2015 resultando em um total de 212 horas, objetivando implementar uma ferramenta de detecção automática de falhas em aerogeradores, além de auxiliar nas demais atividades da empresa na área de engenharia.

A Eólica Tecnologia está situada na cidade de Recife, Pernambuco, e atua no mercado de energias renováveis, principalmente em energia eólica, há quinze anos. A empresa participa da Operação e Manutenção de cerca de 200 MW de capacidade instalada de centrais eólicas localizadas nos estados de Pernambuco, Bahia e Rio Grande do Norte. No capítulo 2, são abordados mais detalhes da empresa.

### 1.1 Objetivos

O objetivo do estágio foi o desenvolvimento de uma ferramenta para detecção automática de falhas em aerogeradores. A ferramenta é utilizada para realizar a aquisição, processamento e armazenamento de dados provenientes do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) das turbinas eólicas e sua aplicação objetiva trazer os seguintes

benefícios:

- Maximização da disponibilidade do parque eólico;
- Minimização de falhas de componentes;
- Minimização do tempo de parada devido a falhas nos sensores ou componentes;
- Melhor planejamento de O&M;
- Aumentar a produção, eficiência e fator de capacidade (ver página 11) dos parques eólicos;
- Maximização do lucro.

Além disso, o estágio teve como objetivo apoiar as atividades da empresa, como foi o caso da realização do serviço de *due diligence*, que será tratado mais adiante nesse trabalho.

## 1.2 Motivação

A principal motivação desse estágio foi o desenvolvimento de uma ferramenta de auxílio à operação e manutenção das centrais eólicas da empresa Eólica Tecnologia. Entre as principais funcionalidades da ferramenta destaca-se a análise automática de dados do sistema SCADA, visando aumentar o desempenho das turbinas eólicas e reduzir o número de falhas potenciais.

Com o objetivo de se tornar mais sustentável, a indústria eólica cresce desafiando inúmeras barreiras de desenvolvimento. Apesar de ser uma fonte de energia disponível de maneira infinita do meio ambiente, a extração de energia do vento possui um elevado custo associado. O sucesso de projetos eólicos depende fortemente do parâmetro denominado custo energético (COE), que pode ser minimizado através do aumento da capacidade de produção e redução dos custos de operação e manutenção (O&M).

É comum dar ênfase à capacidade de produção através do aumento do tamanho da turbina, e no número de turbinas eólicas instaladas. Os custos de operação e manutenção das turbinas, porém, ainda continuam sendo um problema cuja relevância cresce com o aumento na demanda de energia eólica. Apesar da disponibilidade, sistemas supervisórios

de aquisição e controle de dados (SCADA) são raramente utilizados com o intuito de melhorar a performance dos aerogeradores.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: Este capítulo de introdução, onde são apresentados a problemática e os objetivos do estágio. Em seguida, no capítulo 2, faz-se uma breve apresentação da empresa, e do seu fundador e diretor, abordando as centrais eólicas nas quais ela tem participação, projetos e especificidades. Em seguida no capítulo 3, são apresentadas as atividades desenvolvidas durante o estágio, agrupadas em duas categorias: i) serviço de *due diligence* ii) pesquisa e desenvolvimento da ferramenta de análise de mudança de ponto, ou *change-point analysis*. O texto conclui apresentando considerações onde são discutidos os eventos marcantes na formação do estagiário durante a realização das atividades do estágio.

## Capítulo 2

# A Empresa Eólica Tecnologia Ltda.

A Eólica Tecnologia foi fundada em 2000 pelo seu atual presidente Everaldo Alencar Feitosa, Ph.D (Universidade de Southampton, Reino Unido), um consultor reconhecido e respeitado por várias instituições de energias renováveis, ex-presidente do Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e vice-presidente do World Wind Energy Association (WWEA). Um pioneiro no desenvolvimento da energia eólica, ele foi o responsável pela implementação da primeira turbina eólica do Brasil em 1992, bem como, do maior sistema eólico-diesel híbrido das Américas.

A Eólica Tecnologia é uma das empresas líderes e pioneiras no tocante ao projeto, desenvolvimento, instalação e operação de parques eólicos no Brasil. A empresa participa da O&M de 192 MW de capacidade instalada em centrais eólicas localizadas nos estados de Pernambuco, Bahia e Rio Grande do Norte. Um mapa com o resumo dessas centrais pode ser visto na figura 1

A Eólica Tecnologia também tem participação, como geradora de energia, em 11 centrais eólicas que estão em fase de construção nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte, totalizando uma capacidade instalada de 356 MW. Outros 1500 MW estão sendo planejados para participação nos próximos leilões de energia no mercado regulado e também para comercialização no mercado livre. A Eólica Tecnologia saiu vitoriosa no leilão de energia A-3/2014 com um projeto em Pernambuco de 82 MW. A empresa já visa o mercado de energia solar, começando a desenvolver projetos nessa área.

A sede da empresa - onde trabalham cerca de quinze funcionários - está localizada em Recife, Pernambuco, na histórica Rua do Bom Jesus, número 183 no bairro do Recife Antigo.

Figura 1: Centrais eólica da Eólica Tecnologia



Fonte: <http://www.eolica.com.br>

Os profissionais da Eólica Tecnologia são encorajados a se capacitar e são encorajados a desenvolver um perfil de profissionais multitarefas. Neste sentido, pode se dizer que o engenheiro ou colaborador da empresa, além de dominar suas competências técnicas, desenvolve competência na gestão do negócio de energia eólica e também na gestão de projetos. Desta maneira, os colaboradores técnicos da Eólica são focados no processo de melhoria da gestão e, portanto participam de todo o processo criativo e de mudança da empresa, proporcionando um ambiente favorável à inovação e ao aprendizado.

Foi neste ambiente que o estagiário desenvolveu suas atividades com destaque para o projeto apresentado no próximo capítulo.

# Capítulo 3

## Atividades Desenvolvidas

Este capítulo descreve as duas principais atividades realizadas durante o estágio.

### 3.1 Serviço de *Due Diligence*

A Éolica Tecnologia foi contratada para realizar o serviço de *due diligence* em parques da região Sul e Nordeste do Brasil. *Due diligence*, ou diligência prévia, é o ato de conhecer em detalhes a real situação de uma empresa antes de propor processos de fusões ou aquisições. Nesse caso, as empresas envolvidas são mantidas em sigilo por questões de confidencialidade de contrato [2]. O serviço é organizado em seis partes: i) Auditoria da capacidade de produção de energia;

ii) Avaliação das turbinas;

iii) Auditoria técnica da infraestrutura elétrica e civil;

iv) Auditoria da operação e manutenção;

v) Auditoria básica do projeto;

vi) Resumo de custos.

O estagiário e o engenheiro responsável Guilherme Pedrosa ficaram com a responsabilidade da auditoria da operação e manutenção.

A auditoria da operação e manutenção consistiu na avaliação dos procedimentos, equipamentos e equipes responsáveis pela(O&M) das centrais eólicas e do estoque atual de peças sobressalentes. Além disso, foi realizado uma análise dos dados do SCADA das centrais eólicas com o objetivo de detalhar aspectos operacionais do parque eólico, tais

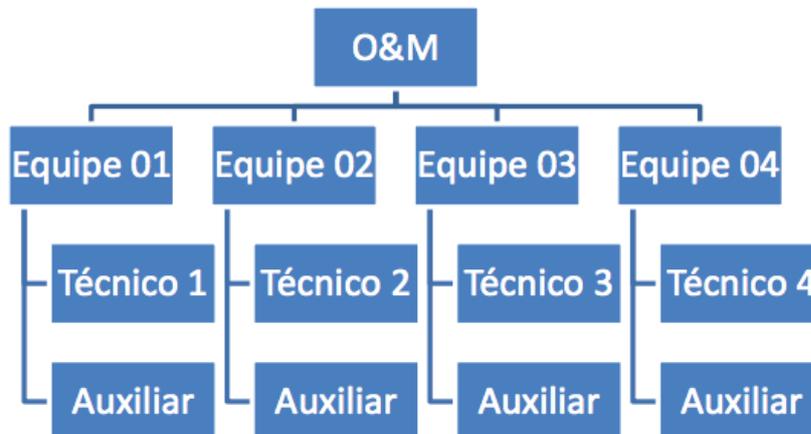
como: disponibilidade, eficiência e análise da curva de potência individual das turbinas.

Como nesse serviço foram avaliadas catorze centrais eólicas, uma delas foi escolhida para exemplificar o que foi realizado na auditoria da operação e manutenção. O processo de análise de cada central eólica durante o processo de *due diligence* foi idêntico. O parque está localizado na região Sul do Brasil.

### 3.1.1 Equipe e Programa de O&M

Na época da *due diligence* a gestão geral da O&M da Central Eólica era “primarizada”, ou seja, todos os funcionários responsáveis pela O&M do parque eram funcionários da empresa dona da central, sendo quatro equipes responsáveis pelas turbinas eólicas e estruturadas conforme apresentado na Figura 2. Três equipes trabalhavam em horário comercial fazendo trabalho preventivo e corretivo e uma equipe trabalhava em horário noturno, fazendo controle e manutenções preventivas.

Figura 2: Equipe de O&M da turbinas eólicas



Fonte: autoria própria

A equipe de O&M era responsável pela infraestrutura elétrica da Central Eólica está organizada conforme é apresentado na Figura 3.

As equipes de O&M elétrica eram responsáveis pela operação de toda infraestrutura da central eólica: subestação coletora elevadora, rede de média tensão, casetas das turbinas e linha de transmissão. Executavam apenas manutenções corretivas rotineiras e de pequeno porte.

Figura 3: Equipe de O&amp;M da infraestrutura elétrica



Fonte: autoria própria

As manutenções corretivas de grande porte e as de caráter preventivo (semestrais e anuais) não eram realizadas na Central Eólica. Era necessária uma ação urgente para contratação de empresa especializada para a realização de uma manutenção preventiva de grande porte em toda infraestrutura elétrica da central, dado que a equipe própria não tinha treinamento nem os equipamentos necessários para realização de tal serviço.

Em suma, com relação à análise de O&M, constatou-se que:

1. A central eólica operava de forma precária, com os cronogramas de manutenção atrasados (elétrico e das turbinas);
2. A equipe não possuía a qualificação necessária para atuação em todas as intercorrências da infraestrutura elétrica;
3. Ausência de manutenção corretiva/preventiva da infraestrutura civil.

### 3.1.2 Análise do Estoque de Peças Sobressalentes

Durante a visita de inspeção à Central Eólica, o almoxarifado de peças sobressalentes foi inspecionado. Ficou evidenciado que havia falta de equipamentos ou peças

essenciais ou havia estoque abaixo do nível mínimo. O almoxarifado de peças sobressalentes é ilustrado na Figura 4 e uma foto do local é apresentada na Figura 5.

Figura 4: Almoxarifado de peças sobressalentes da Central Eólica.



Figura 5: Almoxarifado da Central Eólica.



A ausência de peças sobressalentes contribui com o processo de "canibalização" das turbinas paradas. Significando que turbinas que estão paradas por problemas graves e mais caros de serem corrigidos, tem peças removidas e colocadas em turbinas com problemas de menor grau. No saldo, ao invés de duas máquinas paradas por falta de peças fica-se com apenas uma, não havendo gasto extra para a compra de peça sobressalente no curto prazo. Essas peças que foram alocadas em outra turbina são inseridas na lista de

equipamentos a serem repostos para que as duas turbinas possam estar em operação no futuro.

### 3.1.3 Análise dos Dados SCADA

A partir desse ponto da audiotoria, o estagiário começou a atuar de forma mais direta na atividade. O estagiário foi o principal responsável pela geração dos gráficos e tabelas contidos a partir desta seção (salvo quando explicitado) e suas consequentes análises, sempre auxiliado com comentários pontuais do engenheiro Guilherme Pedrosa.

Essa seção apresenta a análise desenvolvida em função dos dados provenientes do sistema supervisório dos aerogeradores. A análise dos dados do sistema SCADA foi realizada utilizando rotinas do MATLAB<sup>®</sup>. Os dados do sistema SCADA foram recebidos da Central Eólica e processados com o objetivo de:

- Determinação de indicadores de desempenho operacionais (tais como, eficiência e disponibilidade de máquina, eficiência global, perdas *online* e *off-line*);
- Análise da curva de potência individual de cada turbina eólica, determinando as restrições da potência da turbina.

#### 3.1.3.1 Descrição dos Dados do SCADA

Os dados do sistema SCADA da Central Eólica foram fornecidos em formato texto, coletados em intervalos de integração de 10 minutos para cada uma das vinte turbinas modelo IMPSA-V77 e compreendendo o período de Janeiro de 2012 a Outubro de 2014. Essas características estão resumidas na Tabela 1

Tabela 1: Turbinas e período dos dados fornecidos da Central Eólica

Parque	Modelo da Turbina	Número de Turbinas	Dados de:	Dados até:
Confidencial	IMPSA V-77	20	01/2012	10/2014

#### 3.1.3.2 Análise da Central Eólica

As duas próximas seções apresentam os indicadores de desempenho da Central Eólica. A primeira avalia os dados de produção, eficiência e velocidade do vento. Já a segunda, trata da avaliação da disponibilidade real e perdas de produção da central eólica.

Duas observações devem ser levadas em consideração:

- A disponibilidade média e fator de capacidade médio do parque leva em consideração apenas a disponibilidade das máquinas **com dados**.
- Valores ausentes na tabela representam dados indisponíveis ou falhas nos sensores.

### 3.1.3.3 Dados de Produção, Eficiência e Velocidade do Vento da Central Eólica

Parâmetros como produção real e esperada, eficiência e fator de capacidade do período de análise para toda a central eólica são mostrados na Figura 6. A seguir, encontra-se o significado de cada uma das propriedades presentes na tabela:

- Energia gerada (MWh): é a energia total produzida, em que o auto-consumo está incluso. Os dados são medidos a um ponto com 600 V antes do transformador.
- Energia esperada(MWh): é definida por meio da CP do fabricante. A velocidade do vento média para cada 10 min e é o valor levado em consideração para se definir a energia esperada.
- Eficiência global (%): é a Energia Gerada (MWh) / Energia Esperada (MWh)
- Eficiência de máquina (%): é a Energia Gerada (MWh) / Energia Esperada Online (MWh). Em que o cálculo da Energia Esperada Online inclui apenas os períodos em que a turbina estava funcionando. Desta maneira, valores de produção esperada quando a turbina estava parada, como quando em manutenção, não entram no cálculo da Energia Esperada Online.
- Fator de capacidade (%): é a proporção entre a produção efetiva da turbina em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período. Para o caso da turbina desta central eólica que é a IMPSA-V77, a capacidade total máxima de produção é de 1.516 kWh.

O mapa de cores dessa seção indica as eficiências inferiores a 95% entre 95% e 98% e superiores a 98% conforme indicada na legenda abaixo da tabela.

Figura 6: Tabela de produção, eficiência e velocidade do vento do parque

Período		Dados de produção, eficiência e velocidade do vento do parque					
Ano	Mês	Energia Gerada (MWh)	Energia Esperada (MWh)	Eficiência global (%)	Eficiência de máquina (CP do Fabricante) (%)	Velocidade média do vento (m/s)	Fator de Capacidade (%)
2012	1	2902,53	4262,29	68,10	68,74	5,07	14,30
2012	2	3970,62	4997,87	79,45	79,90	5,58	19,81
2012	3	3287,73	4974,66	66,09	67,19	5,63	14,57
2012	4	4434,43	5202,45	85,24	86,08	5,58	20,31
2012	5	4359,98	4660,34	93,55	94,20	5,39	19,33
2012	6	5248,26	6041,78	86,87	87,41	5,92	24,04
2012	7	9290,58	9966,14	93,22	93,47	7,83	41,19
2012	8	7684,50	7554,43	100,00	100,00	6,62	34,07
2012	9						
2012	10	3589,63	3595,57	99,83	100,00	6,26	19,89
2012	11	3006,56	2870,63	100,00	100,00	4,70	13,77
2012	12	5307,43	5614,12	94,54	95,36	5,87	23,53
2013	1	3689,95	3670,11	100,00	100,00	4,90	16,36
2013	2	4390,02	4488,53	97,81	97,98	5,47	21,55
2013	3	4414,80	4527,94	97,50	97,99	5,34	19,57
2013	4	4483,03	5057,71	88,64	88,76	5,51	20,54
2013	5	5581,36	6529,30	85,48	85,96	6,32	24,74
2013	6	5717,60	6399,76	89,34	90,12	6,39	26,19
2013	7	5831,25	6025,45	96,78	97,83	6,27	25,85
2013	8	7256,36	7352,01	98,70	99,41	6,51	33,86
2013	9	4899,75	5615,24	87,26	93,37	5,47	24,94
2013	10	4622,15	5427,48	85,16	92,69	5,49	22,77
2013	11	4995,32	6091,51	82,00	87,91	6,50	22,88
2013	12	3235,76	3558,50	90,93	95,87	5,14	15,10
2014	1	3647,65	3777,80	96,55	97,30	5,11	16,17
2014	2	3020,58	2994,13	100,00	100,00	4,68	17,44
2014	3	3977,91	3938,17	100,00	100,00	4,66	22,04
2014	4						
2014	5	3670,70	3598,56	100,00	100,00	4,36	21,70
2014	6	4285,92	4253,89	100,00	100,00	4,73	28,05
2014	7	4027,97	3954,55	100,00	100,00	3,94	29,76
2014	8	5258,88	5287,45	99,46	99,77	4,32	38,85
2014	9						
2014	10	2386,47	2402,15	99,35	99,94	2,95	19,23

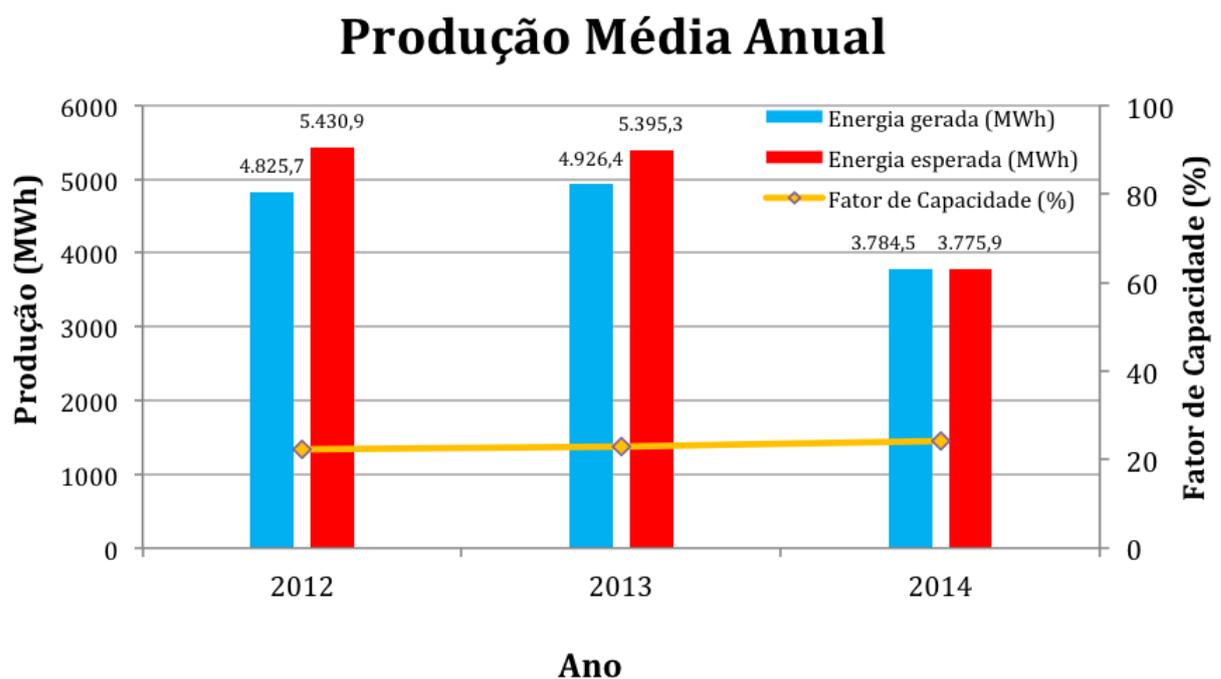
Legenda: ● Eficiência < 95%    ● 95% ≤ Eficiência < 98%    ● Eficiência ≥ 98%

Fonte: autoria própria

Os valores de produção gerada, esperada e fator de capacidade médios anuais estão apresentados na Figura 7. No ano de 2012, houve uma diferença de aproximadamente 600 MWh entre a energia gerada e a energia esperada. No ano de 2014, porém, praticamente não houve diferença.

Há dois motivos para essa diminuição sistemática da diferença. O primeiro é em virtude da falha das máquinas ao longo do tempo, devido ao fraco programa de O&M, como já foi citado. Das vinte turbinas existentes na central, em outubro de 2014, apenas sete estavam em funcionamento. O segundo é a falta de calibração dos anemômetros que com o passar do tempo, passam a medir uma velocidade abaixo da real, causando uma diminuição da energia esperada e, conseqüentemente, uma menor diferença entre a energia gerada e a energia esperada.

Figura 7: Valores de produção gerada, esperada e fator de capacidade médios anuais.



Fonte: autoria própria

#### 3.1.3.4 Disponibilidade Real e Perda de Produção da Central Eólica

Os pontos mais importantes da central eólica são apresentados na Figura 8. É possível identificar a situação geral da central eólica, verificando-se as perdas de produção, tanto devido às paradas, quanto *online* (com turbina em operação). Também é feita

uma comparação com os meses anteriores para o acompanhamento dos indicadores de performance. A seguir, encontra-se o significado de cada uma das propriedades presentes na tabela:

- Disponibilidade real (%): representa o período em que a turbina está em condições de operação (sem problemas de rede) e com velocidade do vento acima da velocidade mínima de operação. A empresa operadora da central está sujeita a multas caso essa disponibilidade caia abaixo de um valor estipulado em contrato.
- Perda de produção devido ao tempo de parada (MWh)::é calculada a partir de uma média de dez minutos dos dados de velocidade do vento quando a velocidade está acima da velocidade mínima de operação. A correlação entre torres de medição e turbinas vizinhas é usada no cálculo, pois o anemômetro da turbina fica desligado enquanto ela permanecer fora de operação.
- Perda de produção *online* (MWh): é a diferença entre a energia gerada e a energia esperada de acordo com os dados de 10 min de velocidade de vento e a curva de potência do fabricante.
- Perda de produção devido ao tempo de parada (%): é o percentual da perda de produção comparado a potência máxima esperada a partir do vento para o período de análise.
- Perda de produção online (%): é o percentual de perda de produção comparado a potência total gerada pela turbina no período de análise.

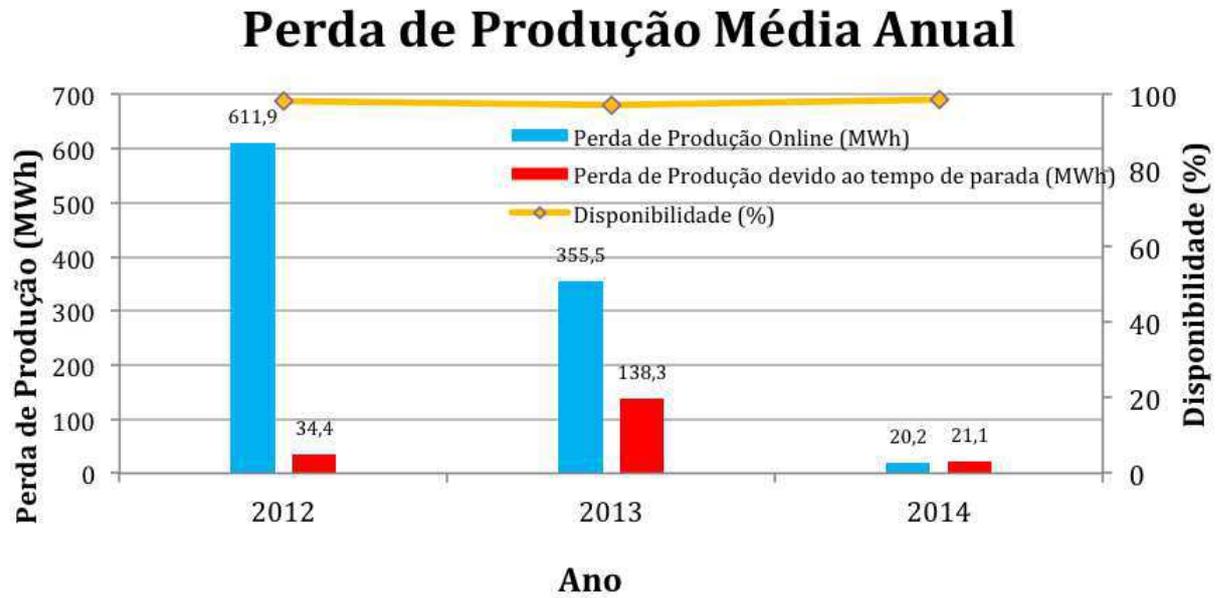
Os valores de perda de produção devido ao tempo de parada, perda de produção online e disponibilidade média anual estão apresentados na Figura 9. A queda nas perdas de produção online é explicada pelos mesmos motivos já apresentados quando foi explicada a queda na diferença de energia gerada e esperada. O número total de aerogeradores em funcionamento diminuiu consideravelmente com o tempo - de vinte para sete, e os anemômetros foram se descalibrando, medindo uma velocidade do vento abaixo da real.

Figura 8: Tabela da disponibilidade real e perda de produção do parque.

Período		Disponibilidade real e perda de produção do parque					
Ano	Mês	Disponibilidade de (%)	Perda de Produção devido ao tempo de parada (MWh)	Perda de Produção devido ao tempo de parada (%)	Perda de Produção Online (MWh)	Perda de Produção Online (%)	Disponibilidade de dos Dados (%)
2012	1	97,80	39,78	1,37	1338,47	46,11	87,00
2012	2	97,80	28,40	0,72	1013,37	25,52	94,19
2012	3	95,41	81,57	2,48	1613,09	49,06	97,33
2012	4	98,32	51,22	1,16	739,72	16,68	99,86
2012	5	98,90	31,79	0,73	292,29	6,70	99,70
2012	6	97,77	37,37	0,71	778,54	14,83	99,82
2012	7	99,13	26,21	0,28	664,48	7,15	99,79
2012	8	99,54	7,08	0,09	0,00		98,22
2012	9						0,00
2012	10	99,69	11,69	0,33	3,20	0,09	47,55
2012	11	99,38	14,09	0,47	0,00		97,00
2012	12	99,44	48,66	0,92	287,91	5,42	99,23
2013	1	99,46	11,78	0,32	8,18	0,22	98,85
2013	2	99,64	8,22	0,19	112,56	2,56	98,42
2013	3	99,49	22,50	0,51	151,01	3,42	97,35
2013	4	99,74	6,93	0,15	610,67	13,62	99,97
2013	5	96,70	36,15	0,65	927,11	16,61	99,98
2013	6	99,01	55,67	0,97	637,74	11,15	99,25
2013	7	99,02	64,96	1,11	149,76	2,57	90,86
2013	8	99,19	52,59	0,72	54,88	0,76	88,66
2013	9	94,16	367,52	7,50	369,00	7,53	88,44
2013	10	93,35	440,56	9,53	384,23	8,31	89,38
2013	11	94,74	409,18	8,19	698,65	13,99	88,93
2013	12	92,72	183,23	5,66	162,39	5,02	81,72
2014	1	99,18	29,00	0,80	123,70	3,39	78,33
2014	2	93,62	39,98	1,32	0,00		57,78
2014	3	99,57	12,39	0,31	0,00		68,64
2014	4						0,00
2014	5	99,73	22,78	0,62	0,00		64,03
2014	6	99,60	17,64	0,41	0,00		54,09
2014	7	99,73	16,17	0,40	0,00		53,01
2014	8	99,61	16,29	0,31	22,98	0,44	59,82
2014	9						0,00
2014	10	99,43	14,23	0,60	14,88	0,62	45,62

Fonte: autoria própria

Figura 9: Valores de perda de produção devido ao tempo de parada, perda de produção online e disponibilidade médios anuais.



Fonte: autoria própria

### 3.1.3.5 Análise Individual das Turbinas Eólicas

Esta seção apresenta a curva de potência (CP) de uma das vinte turbinas eólicas da central utilizando a velocidade do vento medida na turbina eólica e a CP fornecida pelo fabricante. A comparação entre as CP dão uma ideia da condição da curva de potência real da turbina.

A curva de potência é tida como uma das mais valiosas fontes de informação de desempenho de uma turbina eólica. Em termos simples, uma curva de potência mostra a quantidade de energia que uma turbina está produzindo nas dadas velocidades do vento. A turbina inicia sua produção de energia após atingir a chamada velocidade de arranque, e a potência máxima que ela pode gerar é equivalente a sua capacidade nominal. Caso a velocidade do vento exceda um limite, denominado de velocidade de corte, a turbina sai de funcionamento para evitar falhas. Esse limite de velocidade depende do modelo da turbina, mas geralmente varia entre 20 e 25 m/s.

Além disso, é apresentado também uma tabela com o desenvolvimento dos indicadores de desempenho da turbina eólica ao longo do período de análise. A análise das outras dezenove turbinas eólicas é semelhante e, por questões de escopo deste trabalho, não foram adicionadas.

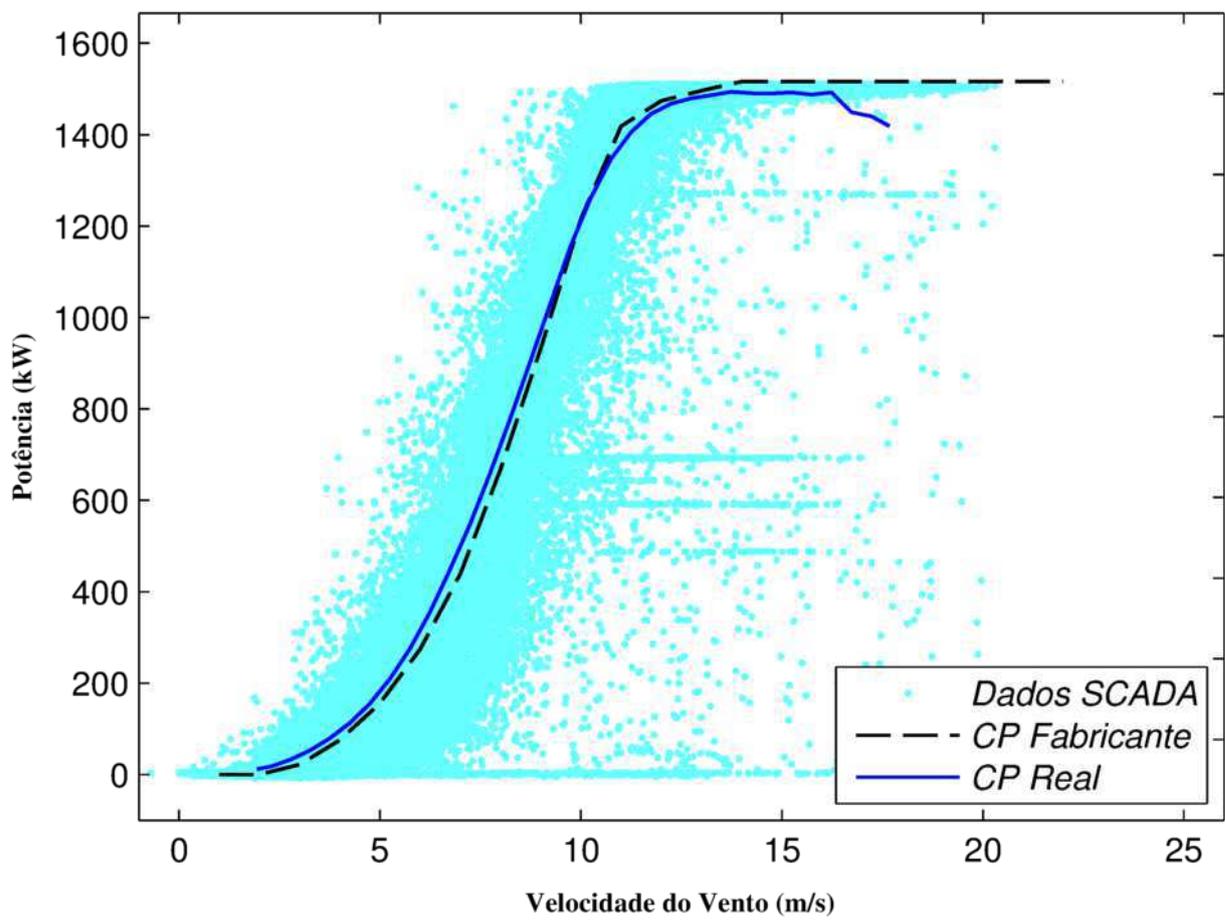
A Turbina 06 foi a escolhida por conter frequentes restrições de potência, que é considerado um grave de erro de operação.

A curva de potência do fabricante e a real, bem como um gráfico de Potência (kW) vs Velocidade do Vento (m/s) com os dados do sistema SCADA são mostrados na Figura 10. Como pode-se observar, as curvas de potência real e do fabricante são bem parecidas. Há um leve deslocamento, na maior parte do período de análise, da CP real para a esquerda em relação à CP do fabricante, indicando que a turbina não esteve em 100% do seu funcionamento em termos de produção de energia durante esses períodos de tempo.

Por envolver questões muito técnicas, quem criou a curva de potência real do aerogerador foi o engenheiro Guilherme Pedrosa.

Cinco restrições de potência detectadas ao longo do período de análise realizada neste trabalho são apresentadas na Tabela 2. Uma restrição de potência acontece, na maioria das vezes, quando a máquina começa a ter suas características alteradas por causas desconhecidas.

Figura 10: Curvas de Potência para a Turbina 06.

**BJA-06CP – Período: 01/01/2012 – 31/10/2014**

Fonte: autoria própria

Por exemplo, quando se percebe um aumento contínuo de temperatura no gerador da máquina, sem nenhuma causa aparente - como o aumento de produção da turbina - a equipe responsável pela operação da central eólica decide por restringir a operação do aerogerador a um certo nível de produção. Essa manobra evita que a máquina possa chegar a uma eventual falha, mas também impede que a turbina possa funcionar e produzir energia da maneira esperada. Isso acontece, na maior parte das vezes, por uma baixa capacitação da equipe de O&M da central eólica e por falta de recursos, tais como *software* especializados para ajudar na detecção de problemas na máquina.

Tabela 2: Anomalias detectadas na CP do AEG06

Anomalia	Observação	Número de Horas
Restrição de Potência	Turbina Restrita a 488 kW	11,5
Restrição de Potência	Turbina Restrita a 591 kW	58,7
Restrição de Potência	Turbina Restrita a 643 kW	22,7
Restrição de Potência	Turbina Restrita a 694 kW	33,0
Restrição de Potência	Turbina Restrita a 1272 kW	10,0

Da mesma forma que acontece com a central eólica, cada turbina tem sua tabela de dados de produção, eficiência e velocidade do vento e sua tabela de dados de disponibilidade e perdas produtivas, e seus respectivos gráficos, para que possam ser analisados separadamente. A Turbina 06 foi escolhida como exemplo, já que a análise das demais dezenove turbinas é semelhante. Os mesmos gráficos e tabelas que foram traçados para a central eólica, também foram traçados para a Turbina 06 e estão apresentados nas Figuras 11, 12, 13 e 14.

Figura 11: Tabela dos dados de produção, eficiência e velocidade do vento da Turbina 06.

Período		Dados de produção, eficiência e velocidade do vento da turbina					
Ano	Mês	Energia Gerada (MWh)	Energia Esperada (MWh)	Eficiência global (%)	Eficiência de máquina (CP do Fabricante) (%)	Velocidade média do vento (m/s)	Fator de Capacidade (%)
2012	1	181,62	298,17	60,91	61,38	6,15	16,10
2012	2	219,75	355,05	61,89	62,43	6,59	20,83
2012	3	124,34	227,46	54,66	54,87	5,50	11,02
2012	4	227,22	269,11	84,44	84,61	5,68	20,82
2012	5	225,85	249,40	90,56	91,14	5,57	20,02
2012	6	250,15	396,68	63,06	64,24	6,78	22,92
2012	7	514,34	529,36	97,16	97,17	8,42	45,60
2012	8	385,95	400,29	96,42	96,44	6,77	34,22
2012	9						
2012	10						
2012	11	128,33	142,30	90,18	92,95	4,72	11,76
2012	12	241,33	286,45	84,25	85,01	5,85	21,40
2013	1	0,35	147,43	0,24	0,24	5,05	0,03
2013	2	0,41	253,99	0,16	0,16	5,81	0,04
2013	3	249,41	270,51	92,20	92,20	5,76	22,11
2013	4	129,56	269,20	48,13	48,13	5,72	11,87
2013	5	0,18	251,29	0,07	0,07	7,25	0,02
2013	6	1,23	365,95	0,34	0,34	6,57	0,11
2013	7	5,39	162,27	3,32	3,32	6,02	0,48
2013	8						
2013	9						
2013	10						
2013	11	6,50	7,23	89,94	89,94	5,48	0,60
2013	12	253,69	268,06	94,64	94,65	5,73	22,49
2014	1	285,72	295,10	96,82	96,82	6,02	25,33
2014	2	176,94	198,60	89,09	89,22	6,25	17,37
2014	3	337,24	345,26	97,68	97,68	6,42	29,90
2014	4						
2014	5	331,13	341,32	97,02	97,02	6,42	29,36
2014	6	443,22	466,81	94,95	95,03	7,89	40,61
2014	7	384,80	397,51	96,80	96,80	7,27	34,12
2014	8	484,62	511,19	94,80	94,90	7,94	42,97
2014	9						
2014	10	33,25	43,73	76,04	76,09	4,14	2,95

Figura 12: Tabela dos dados de disponibilidade e perdas produtivas da Turbina 06.

Período		Disponibilidade real e perda de produção da turbina					
Ano	Mês	Disponibilidade de (%)	Perda de Produção devido ao tempo de parada (MWh)	Perda de Produção devido ao tempo de parada (%)	Perda de Produção Online (MWh)	Perda de Produção Online (%)	Disponibilidade de dos Dados (%)
2012	1	98,19	2,26	1,25	115,12	63,38	96,55
2012	2	98,49	3,02	1,37	133,74	60,86	99,16
2012	3	99,39	0,86	0,70	102,25	82,24	99,78
2012	4	98,54	0,54	0,24	42,47	18,69	99,98
2012	5	99,38	1,60	0,71	22,78	10,09	99,82
2012	6	95,20	7,27	2,91	139,73	55,86	99,84
2012	7	99,88	0,04	0,01	16,64	3,23	96,73
2012	8	99,60	0,08	0,02	15,33	3,97	99,98
2012	9						0,00
2012	10						0,00
2012	11	98,85	4,23	3,30	10,67	8,32	99,81
2012	12	99,37	2,58	1,07	43,31	17,95	99,28
2013	1	95,60	5,24	1510,80	141,89	40872,97	77,42
2013	2	100,00	0,00	0,00	253,64	61152,01	98,69
2013	3	100,00	0,00	0,00	49,69	19,92	98,72
2013	4	99,97			151,57	116,98	100,00
2013	5	54,38			251,13	140993,00	99,78
2013	6	100,00	0,00	0,00	364,84	29574,28	108,56
2013	7	100,00	0,00	0,00	157,28	2919,25	51,61
2013	8						0,00
2013	9						0,00
2013	10						0,00
2013	11	100,00	0,00	0,00	0,78	11,95	3,33
2013	12	99,95	0,03	0,01	15,22	6,00	100,00
2014	1	100,00	0,00	0,00	10,16	3,56	96,77
2014	2	99,87	0,27	0,16	21,84	12,34	64,63
2014	3	100,00	0,00	0,00	8,85	2,63	98,34
2014	4						0,00
2014	5	100,00	0,00	0,00	10,94	3,30	100,00
2014	6	99,77	0,38	0,09	23,80	5,37	94,26
2014	7	100,00	0,00	0,00	13,29	3,45	90,32
2014	8	99,92	0,51	0,11	26,84	5,54	100,00
2014	9						0,00
2014	10	99,83	0,03	0,10	11,24	33,79	38,66

Como pode ser visto na Figura 14, o ano de 2013 apresentou uma perda de produção *online* 58% e 47% menor em relação aos anos de 2012 e 2014, respectivamente. Isso se deve a uma maior preocupação em relação a operação e manutenção da turbina eólica durante o ano de 2013 e reflete na energia gerada pelo aerogerador durante esse período, como pode ser visto na Figura 13. Observa-se que em 2013, a energia gerada total pela turbina foi de 231,8 MWh, um valor 128% e 224% maior do que nos anos de 2012 e 2014, respectivamente.

Figura 13: Produção gerada, esperada e de capacidade médios anuais da Turbina 06.

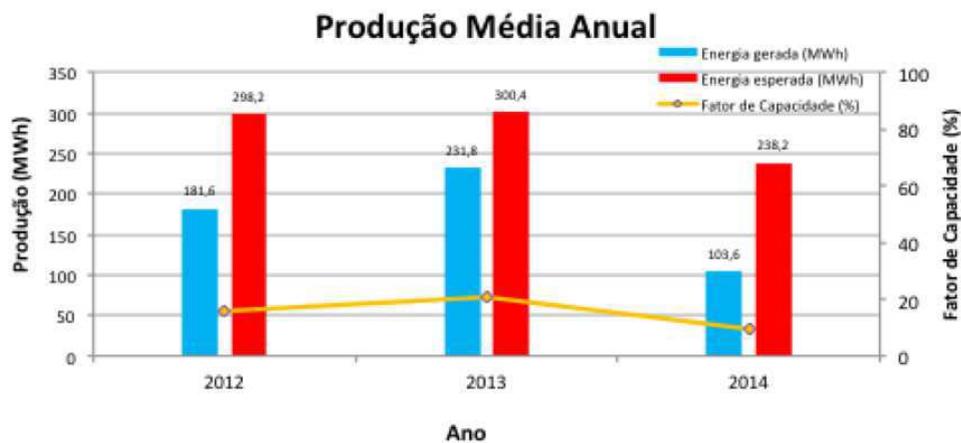


Figura 14: Perda de produção devido ao tempo de parada, perda de produção *online* e disponibilidade médios anuais da Turbina 06.



## 3.2 Ferramenta de Detecção Automática de Falhas em Aerogeradores

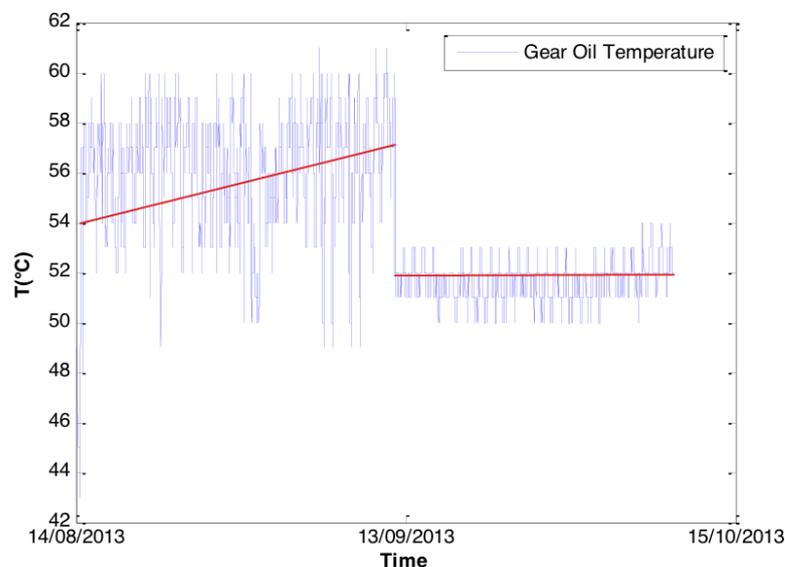
A base teórica para essa ferramenta é uma técnica conhecida como Análise de Mudança de Ponto (CPA). Detalhes e o funcionamento dessa técnica se encontram no Apêndice A.

A ideia do desenvolvimento de uma ferramenta para analisar automaticamente dados provenientes do sistema SCADA surgiu da necessidade de reduzir o número de falhas em uma turbina eólica. Falhas que, na maioria das vezes, poderiam ser evitadas se as informações que os operadores da central eólica fossem devidamente analisadas.

Os sinais que os operadores da central eólica julgarem ser importantes para a análise serão aplicados à ferramenta. Diariamente, a ferramenta fará a análise desses sinais de maneira automática. Assim, quando um sinal estiver com comportamento fora do esperado, um alarme interno pode ser gerado e os operadores podem dar mais atenção a essa turbina.

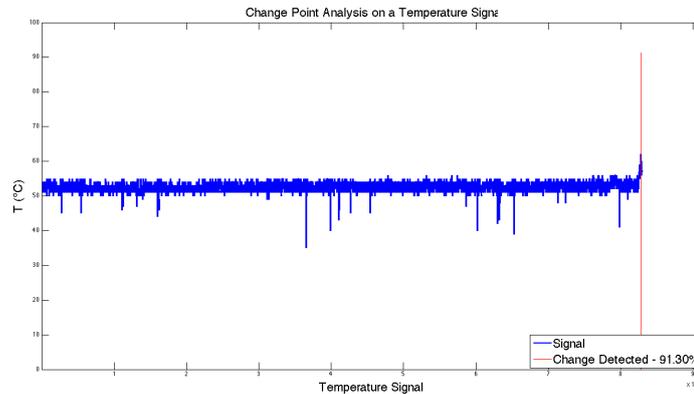
A figura 15 ilustra a importância de uma ferramenta desse tipo. A temperatura do óleo do gerador da turbina começou a subir em meados de Agosto e nenhuma providência por parte dos operadores foi realizada. Até que, um mês depois, essa temperatura finalmente atingiu um valor que faz com que a turbina saísse de operação, causando prejuízo à central eólica.

Figura 15: Gráfico da tendência de aumento de um sinal de temperatura



A aplicação da ferramenta a um sinal de temperatura está representada na Figura 16. Uma tendência é detectada nesse sinal, sugerindo ao operador que uma análise mais detalhada na turbina seja realizada, visando prevenir que falhas graves ocorram.

Figura 16: A ferramenta de CPA sendo aplicada a um sinal de temperatura



As rotinas para análise de detecção de mudança foram concluídas durante o estágio. A análise de CPA, entretanto, ainda deve ser cruzada com outras análises, tais como de velocidade de vento e de produção, para que se possa inferir que a turbina apresenta defeito. Uma mudança nos dados de temperatura, por exemplo, pode significar apenas que o vento está mais forte - portanto, a turbina está trabalhando e esquentando mais - não devendo gerar alarme.

Além disso, ainda é necessário desenvolver um método eficiente para se extrair os dados automaticamente do sistema SCADA e introduzi-los na ferramenta para que eles sejam analisados diariamente.

Durante o desenvolvimento desta atividade, o estagiário realizou toda a pesquisa e desenvolvimento da ferramenta com ajudas pontuais do engenheiro Guilherme Pedrosa.

## Capítulo 4

# Considerações Finais

Durante o período de estágio, o aluno pôde aprender como funciona o ambiente de desenvolvimento de projetos e soluções de engenharia aplicado a sistemas eólicos. Além disso, foi possível trabalhar com pessoas com diferentes linhas de pensamento e atitudes no ambiente, contribuindo significativamente para uma melhor visão da importância do trabalho em equipe para o estagiário.

A empresa contribuiu de forma bastante significativa com o conhecimento técnico do estagiário na área de geração de energia eólica. Ao mesmo tempo, a experiência na Eólica Tecnologia contribuiu também com o conhecimento na parte administrativa do setor, principalmente na questão do funcionamento de venda e leilão de energia.

O estagiário contribuiu com as atividades realizadas, principalmente no serviço de *due diligence*. E ainda, no desenvolvimento de projetos, para uma futura redução significativa no número de falhas de turbinas eólicas, os quais estavam aguardando prioridade.

O estagiário foi capaz de alcançar seus objetivos com a realização do estágio. Foram eles: colocar em prática os seus conhecimentos teóricos, adquirir experiência e aperfeiçoar sua desenvoltura no âmbito profissional. Os resultados obtidos ao fim das atividades atenderam às expectativas, despertando o interesse do aluno no setor de projetos de engenharia, especialmente em energias renováveis.

# Referências Bibliográficas

- [1] Jie Chen and Arjun K Gupta. *Parametric statistical change point analysis: With applications to genetics, medicine, and finance*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] G. ESCOBAR. Você sabe o que é due diligence? Disponível em: <http://www.informazione4.com.br/cms/opencms/desafio21/artigos/gestao/organizando/0019.htm>. Acessado em 28 de Setembro de 2015.
- [3] IMPSA. *Aerogerador IMPSA V Descrição Técnica*.
- [4] Rebecca Killick and Idris Eckley. changepoint: An r package for changepoint analysis. *Journal of Statistical Software*, 58(3):1–19, 2014.
- [5] C. KIRCH. Bootstrapping sequential change-point tests. *Sequential Analysis*, 27(3):330–349, 2008.
- [6] W. A. TAYLOR. Change-point analysis: a powerful new tool for detecting changes. *preprint, available as http://www.variation.com/cpa/tech/changepoint.html*, 2000.
- [7] VESTAS. *VESTAS V82 General Specification*, second edition.

# Apêndice A

## Análise de Mudança de Ponto

O *change-point analysis* (CPA), ou análise de mudança de ponto, é uma ferramenta para determinar se houve mudança de tendência em um conjunto de dados. Mudança de tendência pode representar tanto mudança na média, quanto na variância do conjunto de dados.

A importância de analisar mudanças em um conjunto de dados, ou em um sinal, reside no fato da automatização do processo de análise das variáveis de interesse em uma turbina eólica. Ao serem detectadas mudanças inesperadas de média em sinais de temperatura ou pressão de um aerogerador, por exemplo, pode-se investigar essa máquina com maiores detalhes, pois há grandes chances de ela estar apresentando defeito.

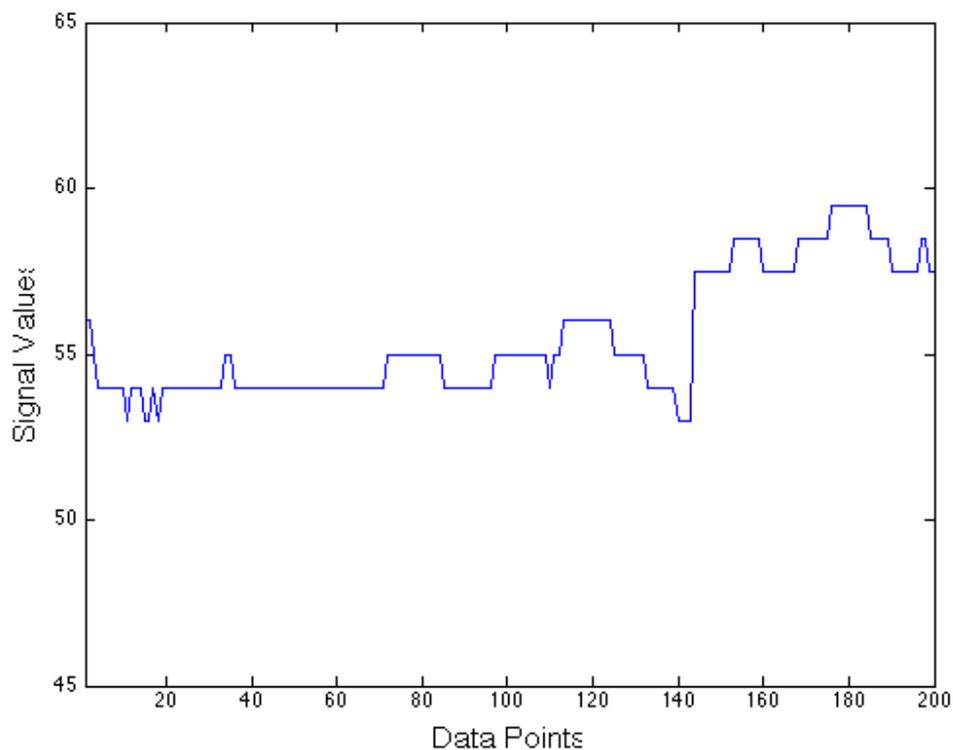
O CPA fornece um *confidence level* (CL), ou nível de confiança, para as mudanças, em que 100% de CL indica que houve, de fato, uma mudança de tendência no conjunto de dados.

O procedimento para realizar a análise de mudança de ponto usa uma combinação de gráficos de *cumulative sum* (CUSUM), ou soma cumulativa, e a técnica de *bootstrap* para detectar mudanças, os quais serão tratados na próximas seções. Tal procedimento foi baseado em dois artigos. Um artigo da matemática Kirch, C. (PhD, Universidade de Kaiserslautern) [5]. E outro do estatístico Taylor, Wayne A. (PhD, Universidade de Purdue) [6].

## *Cumulative Sum*

Considere um conjunto de dados com 200 elementos, em que  $X_1, X_2, \dots, X_{200}$  representam esses elementos. O gráfico desse conjunto de dados está representado na Figura 17. Pode-se observar que há uma mudança de tendência (média) nos últimos 50 pontos do sinal. E o CPA deve detectar esse fato.

Figura 17: Sinal de um conjunto de dados com 200 elementos



A análise inicia com a construção do gráfico do CUSUM, como mostrado na Figura 18.

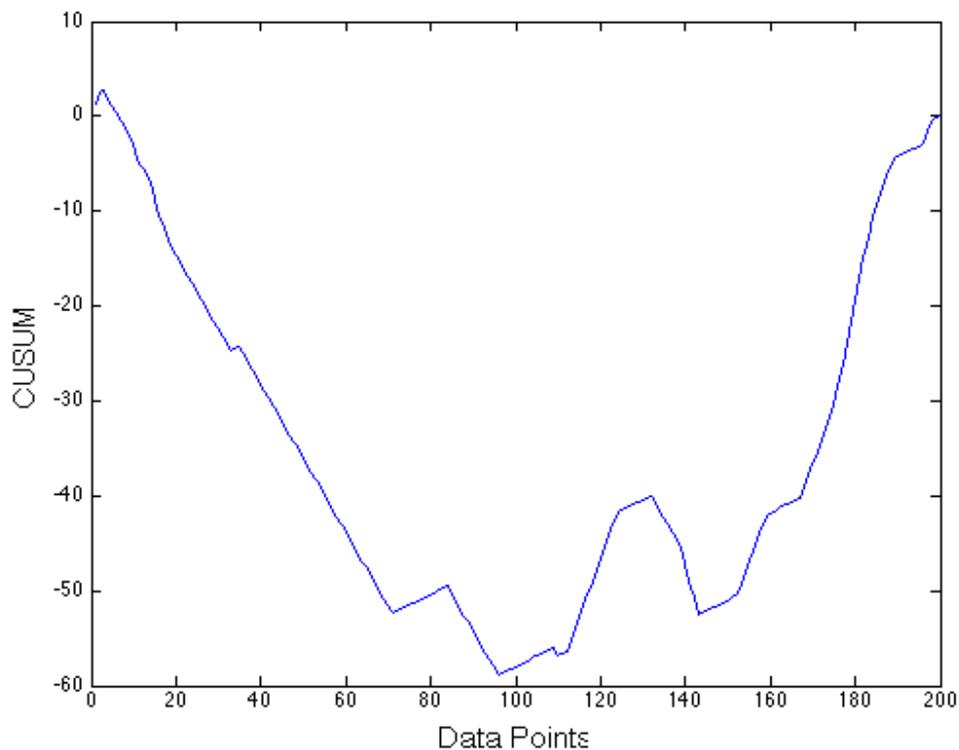
A Soma Cumulativa não corresponde às somas cumulativas dos valores do conjunto de dados. Ao invés disso, elas são somas da diferença de cada valor do conjunto de dados em relação à média do conjunto. A adição dessas diferenças sempre resulta em zero, por isso a Soma Cumulativa sempre finaliza em zero.

A partir do conjunto de dados original, os elementos da soma cumulativa  $S_0, S_1, \dots, S_{200}$  são calculados da seguinte forma:

1. Calcula-se a média:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{200}}{200} \quad (1)$$

Figura 18: Gráfico do *Cumulative Sum* (CUSUM) de um conjunto de dados



2. Inicia-se a soma cumulativa em 0, isto é,  $S_0 = 0$ .
3. Calcula-se os outros elementos da soma cumulativa adicionando-se a soma da diferença do valor atual e a média à soma anterior:

$$S_i = S_{i-1} + (X_i - \bar{X}), \text{ para } i = 1, \dots, 200 \quad (2)$$

Assim, com todos os elementos da soma cumulativa calculados, o gráfico do CUSUM pode ser traçado. Com o gráfico, é possível determinar em qual momento uma mudança pode ter ocorrido:

$$|S_m| = \max_{i=0, \dots, 200} |S_i| \quad (3)$$

$S_m$  é o ponto mais longe de zero no gráfico do CUSUM. Estima-se que o último ponto antes da mudança ocorrer é o ponto  $m$ . Portanto, o ponto  $m + 1$  é o primeiro ponto após a mudança. A ocorrência da mudança, entretanto, só é confirmada após o cálculo do *confidence level*, que utiliza um conceito importante, o *bootstrap*.

## *Bootstrap*

Antes de realizar o *bootstrap*, uma estimativa da magnitude da mudança é necessária. O cálculo da estimativa é independente da distribuição do conjunto de dados, que é:

$$S_{diff} = S_{max} - S_{min}, \text{ em que:} \quad (4)$$

$$S_{max} = \max_{i=0, \dots, 200} \{S_i\} \quad (5)$$

$$S_{min} = \min_{i=0, \dots, 200} \{S_i\} \quad (6)$$

Após a estimativa da mudança ter sido calculada, a análise de *bootstrap* pode ser realizada. O conjunto de dados com 200 elementos ainda será usado como exemplo. Um único *bootstrap* é feito da seguinte forma:

1. Gera-se uma amostra de *bootstrap* de 200 elementos, de  $X_1^0, X_2^0, \dots, X_{200}^0$ , reordenando aleatoriamente os 200 valores originais. Por isso é chamado de amostragem sem reposição.<sup>1</sup>
2. Baseado na amostra de *bootstrap*, calcula-se os elementos do *bootstrap* CUSUM, chamados de  $S_1^0, S_2^0, \dots, S_{200}^0$ .
3. Calcula-se o máximo, o mínimo e a diferença do *bootstrap* CUSUM, chamados de  $S_{max}^0, S_{min}^0, S_{diff}^0$ .
4. Determina-se se a diferença do *bootstrap*  $S_{diff}^0$  é menor do que a diferença original  $S_{diff}$ .

A ideia do *bootstrap* é que as amostras de *bootstrap* representam reordenamentos aleatórios do conjunto de dados que simulam o comportamento do CUSUM se nenhuma

---

<sup>1</sup>Há algumas referências que utilizam a amostragem com reposição, isto é, quando gerada a nova amostra, os elementos podem se repetir. Para esse trabalho, ambas foram testadas e os resultados obtidos foram semelhantes.

mudança ocorreu. Realizando uma grande quantidade de amostras de *bootstrap* e analisando seus respectivos CUSUM, é possível avaliar quanto o  $S_{diff}$  variaria se nenhuma mudança ocorresse. A partir desse resultado, pode-se compará-lo com o valor de  $S_{diff}$  do conjunto de dados na ordem original e determinar se esse valor é consistente com o que é esperado se nenhuma mudança tivesse ocorrido.

A Figura 19 mostra o gráfico do CUSUM da Figura 18 dos dados na ordem original em conjunto com quatro amostras de *bootstrap* diferentes. O CUSUM das amostras tendem a permanecer mais próximo de zero em comparação com o CUSUM do conjunto de dados na ordem original. Isso leva a uma suspeita que uma mudança provavelmente ocorreu.

Uma análise de *bootstrap* consiste na realização de uma grande quantidade de amostras e na contagem do número de vezes nas quais  $S_{diff}^0$  foi menor do que  $S_{diff}$ . O *confidence level*, ou nível de confiança da mudança, expresso em termos de porcentagem é calculado da seguinte forma:

$$CL = \frac{X}{N} * 100\% \quad (7)$$

Considera-se N o número de amostras de *bootstrap* realizadas e X o número de vezes em que  $S_{diff}^0 < S_{diff}$ . Então,

Tipicamente, um valor de 90% ou mais de CL é necessário para que se afirme que uma mudança de tendência significativa ocorreu no sinal.

Figura 19: Gráficos CUSUM do conjunto de dados na ordem original e de 4 amostras *bootstrap*

