ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ENGENHARIA ELÉTRICA

WALTON GOMES NETO DE LIMA

Otimização da produção de turbinas eólicas pelo uso de processos em microeletrônica

São Paulo

2019

WALTON GOMES NETO DE LIMA

Otimização da produção de turbinas eólicas pelo uso de processos em microeletrônica

Versão Original

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do título
de Doutor em Ciências.

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Área de concentração: Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Limad, Waltson Gomes Neto de
OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS PELO USO DE
PROCESSOS EM MICROELETRÔNICA / W. G. N. de Limad – versão original –
São Paulo, 2019.
190 p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. MICROELETRÔNICA. 2. TURBINAS EÓLICAS. 3. ROADMAP. 4.
SENSORES. 5. ANÁLISE DE DESEMPENHO. I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia e Sistema Eletrônicos II.t.

Nome: LIMAD, Waltson Gomes Neto de

Título: Otimização da produção de turbinas eólicas pelo uso de processos em microeletrônica

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do título
de Doutor em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico com todo ardor este trabalho ao meu querido primo-irmão Ademar Clemente da Cunha (*in memoriam*) ao qual entrego minha incomensurável admiração, atenção e carinho, e, agradecimento, pois foi quem em vida me abriu as portas para do um trajeto de vida na cidade de São Paulo e por conseguinte ofereceu todo suporte para que eu pudesse me dedicar aos estudos e à carreira até atingir este grau acadêmico e profissional.

AGRADECIMENTOS

À Nossa Senhora Aparecida que me ensinou a pedir o milagre de na vida seguir com fé os preceitos de Nosso Senhor Jesus Cristo.

Ao Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho que me permitiu aprofundar em temas não diretamente ligados à Microeletrônica, mas que com sua perspicácia conseguiu mostrar caminhos que pudessem chegar a este fim.

À Prof.a Dra. Maria Lúcia Pereira da Silva que me acompanha e orienta em pesquisas desde a fase do Mestrado, e foi fundamental na Co-Orientação livre desta pesquisa de Doutorado; sublinho ainda que seu registro acadêmico levarei como referência de como desenvolver ciência.

Às Instituições Corporativa e Acadêmica que proporcionaram todas as bases e infraestrutura para poder desenvolver este trabalho, a partir da disponibilização de conhecimento, informações, dados e pessoas na execução das inúmeras atividades que compuseram tais estudos.

À equipe de engenheiros e técnicos pertencentes à Empresa dos quais foram fundamentais para composição e execução dos trabalhos e análises nos diversos laboratórios utilizados para o desenvolvimento desta tese.

Aos meus familiares, sobretudo minha mãe – Zilda Gomes, e minha tia-mãe – Maria das Dores Silva, aos quais sempre acreditaram em mim irrestrita e incondicionalmente, e me suportaram nos momentos mais difíceis de toda a minha trajetória até aqui.

Ao amigo Marcos R. Pandolpho e sua mãe D. Dirce Fragoso Pandolpho que se tornaram presentes pela sua discrição e gratuidade, além da sua paciência quase impaciente em buscar entender a importância da vida acadêmica para as pessoas; agradeço ainda pelo apoio e orientação que leva ao destino, apresentando-me o caminho para ser uma pessoa mais firme e forte.

Aos amigos do Movimento Católico Comunhão e Libertação, sobretudo minha Fraternidade, que de forma direta e indireta puderam à distância servir de instrumento da vida em Cristo.

EPÍGRAFE

Quando utilizamos a navalha de Occam¹ para analisar o avanço da tecnologia, é possível cair em contradição, tendo-se em conta que o reducionismo seja incompatível com as inovações disruptivas, pois “para todo problema complexo, existe uma solução simples, elegante e completamente errada” (MENCKEN, 1920). Por outro lado, até o mais simples dos objetos parecem “indicar” que a simplicidade – no uso, na ideia, na forma, etc. – seja o caminho. Por sorte, podemos ser educados com a ideia de que a teoria mais simples é a mais elegante, e por conseguinte, mais correta ou adequada; todavia, o contexto pode parecer complexo e multifacetado.

No entanto, Albert Einstein parece ter a solução deste dilema, dizendo que “tudo deve ser feito da forma mais simples possível, mas não mais simples que isso” (CALAPRICE, 2000), então por que não verificar se de fato estamos utilizando a abordagem mais simples, sem perder a eficiência, para encarar a complexidade do mundo atual?

Prof.^a Dr.^a Maria Lúcia Pereira da Silva (2018, p.1)

¹ Navalha de Occam é um princípio metodológico que aconselha a parcimônia e a simplicidade nas explicitações – também conhecida como *entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* (as entidades não devem ser multiplicadas além do necessário), pensamento indicado por John Ponce, i.e., o princípio requer que seja utilizado o menor número de premissas dentro do possível para explicar qualquer fenômeno. (GARRETT, 1991)

RESUMO

LIMAD, Waltson Gomes Neto de. **Otimização da produção de turbinas eólicas pelo uso de processos em microeletrônica**. 2019. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Este trabalho fez uso de correlações entre duas áreas de produção – microeletrônica e eólica – para a otimização de turbinas na produção de energia eólica através do desenvolvimento de métodos, processos e produtos. A importância deste trabalho reside em várias questões da vida moderna, já que a necessidade de vida longa e viabilidade técnica/econômica dos equipamentos para a produção de energia renovável é inquestionável. Tratou-se de uma pesquisa aplicada, fazendo-se uso do estudo de caso, com desenvolvimento de testes tanto na planta como em escala piloto, existindo igualmente o desenvolvimento de *mock up's* e protótipos. Foi também essencial para o desenvolvimento deste trabalho a utilização das ferramentas da qualidade. Como principais resultados tem-se que o uso dos conceitos da qualidade permitiram melhorias incrementais que resultaram num aumento de vida útil das turbinas superior em cerca de 50%, por outro lado, o uso da abordagem da engenharia de processos melhorou o resultado em torno de 25%, porém, foi igualmente significativo o uso de uma abordagem fenomenológica, que também acrescentou 25% ao resultado; portanto, ao final deste desenvolvimento a vida útil das turbinas correspondentes ao estudo de caso havia sido aumentada em cerca de cinco vezes. Entretanto, o emprego de ideias e processos da microeletrônica, principalmente no que concerne a miniaturização e sensores, foi fundamental na definição de micro-reator e protótipos, gerando inovação para o mercado eólico. Por fim, o conjunto dessas ideias e testes permitiu propor um *roadmap* para que tais mudanças não se tornem pontuais, mas sejam viabilizadas ao longo do tempo. Tal *roadmap* sugere estudos futuros principalmente quanto à atuação direta no *site* onde se mantém as turbinas eólicas pelo desenvolvimento de sensores pequenos, de baixo custo e descartáveis de tal modo a permitir o controle preventivo da situação.

Palavras-chave: microeletrônica, turbinas eólicas, *roadmap*, sensores, análise de desempenho

ABSTRACT

LIMAD, W.G.N. **Optimization of the production of wind turbines by the use of processes in microelectronics.** 2019. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

This work used correlations among two different production fields – microelectronics and wind power – in order to optimize the production of wind power turbines by the development of new methods, processes and products. The relevance of this work relies on the urges of the modern life issues, where renewable sources produced with technically/economically long-life tools are a must. It was carried out an applied research, with case study and tests on the site and on pilot scale aside the development of mockups and prototypes. An essential part of this work was Quality Tools. Main results pointed out to incremental improvements, due to the use of Quality Tools, of approximately 50%; however, the process approach implies in a rise of 25% whereas phenomenological approach also increase the results on 25%. Thus, at the end, the wind power turbines showed a lifespan of five times. Nonetheless, the use of ideas and process of microelectronics first and foremost due to miniaturization and sensors, was central on micro reactors and prototypes definition and also gave birth to innovation to the wind power market. Finally, these ideas and tests allow postulate a roadmap to assure that the observed changes were not kept occasional but became reality over time. The roadmap suggests not only research on the production site of the wind power turbines but also the development of small, low-cost one-way sensors and disposable for using on a preventive perspective.

Key words: microelectronics, wind power turbines, roadmap, sensors, performance analysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Mapa Conceitual da Tese	1. 10
Figura 2.1 – Ciclo PDCA	2. 3
Figura 2.2 – Exemplo de Diagrama de Ishikawa	2. 5
Figura 2.3 – Distribuição do Potencial Eólico No Brasil	2. 17
Figura 2.4 – Primeira turbina eólica automática construída por Brush	2. 20
Figura 2.5 – Gráfico da curva de potência da turbina eólica	2. 22
Figura 2.6 – Sistema eólico conectado diretamente à rede elétrica:	
(a) gerador assíncrono de gaiola e	
(b) gerador síncrono com excitação independente	2. 24
Figura 2.7 – Sistema eólico conectado na rede através de um conversor:	
(a) gerador assíncrono de gaiola e	
(b) gerador síncrono com excitação independente	2. 24
Figura 2.8 – Gerador assíncrono trifásico de rotor com bobinas duplamente alimentados com escovas	2. 26
Figura 2.9 – Grupo eólico-elétrico conectado à rede elétrica através de um conversor:	
(a) Gerador síncrono com excitação independente e	
(b) Gerador síncrono de ímãs permanentes	2. 26
Figura 2.10 – Turbinas tipo (a) de eixo vertical e	
(b) de eixo horizontal	2. 30
Figura 2.11 – Diferentes tipos de turbinas eólicas (os mais dominantes)	2. 33
Figura 3.1 – Mock up – Forno para testes de bobina	3. 10
Figura 3.2 – Reator de cavidade dupla desenvolvido por (LIMA et. al., 2009)	3. 12
Figura 3.3 – Esquema do reator e conjunto em medida(a), (b) set up do reator	3. 13
Figura 3.4 – HiPot: equipamento esquemático e painel	3. 14
Figura 3.5 – Estrutura de ensaio para avaliação do HMDS na fita de mica	3. 16
Figura 3.6 – Mica (a) Rocha (b) – Fitas de mica (validade 12 meses)	3. 17
Figura 4.1 – (a)Fluxo operacional da pesquisa – método PDCA; (b) Mapa da pesquisa	4. 16
Figura 4.2 – Exemplificação do Diagrama de Ishikawa aplicado no Workshop	4.24

Figura 4.3 – Exemplificação de aplicação da ferramenta de investigação – 5 Why’s	4.25
Figura 4.4 – Desenho do estator indicando a região que é mais afetada com o acúmulo de água (a) e Foto do equipamento no ponto especificado	4.28
Figura 4.5 – PDCA modificado adaptado para <i>roadmap</i> aplicado à energia eólica	4.30
Figura 4.6 – Folha de dados utilizada para o preenchimento de geradores de dados técnicos	4.32
Figura 4.7 – Diagrama de Ishikawa modificado	4.33
Figura 4.8 – Diagrama de Afinidades aplicado para combinar as várias combinações de geradores	4.35
Figura 4.9 – Quantitativo de falhas por configuração de geradores	4.36
Figura 4.10 – Matriz em 'L' para correlacionar configuração de geradores com ocorrências	4.37
Figura 4.11 – (a) Imagem do curto-circuito da ranhura do anel (b) Regiões de maior incidência de curto-circuito no estator e (c) Estatores em construção	4.39
Figura 4.12 – Estatísticas de falhas pagas pela Allianz	4.40
Figura 4.13 – Em duas vistas distintas: (a), (c) – “Mock up”, com detalhe da região de análise e (b), (d) – Visão global do estator	4.41
Figura 4.14 – Bobina: vista (a) frontal e (b) lateral	4.42
Figura 4.15 – Inovações propostas por essa fase da pesquisa que são aderentes ao mapa da pesquisa	4.44
Figura 4.16 – Quantidade de falhas levantadas nos sites pesquisados	4.48
Figura 4.17 – Detalhe da Nacelle, conjunto do gerador eólico	4.49
Figura 4.18 – Quantidade de falhas geradas, etapa 2 (aspecto mesoscópico)	4.53
Figura 4.19 – Microscopia da combustão sofrida em partes das bobinas (a b e c) e ímã (d) devido ao curto-circuito	4.54
Figura 4.20 – Quantidade de falhas de acordo com a abordagem microscópica	4.57
Figura 4.21 – Micro-reator utilizado para ensaio em laboratório (a) para avaliação de fitas isolantes (b)	4.58

Figura 4.22 – Resultados típicos, obtidos por MEV, para as chapas estatóricas	4.64
Figura 4.23 – Aparência do protótipo da bobina, (a) antes e (b) após a impregnação utilizando a técnica VPI	4.68
Figura 4.24 – Detalhes do protótipo da bobina após impregnação	4.68
Figura 4.25 – Possíveis problemas com tal camada	4.69
Figura 4.26 – O confronto final, Impregnação por resina	4.70
Figura 4.27 – Impactos nas horas trabalhadas até a falha sob análises macro-meso-microscópicas	4.71
Figura 4.29 – Etapas de construção desse <i>roadmap</i> (a) e Resultado final (b)	4.74
Figura 4.30 – Etapas desenvolvidas neste trabalho	4.78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Distribuição de consumo de eletricidade no Brasil em 2007	1.4
Tabela 2.1 – Descritores e respectivo número de citações no Google Acadêmico®	2.8
Tabela 2.2 – Conceitos de turbinas eólicas	2.32
Tabela 3.1 – Descritores e respectivo número de citações no Google Acadêmico®	3.5
Tabela 3.2 – Resumo das definições e características comumente usadas para o termo protótipo	3.6
Tabela 3.3 – Resumo das definições e características comumente usadas para o termo “mock up”	3.6
Tabela 3.4 Relação dos Macroprocessos da Gestão de Projetos indicados pelo PMI	3.8
Tabela 3.5 – Etapas de construção de mock up’s (bobinas e forno)	3.10
Tabela 4.1 – Matriz de estrutura de subsistência para maquetes, com base no modelo de FADEL	4.43
Tabela 4.2 – Quantidade mensal de falhas por site	4.45
Tabela 4.3 – Falhas detectadas, possíveis causas e respectivos mecanismos, de acordo com os Inspetores O&M	4.47
Tabela 4.4 – Teste de percolação de água nas fitas de mica: umidade obtida	4.59
Tabela 4.5 – Teste de percolação de água nas fitas de mica: umidade obtida	4.60
Tabela 4.6 – 1 Teste de percolação de água nas fitas de mica expostas ao HMDS	4.61
Tabela 4.7 – Teste de percolação de água nas fitas de mica: umidade obtida	4.61
Tabela 4.8 – Facilidade de percolação do vapor de água sobre a fita de mica de material de isolamento	4.63

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Distribuição dos departamentos em operação na Empresa – estudo de caso	4.8
Quadro 4.2 – Modelo de gestão de projetos – antes da reestruturação dos processos com base na Gestão da Qualidade	4.9
Quadro 4.3 – Estrutura Organizacional das Operações com base na Gestão da Qualidade	4.18
Quadro 4.4 – Workshop Ímãs Permanentes, plano de ação de curto prazo	4.26
Quadro 4.5 – Workshop Ímãs Permanentes, plano de ação de médio prazo	4.26
Quadro 4.6 – Workshop Ímãs Permanentes, plano de ação de longo prazo	4.27
Quadro 4.7 – Fluxo de controle da qualidade mecânico, elétrico e químico na produção de geradores eólicos	4.30

LISTA DE SIGLAS

ABEEOLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Nacional do Setor Eletro-Eletrônico
Bio-MEMS	Sistema de Sensores Bio-microeletromecânicos
CA/CC	Corrente Alternada para Corrente Contínua
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CI	Circuito Integrado
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
Curva ABC	Segregação de itens por valor ou quantidade, A = ~70%, B = ~20% e C = ~10%
ERP	do inglês Enterprise Resource Planning (Planejamento dos Recursos da Empresa)
ESI	Índice de Sustentabilidade Ambiental
FMEA	Análise de Modos e Efeitos de Falhas
HMDS	hexametildisilazana
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MASP	Método de Análise e Solução de Problemas
MEMS	Sistema de Sensores Microeletromecânicos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OHSAS	do inglês para Occupational Health and Safety Assessment Series (Série de Avaliação de Segurança e Saúde Ocupacional)
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCH	Pequena Central Elétrica

PDCA	do inglês: P(plan) – Planejar, D (do) – Realizar, C (check) – Verificar, A (act) – Agir
PIB	Produto Interno Bruto
PMBox	Project Management Box
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
ROI	Retorno sobre Investimento
SCM	Gestão da Cadeia de Suprimentos
SWOT	do inglês: Strengths (Forças), Weaknesses (Fraquezas), Opportunities (Oportunidades) e Threats (Ameaças)
TI	Tecnologia da Informação
USP	Universidade de São Paulo
VPI	do inglês Vacuum Pressure Impregnation (Impregnação por Pressão à Vácuo)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da secção transversal do cilindro que é ultrapassada pelo vento
GW	gigawatts
MW	megawatts
P	potência disponível do vento
R	raio do rotor
λ	velocidade de ponta
v	velocidade do vento
ρ	densidade do ar
ω	velocidade de rotação da turbina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1.1
2	ASPECTOS TEÓRICOS	2.1
2.1	TEORIAS DA QUALIDADE	2.1
2.2	SUSTENTABILIDADE, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA	2.7
2.2.1	Considerações	2.12
2.3	SETOR ELETROELETRÔNICO	2.13
2.3.1	Energia eólica – produtos, processos e necessidades	2.15
2.4	ENERGIA EÓLICA – CARACTERÍSTICAS E TECNOLOGIAS	2.19
2.4.1	Histórico	2.19
2.4.2	Tipos de tecnologias eólicas	2.20
2.4.2.1	Equipamentos assíncronos	2.21
2.4.2.1.1	Curva de potência	2.21
2.4.2.1.2	Equipamentos síncronos	2.22
2.4.2.2	Geradores eólicos e suas tecnologias	2.23
2.4.3	Principais topologias de turbinas eólicas	2.27
2.4.3.1	Turbinas eólicas com velocidade fixa	2.27
2.4.3.2	Turbinas eólicas com velocidade variável	2.28
2.4.3.2.1	Controles de potência	2.29
2.4.3.2.2	Sistema de controle da turbina eólica	2.30
2.4.3.3	Conceitos aplicados ao Gerador Eólico	2.31
2.4.3.4	O gerador síncrono de ímãs permanentes	2.37
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	2.38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	3.1
3.1	MÉTODO	3.1
3.2.	EQUIPAMENTOS	3.9
3.2.1	<i>Mock up</i> para teste de bobina	3.9

3.2.2	Mock up para teste em alta temperatura (forno)	3.9
3.2.3	Reatores	3.11
3.2.4	Outros Equipamentos	3.13
3.3	PROCEDIMENTOS	3.14
3.3.1	Materiais utilizados nos procedimentos	3.17
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	4.1
4.1	O EMPREENDIMENTO	4.1
4.1.1	Escolha do Empreendimento – contextualização	4.1
4.1.1.1	A Empresa – estudo de caso	4.2
4.1.1.2	Detalhando a Empresa	4.5
4.1.1.3	Considerações sobre o conjunto de informações obtidas	4.13
4.2	O ASPECTO MACROSCÓPICO	4.14
4.2.1	Ciclo PDCA: primeira iteração	4.15
4.2.1.1	O Chão de Fábrica	4.17
4.2.1.2	Os Parques Eólicos	4.21
4.2.1.3	Ações de melhorias	4.22
4.2.1.4	Considerações sobre as Ações de melhorias	4.27
4.2.2	Ciclo do PDCA: segunda iteração	4.28
4.2.3	Desenvolvimento e análise dos resultados do PDCA	4.31
4.2.3.1	Folha de verificação e tabela de contagem	4.31
4.2.3.2	Diagrama de Ishikawa modificado	4.33
4.2.3.3	Diagrama de Afinidades	4.34
4.2.3.4	Diagrama Matricial	4.36
4.2.3.5	Consequências imediatas do PDCA: <i>mock ups</i>	4.38
4.2.4	Ciclo do PDCA: terceira iteração	4.45
4.2.4.1	A abordagem macroscópica	4.45
4.2.4.1.1	Vedação do Gerador	4.50
4.3	O ASPECTO MESOSCÓPICO	4.52

4.4	ASPECTO MICROSCÓPICO	4.56
4.4.1	Protótipos: chapas estatóricas e bobinas	4.63
4.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ITERAÇÕES DO PDCA	4.70
4.6	PROPOSTA DE ROADMAP	4.73
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	5.1
6	REFERÊNCIAS	6.1

ANEXOS

Anexo A – Principais questões observadas com a microscopia óptica	A.1
Anexo B – Microscopia	B.1
Parte I	B.1
Parte II	B.3
Parte III	B.6
Anexo C – Processo de corrosão observado em aerogerador já instalado	C.1

1 INTRODUÇÃO

A miniaturização – tendência majoritária na área de Microeletrônica – permitiu a obtenção de vários dispositivos com alto desempenho, em tamanho e custo reduzidos, além do desenvolvimento de novos materiais e/ou processos de superfície para melhoria da performance de equipamentos outros que não os eletrônicos. Por exemplo, segundo Panescu (2006), MEMS (*Microelectromechanical System*) é uma “tecnologia desenvolvida da indústria de circuito integrado (CI) para criar sensores e atuadores em miniatura”. Originalmente, esses processos de semicondutores e materiais foram utilizados para construir sistemas elétricos e mecânicos, mas expandiram para incluir o biológico, óptico, fluídico, magnético entre outros. O impacto desse desenvolvimento é inegável; por exemplo, na medicina do início desse século, o mercado de Bio-MEMS gerou, de acordo com Gilleo (2016), “215 milhões de dólares americanos e estava projetado para crescer a um patamar de mais de 20% ao ano, atingindo nos Estados Unidos o valor de US\$ 550 milhões em 2006”. Contudo, o Mercado global de Bio-MEMS já era cerca de US\$ 1,9 bilhões em 2012 com previsão de atingir US\$ 6,6 bilhões em 2018 (KONOPLEV; LYSENKO; EZHOVA, 2015), enquanto que o mercado total para MEMS estava previsto para ultrapassar US\$ 20 bilhões em 2019 (GONZÁLEZ VIDAL et al., 2019). Assim, de modo geral na Engenharia, sobretudo na Engenharia Química, e também na Química, favoreceu a criação de equipamentos cada vez mais integrados, permitindo a obtenção ou manipulação de amostras mais complexas, em volume bastante pequeno, de modo rápido e contínuo (VERPOORTE; ROOIJ, 2003); ademais, a miniaturização e a tecnologia verde estão fortemente correlacionadas com os processos químicos (GARCÍA-SERNA; PÉREZ-BARRIGÓN; COCERO, 2007). Portanto, a miniaturização é uma força condutora importante para o desenvolvimento dos processos de química verde e um passo significativo para o desenvolvimento de um mundo sustentável (FREUND; SUNDMACHER, 2008). Muitas vezes, contudo, tais equipamentos são pequenos, mas ainda se encontram em escala macroscópica, o que pode se traduzir em vantagens produtivas, uma vez que alguns fenômenos complexos são evitados, tais como a capilaridade (HASEBE, 2004).

Atualmente, as engenharias não possuem uma proposta clara a longo prazo para desenvolver sistemas de produção de energia, especialmente em países ditos como em

desenvolvimento, tal qual o Brasil, já que o considerável crescimento do potencial consumo de eletricidade leva à necessidade de implementar várias fontes de energia (GWR, 2012; BAZMI e ZAHEDI, 2011).

O segmento de energia eólica, que apresentou taxas de crescimento até 2016¹, deverá continuar a apresentar bons resultados no Brasil; consta que a capacidade instalada de energia eólica neste país atingiu cerca de 3.400 MW, representando aproximadamente 3% do potencial total no país, dados de 2014; as perspectivas atingiram um patamar de aproximadamente 7300 MW (ABEEOLICA, 2014). Ainda segundo a ABEEOLICA (2018), a geração de energia eólica cresceu 15% em 2018, contabilizando ao fim desse ano 5.304,4 MW em produção e 14.541,7 MW em capacidade instalada. Por outro lado, para obter-se um nível de sustentabilidade de negócio e uma relação de *retorno sobre investimento* (ROI²) eficiente, é necessário um longo ciclo de vida; isto equivale a, pelo menos, 25 anos. Entretanto, os custos iniciais são muito altos e o tempo às vezes é um fator limitante. Assim, a pesquisa e desenvolvimento devem responder rapidamente às expectativas tecnológicas e operacionais para garantir a viabilidade do negócio.

Vale ressaltar que a geração de energia eólica é considerada ambientalmente correta (KALDELLIS et al., 2011), tendo seu maior impacto ocorrido durante a produção de turbinas a ar, embora a maior parte do material consumido possa ser reciclada após seu ciclo de vida (DONES et al., 2007). De fato, há uma década, Nemet (2008) já apontou a necessidade de estimular a inovação em tecnologias energéticas de baixo carbono, como o setor de energia eólica. Neste caso, é realçada a necessidade de um quadro baseado na pressão da procura ou demanda puxada (*pull demand*) e políticas de tecnologia de impulso ou tecnologia empurrada (*push technology*) para perseguir a inovação necessária. Por exemplo, analisando o caso da energia eólica na Califórnia, o autor chama a atenção para três características principais no que se refere à prevenção de mudanças climáticas:

- (a) fontes de energia de emissões sem efeito-estufa, o que significa um aumento considerável no fornecimento de energia eólica ao longo do século,
- (b) a disponibilidade comercial desta tecnologia de longa duração e
- (c) a dramática mudança tecnológica que reduziu os custos de turbinas eólicas por um fator igual a 5 vezes em duas décadas no século passado.

¹ A crise diminuiu os investimentos e a taxa de aumento de oferecimento dessa energia, mas, segundo (DE LIMA, SANTOS, MOIZINHO, 2018), a tendência de crescimento ainda se mantém.

² ROI – *return on investment*

No entanto, as principais forças motrizes do bem estabelecido modelo de energia eólica nesse estado americano, de acordo com o autor, estão mais relacionadas aos ganhos do aprendizado de fazer e/ou usar do que a rápida utilização de seus derivados, muitas vezes dentro de um ano ou dois, além da própria construção do parque eólico, que leva em média dois anos, dependendo do número de turbinas a instalar.

Nemet (2008, p. 47-48) acrescenta ainda que o intervalo entre fazer um investimento e sua recompensa é maior; em outras palavras, “os novos dispositivos devem ser adaptados às condições do mundo real, integrados em grandes sistemas tecnológicos e muitas vezes exigem o desenvolvimento de tecnologias de suporte para que os usuários as adotem”. Assim, a tecnologia empurrada pode corroborar para inovações mais radicais, e “*puxar* a demanda de modo incremental”.

No entanto, tal abordagem incremental permitiu que os custos da energia eólica da Califórnia caíssem por um fator igual a 10 sem quaisquer mudanças radicais no *design* (projeto) nas últimas três décadas; no final do século, isto também significava energia eólica sem subsídios, promovendo de certo modo uma concorrência quase que direta com o gás natural.

Taylor apresentou em sua revisão da política solar da Califórnia (TAYLOR, 2008) uma análise semelhante sobre a dicotomia entre o impulso tecnológico e demanda energética, todavia o principal argumento foi trazer a importância da política de inovação ambiental, uma vez que esta divisão pode ser necessária, mas não suficiente a fim de que a inovação ocorra. Observe que esta revisão considera o termo *tecnologias de energia solar* como “não apenas para tecnologias alimentadas diretamente a partir da energia solar, mas também para tecnologias alimentadas indiretamente a partir dessa energia, incluindo energia eólica, maremotriz e biomassa”.

Nesta mesma época, o consumo de energia elétrica no Brasil, dados de 2007, estava distribuído da seguinte forma:

Tabela 1.1 – Distribuição de consumo de eletricidade no Brasil em 2007

Setores	Consumo de eletricidade (%)
Energético	4,2
Mineração	2,6
Agropecuário	4,3
Indústria Pesada	26,5
Indústria Leve	17,7
Transporte	0,4
Residencial	22,1
Comércio/serviços	14,2
Público	8,2
Total	100,0

Fonte: Energia para quê e para quem no Brasil (BERMANN, 2007, p. 2)

Isto equivalia a aproximadamente ao consumo de 412,1 bilhões de KWh/ano para uma relação industrial de 51%. Para tanto, o modelo energético brasileiro se compunha das seguintes fontes de energia para suprir esta realidade e um plano de crescimento da macroeconomia para 5% ao ano. A principal fonte ainda estava por conta do petróleo e seus derivados, com 37,8%, seguido da biomassa, com 15,6% e Energia Hidráulica e Eletricidade, com 14,8%, compondo o top 3. Com isso, a realidade das fontes alternativas de energia limpas não se configurava com a importância devida, o que foi gradativamente alterada ao longo dos últimos anos.

Gráfico 1.1: Oferta Interna de Energia segundo a participação das fontes – 2007

Fonte: MME-Balanco Energético Nacional, 2007

Autor: BERMANN (2007, p. 4)

Para contrapor-se a essa situação, segundo (DE LIMA, SANTOS, MOIZINHO, 2018), as políticas públicas do país mudaram ao longo das últimas décadas e possibilitaram que o Brasil se apresentasse com:

uma cadeia produtiva do setor bastante desenvolvida e diversificada acumulando conhecimento e expandindo gradativamente. Dentre as externalidades positivas geradas, destacam-se: i. o aumento da capacidade produtiva pela indústria do setor eólico; ii. o incremento da demanda agregada, pois exige-se mão de obra qualificada, compra de equipamentos e insumos para o setor; e iii. a expansão da capacidade eólica ajuda a aumentar a oferta de energia elétrica (DE LIMA, SANTOS, MOIZINHO, 2018)

Inovação, pressão devido a mudanças rápidas, redução de custos com aumento de desempenho e preocupações ambientais não são uma prerrogativa do setor de energia eólica; por exemplo, o setor eletrônico lidou com tais obstáculos há pelo menos cinco décadas. Assim, para responder essas questões, o grupo ITRS (*International Technical Roadmap for Semiconductors*), historicamente responsável pelo roteiro³ em tecnologias de semicondutores, teve sua abordagem mudada na última década. Deve-se considerar que até recentemente a aplicação da lei de Moore – a qual afirma que o número de componentes em um *chip* duplica

³ Roadmap

a cada 18 meses, enquanto seus custos diminuem – foi a força motriz de um ciclo virtuoso que proporcionou um crescimento exponencial do mercado de semicondutores e altos investimentos em tecnologias correspondentes, ou seja, um roteiro baseado na abordagem de tecnologia empurrada, altamente focada nos esforços de P&D; por isso, as tendências atuais mudaram significativamente. A força motriz agora é incorporar funcionalidades que agregam valor aos dispositivos, criando sistemas integrados com funções pré-determinadas.

Esta nova abordagem requer a implementação de uma singular metodologia, que passa pela identificação de novas necessidades societárias para a definição de lacunas tecnológicas; e assim determinando os parâmetros físicos e químicos que são limitações importantes no desenvolvimento de novas tecnologias (ARDEN et al., 2010).

Uma característica interessante é que tal abordagem mudou após décadas de desempenho incremental utilizando o mesmo mecanismo – escalonamento de circuitos integrados – porque essa concepção estava atingindo seus limites físicos e químicos fundamentais (WRISTERS, 2013), (MOHAMMAD et al.; 2014). Além disso, a busca cara e arriscada de novas tecnologias também leva a ecossistemas inovadores, nos quais a parceria não só reduz esses custos e riscos, mas também combina o conhecimento complementar para resolver problemas complexos; novamente, o setor de semicondutores é um exemplo primordial (LETEN et al., 2013).

Com base nas considerações acima, a seguir são discutidas as principais restrições tecnológicas no parque eólico (*site*) e o ciclo de vida da energia eólica. De fato, em uma entrevista importante, Foyer e Wilcox (2014), com base em informações de seguros, apontaram que para esta indústria o problema principal “não é a frequência das reivindicações, mas a gravidade dessas reivindicações”. Por exemplo, uma pá de turbina eólica danificada pela iluminação poderia resultar em uma reivindicação de aproximadamente US\$ 500.000,00. E além do próprio dano causado – a perda de renda por falta de atividade ainda agrava a situação. Assim, “a manutenção torna-se uma questão importante, sobretudo pelo fator tempo em que um parque eólico esteja em operação” e “se um sistema não é mantido adequadamente, então ele vai quebrar e, posteriormente, interceptar o fluxo de renda”, ou seja, não é apenas manutenção preventiva, mas também manutenção preditiva que provém das condições de monitoramento geridas e executadas (FOYER; WILCOX, 2014).

De acordo com Xin et al. (2014), acidentes de turbinas eólicas estão se tornando uma preocupação global. Na China, país que lidera a capacidade instalada no mundo, sobretudo a partir de 2012, as razões para acidentes em locais de energia eólica, curto-circuito de turbinas eólicas e colapso mostraram-se como primordial preocupação. Alguma explicação pode advir

da aplicação ‘apressada’ de novas tecnologias e conceitos (tais como grandes turbinas, pás com grandes dimensões, operar com baixa velocidade do vento, tecnologia de turbinas eólicas de alta altitude e outros); além disso, devido aos baixos preços dos equipamentos eólicos e sua aplicação específica, e, por conseguinte seu volume de fabricação baixo é difícil investir suficientemente em áreas como a melhoria tecnológica e a garantia da qualidade do produto; portanto, problemas de qualidade de turbinas eólicas também estão surgindo ao longo deste ciclo.

Considerando que as turbinas eólicas são produzidas em poucos meses, mas devem permanecer em operação por pelo menos 20 anos, a consequência é um cenário altamente crítico para esta área de produção (CRAWFORD, 2009), onde as questões de qualidade, especialmente a de confiabilidade, devem desempenhar papéis importantes.

Embora vários autores distintos tenham analisado tal questão (KALDELLIS et al., 2011), (FOYER, 2014) e (XIN et al., 2014), não há consenso sobre quais sejam os principais parâmetros a serem enfrentados para melhorar o desempenho das turbinas. Uma única solução é improvável, pois muitos parâmetros diferentes influenciarão este tipo de equipamento; além disso, as questões envolvidas em falhas de equipamento são devidas não apenas às características técnicas, mas também à tomada de decisões do projeto e de como desenhar o processo produtivo, *a priori*. Portanto, diferentes turbinas em locais diferentes não são tão simples ou mesmo não apresentam direta correlação para que seja possível aplicar análises comparativas.

Por conta disso, e para melhor reunir as principais causas e ocorrências de defeitos severos em turbinas eólicas no País, recorreu-se a relatos através de entrevistas diretas com equipe técnica da área de produção de empresas produtoras de turbinas eólicas. O resultado deste levantamento gerou a seguinte classificação para os pontos críticos indicados:

- Nível de salinidade do ambiente;
- Teor de umidade dos dispositivos – parte interna;
- Nível de sujidade (particulados sólidos);
- Relação com as intempéries;
- Relação de instalação *onshore* / *offshore*.

Nesse contexto, tanto o controle das propriedades de superfície do equipamento em produção como também a avaliação do ambiente após instalação torna-se igualmente importante. Todavia, até onde esta pesquisa pôde averiguar, não há na literatura disponível tal abordagem. A preocupação, pelo aspecto produtivo apresenta muitas vertentes, a saber:

- a avaliação do ciclo de vida para definir impacto na produção de CO₂ (LENZEN; MUNKSGAARD, 2002);
- os melhores cenários de produção dessa energia (KALDELLIS et al., 2011) e
- a respectiva tecnologia e aerodinâmica associadas (CHEN et al., 2009) (JOSELIN HERBERT et al., 2007).

Ackermann e Söder (2000) aponta que no final do século passado a capacidade instalada de tais equipamentos tendia a dobrar a cada 3 anos, o que tornava o desenvolvimento das turbinas de fundamental importância para o melhor uso desse recurso renovável; porém, o enfoque para tal desenvolvimento ocorre geralmente na fase do projeto (*design*) dos equipamentos, além de aspectos econômicos e/ou ambientais (LEUNG et al., 2012).

Outro exemplo de enfoque voltado para soluções já consagradas é o impacto da água no ambiente, quer seja na forma de umidade ou precipitação quer seja na formação de gelo (OLIVIER PARENT, 2011). Para esses casos os sensores propostos pela norma ISO-12494 são cilindros coletores com 30 mm de diâmetro e comprimento de 0,5 m; outros sensores em geral não são empregados porque são considerados de alto custo. Situação semelhante ocorre na determinação de água (SHAJIEE, 2013); ou, como colocado por Ng Kay-Wern et al. (2013) em sua revisão, é virtualmente nula a tentativa de utilizar os novos materiais disponíveis ou em fase de desenvolvimento, tais como os desenvolvidos pela nanotecnologia. Devido às suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e elétricas, o autor sugere o uso de nanotubos de carbono no desenvolvimento de turbinas.

Também pelo aspecto de manutenção, o monitoramento objetiva a definição de sensores para controles macros, tais como existência de vibração, estresse, medidas de aquecimento, etc. (GARCÍA MÁRQUEZ, 2012).

Assim, o controle das condições, tanto no processo de produção quanto durante a operação, das condições de superfície das turbinas para produção de energia eólica pode ser de grande valia para a melhoria e extensão do tempo de vida desses equipamentos. No entanto, o controle utilizando-se sensores mais complexos (SCHUBEL, 2013) é comum apenas para a questão estrutural, não de operação ou montagem.

Diante do exposto fica aparente as correlações entre o setor eletroeletrônico – em particular a microeletrônica - e o eólico e, deste modo, o presente trabalho tem como objetivo geral a utilização de metodologia/processos/produtos da área de microeletrônica para a otimização de equipamentos de produção (turbinas) de energia eólica. Tais equipamentos, devido à sua

tecnologia ainda incipiente, tendem a apresentar uma série de defeitos ou comportamentos espúrios que diminuem sua vida útil.

A importância, contudo, de vida longa e viabilidade técnica do uso dessa energia renovável é inquestionável, uma vez que o custo elevado impacta economicamente qualquer empreendimento, além do problema ambiental causado pelo descarte inadequado das partes e peças com tamanho e peso consideráveis.

Portanto, para desenvolver esta pesquisa, e apresentar uma nova abordagem em como avaliar este setor, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- pesquisar os dados e as possíveis causas do problema, a correlação teórica com a prática da forma como será proposto o projeto, o desenvolvimento do processo e sua operação, de modo que a garantia da qualidade do produto seja melhorada a partir da definição do produto, das especificações e da promoção de processos corretos;
- propor uma metodologia de análise e desenvolvimento de estudos de confiabilidade nessa área;
- Mecanismo de atualização que corresponde a criação de um fluxograma que permita o desenvolvimento tecnológico (baseado principalmente em sensores e miniaturização) para elevar o ciclo de vida operacional dos equipamentos estudados. Em outras palavras, criando um *roadmap* para a aplicação do conhecimento da área de microeletrônica no setor eólico.

Para facilitar a compreensão dos próximos capítulos, a Figura 1.1 apresenta o mapa conceitual desta tese. Em uma observação inicial, foram encontrados elementos que indicavam certas similaridades entre os setores eletroeletrônico e o eólico, o que levou a proposta de fazer uma análise comparativa de processo e produto; caso as similaridades apresentem-se exíguas, será possível mudanças no setor, porém apenas incrementais. Por outro lado, existindo conexões mais fortes, pode-se propor novos desenvolvimentos, tecnologias e melhorias que, se testadas e aprovadas, criam um *roadmap* para melhoria da produção de turbinas eólicas. É nesta distinta abordagem que se encontra a inovação deste trabalho.

Figura 1.1. – Mapa Conceitual da Tese

Fonte: O Autor

Neste caso, para a composição deste trabalho, será apresentado no Capítulo 2, Aspectos Teóricos, Capítulo 3, Materiais e Métodos, Capítulo 4, Resultados e Discussões, e Conclusões e Trabalhos Futuros, a prosseguir o Capítulo 5, e por fim o Capítulo 6 trazendo as Referências que serviram de base ao desenvolvimento da tese.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

Para melhor compreensão da pesquisa aqui desenvolvida, este item tem como proposição abordar os seguintes temas:

- Teorias da Qualidade – esta pasta aborda a análise não somente aplicada aos processos, mas também aos produtos; além disso, considera inovação e tecnologia nesses dois aspectos. Assim, é preciso descrever as ferramentas da Qualidade que asseguram que o processo fora desenvolvido adequada e reprodutivamente.
- Sustentabilidade, Inovação e Tecnologia – sob o aspecto do setor eletroeletrônico, ou seja, considerando desde questões microscópicas da construção de um dispositivo até sua utilização em um ambiente macroscópico.
- Energia Eólica – produtos, processos e necessidades.

2.1 TEORIAS DA QUALIDADE

A função da Qualidade, segundo Toledo (1987), consiste no conjunto de atividades através das quais se procura definir e obter a propriedade desejada dos produtos, atuando de forma a cobrir todo seu ciclo de vida, desde a concepção (ideia) e projeto até o seu consumo, quando então se completa a realização deste ciclo através da retroalimentação de informações para revisão da concepção e projeto do produto.

Os fundamentos da Qualidade, quando da utilização de um produto ou serviço, são aqueles que atendem perfeitamente, de modo confiável, acessível, seguro e no tempo adequado, às necessidades e/ou especificações do cliente (MIZUNO, 1993). Os atributos mencionados nesse conceito são obtidos quando há:

- projeto bem elaborado, considerando o máximo de fatores e reduzindo o volume de incertezas recorrentes;
- nível nulo de defeitos ou tendente a zero;
- custo baixo ou adequado aos requisitos envolvidos;
- segurança no processo e no produto;

- entrega no prazo e local programados, de acordo com as especificações técnicas.

Assim, há uma obrigatória correlação entre a Qualidade e os sistemas de gestão, os processos de fabricação industrial, as técnicas e normas para sua verificação, bem como suas metodologias e ferramentas de trabalho. A importância dada às Ferramentas e Metodologias da Qualidade, portanto, está na capacidade destas para definir, mensurar, analisar e propor soluções aos problemas que oneram o desempenho dos processos do Empreendimento. A seguir, algumas ferramentas, programas, etc. que foram úteis nesse trabalho são abordados.

É relevante sublinhar que a Gestão da Qualidade deve ter sua abordagem no momento da concepção ou ideia do produto ou processo, de acordo com o cenário em questão. Uma vez definidas as especificações e/ou características do projeto, estudos da qualidade passam a ser determinantes para tomadas de decisão. Um método indicado nesta fase é o FMEA – Método de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*), que se trata de um caminho que busca, na origem, evitar, por meio da análise das falhas potenciais e de propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no produto decorrentes do projeto do produto ou do seu processo de manufatura. Ademais, é um forte instrumento para avaliar os processos e produtos de modo a identificar as características tanto críticas como significativas do projeto. Na prática o FMEA correlaciona os níveis de severidade, ocorrência e impacto para realizar as avaliações. Com isso, busca-se, sobretudo, aumentar sua confiabilidade, que é a probabilidade de o produto desempenhar a função especificada, durante certo intervalo de tempo em determinadas condições de uso. Ademais, a aplicação do FMEA é importante pelo que pode proporcionar à Empresa, a saber (TOLEDO et al, 2013):

- uma forma sistemática de catalogar informações sobre as falhas dos produtos e processos;
- aumento do conhecimento sobre os problemas nos produtos e processos;
- discussão e planejamento de ações de melhoria no projeto do produto, ou no processo, baseados em fatos e dados e devidamente monitorados, o que contribui para a melhoria contínua;
- redução de custos, por meio da prevenção da ocorrência de falhas;

- benefício de incorporar, dentro da organização, a atitude de prevenção de falhas, a atitude de cooperação multidisciplinar e de trabalho em equipe, com a preocupação e o foco na satisfação dos clientes.

Vale salientar que para garantir a confiabilidade do produto e melhoria contínua do sistema, é primordial ter como base de trabalho o ciclo PDCA (Figura 2.1), metodologia difusora da gestão sob o enfoque da qualidade, e o MASP (Método de Análise e Solução de Problemas), reunião das ferramentas clássicas para o controle e monitoramento da qualidade propriamente dito.

O ciclo PDCA (CALDEIRA FILHO, 2004), também conhecido como *Ciclo de Deming*, é fundamental no Planejamento e Controle da Qualidade e é dividido em quatro etapas (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Ciclo PDCA

Fonte: Adaptado de PYZDEK (2003, p. 67)

A primeira etapa se refere ao planejamento (vem do inglês *to plan*), ou seja, ao entendimento e definição dos objetivos tático-estratégicos, ao estabelecimento das metas, dos métodos para a sua obtenção e recursos disponíveis e/ou necessários, de acordo com os requisitos do cliente e com a política de qualidade da organização. A segunda se refere à execução (vem do inglês *to do*), ou seja, realizar e implementar o plano construído na etapa

anterior; nesta fase é necessário educar e treinar as pessoas para que a tarefa seja executada de acordo com o planejamento. A terceira se refere à verificação (vem do inglês *to check*), ou seja, averiguar se os resultados estão de acordo com a tarefa executada; em outras palavras, monitorar e medir os processos de acordo com a política, objetivos e requisitos pré-estabelecidos, e, comparar e relatar os resultados. Fechando o ciclo, temos a ação (vem do inglês *to act ou action*), que significa atuar, agir corretivamente no processo, aplicando ajustes, se necessário, e padronizando os processos para seguir operação sistemática.

À medida que sejam identificados desvios do planejado, ou mesmo não conformidades, aplica-se uma ferramenta para tratar estas ocorrências. Para tanto, tem-se o MASP, Método de Análise e Solução de Problemas que, por sua vez, é um método focado na resolução de problemas; esta atividade está diretamente adaptada para o ambiente da produção, aplicando o método científico do raciocínio (método cartesiano) a fim de trazer soluções aos problemas *a priori* crônicos, mas também comuns de acordo com os critérios aplicados, e que é, ou pode ser, implementado por qualquer profissional qualificado. Este método reúne uma série de ferramentas clássicas da Qualidade e age como um gerenciador da solução. Em princípio, ele tem como base a combinação sequencial das seguintes ferramentas: o *Brainstorming*, o gráfico de Pareto, o diagrama de Ishikawa e, fundamentalmente, avaliado de acordo com o ciclo PDCA. Essa ferramenta se constitui do levantamento de medidas concretas, pela aplicação e pela avaliação dos resultados gerados nesse processo, no tempo.

Por fim, para facilitar a análise do problema, o *Brainstorming* que se define por uma técnica de reunião em grupo bastante eficaz, tanto para a escolha do problema como para o seu entendimento e proposição de soluções. Essa técnica está baseada no princípio da suspensão do julgamento e na teoria controversa de que quantidade origina qualidade, isto é, quanto maior o número de ideias, maior será a possibilidade de resolução dos problemas.

Quanto às ferramentas clássicas da qualidade, inicialmente foram listadas 7: Fluxograma; Cartas de Controle; Diagramas de Causa e Efeito (Espinha de Peixe ou Diagrama de Ishikawa); Folhas de verificação; Histogramas; Gráficos de dispersão e Diagrama de Pareto. Destas, as ferramentas mais importantes para a composição deste trabalho foram: os Diagramas de Pareto e de Ishikawa.

O Diagrama de Pareto permite uma visão clara da relação entre ação e benefício, ou seja, prioriza a ação que trará o resultado esperado. Essa técnica consiste num gráfico de barras que ordena as frequências de modo decrescente, ou seja, da maior para a menor, e permite localizar os problemas de maior influência no processo, uma vez estabelecido o critério, e promover a eliminação dos desperdícios (CAMPOS, 1996). Ademais, este grafo permite avaliar o comportamento do processo analisado segundo relações estatístico-matemáticas, tais como: a 80/20 ou curva ABC¹.

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como o de Causa e Efeito, foi idealizado pelo professor Kaoru Ishikawa e tem como principal objetivo identificar as possíveis causas de um problema em estudo. Esse diagrama é constituído do registro das diversas causas de um problema, a partir da análise e das classificações das prováveis origens dessas causas. Essas classificações, originalmente, foram construídas com base no que se denomina 4M (Figura 2.2), isto é, método, mão de obra, material e máquina. Posteriormente, esse conceito foi estendido para 5M, adicionando-se o grupo de meio ambiente para auxiliar a classificação das causas (CALDEIRA FILHO, 2004). A execução dessa técnica é caracterizada por duas atividades diversas: o levantamento da maior quantidade possível de causas e o arranjo das causas de forma sistemática.

Figura 2.2 – Exemplo de Diagrama de Ishikawa

Fonte: Adaptado de TOLEDO et al. (2013)

¹ Curva ABC, termo logístico que tem como significado a segregação de itens por valor ou quantidade nas seguintes proporções, i.e., A = ~70%, B = ~20% e C = ~10%.

Nas últimas décadas do século passado (CARVALHO e PALADINI, 2012), para melhorar tanto o planejamento como a gestão, outras ferramentas foram propostas. Atualmente, são conhecidas como as Novas Ferramentas da Qualidade, assim denominadas: Diagrama de Afinidades; Diagrama de Relações; Diagrama em Árvore; Diagrama Matricial; Matriz de Prioridades; Gráfico de Decisão do Processo e Diagrama de Flechas. Dentre estas modernas ferramentas da Qualidade, para esse trabalho destacam-se: o Diagrama de Afinidades, Diagrama das Relações e o Diagrama Matricial em 'L'.

O Diagrama de Afinidades é uma representação gráfica da relação particular entre o que grupos têm em comum e aquilo que os distingue dos outros. (CALDEIRA FILHO, 2004). Especialmente para este estudo, o Diagrama de Afinidades foi utilizado para recolher os dados e organizar grupos confusos e dispersos destes dados, como por exemplo – organizar na linha do tempo os vários componentes utilizados para definição dos tipos de geradores fabricados. Neste caso, esta ferramenta foi utilizada para:

- direcionar as soluções para os problemas;
- organizar as informações em prol das soluções dos problemas;
- detectar as causas-raízes dos problemas elencados;
- prever situações futuras – extrapolação;
- adicionar uma nova metodologia relacionada ao processo de avaliação;
- apresentar um plano de coleta de dados para futura estratificação.

Diante de um emaranhado de informações, muitas vezes soltas e não claramente relacionadas, o Diagrama das Relações é indicado para que se possa, de modo lógico, atribuir os vínculos de causa e efeito. Este evidencia tais lógicas ao reconhecer que cada ocorrência não é fruto de uma única causa ou característica. Entretanto, pelas características deste setor, há algumas dificuldades para implementação do diagrama neste estudo, dentre as quais se citam:

- O tema é complexo e as relações de causa e efeito não são facilmente visíveis;
- A sequência correta de ações é bastante crítica no desenvolvimento do tema;
- Revisões são constantes e causam impacto direto no fator tempo.
- Por outro lado:
- Esclarece a estrutura do problema e permite reunir as combinações;
- Proporcionam meios para alcançar os objetivos.

De acordo com Campos (1996), o uso desta ferramenta apresenta as seguintes vantagens: simplifica a solução de problemas já que o “por quê” se torna claro em sua divisão em pontos principais, a participação dos envolvidos na situação problemática torna-se explícita e os postos-chave, e também as possibilidades futuras dos problemas, são apresentados.

Finalmente, para complementar este processo de revisão dos problemas e suas causas e se construir um cenário realista de rastreabilidade e consequente análise de confiabilidade, é proposta a aplicação do Diagrama Matricial (TOLEDO et al., 2013).

Essa ferramenta relaciona o raciocínio multidimensional através de um conjunto de fenômenos decompostos em fatores, facilitando a compreensão da interação entre eles. Neste estudo, a Matriz em “L” foi selecionada para o uso devido à possibilidade de representar os dados e suas relações na forma cartesiana. Sua principal tarefa foi organizar os sistemas de qualidade e mostrar a relação entre a característica do produto e seus planos de controle de qualidade.

2.2 SUSTENTABILIDADE, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA

Apesar do muito que foi abordado, as definições de desenvolvimento sustentável e de sustentabilidade ainda apresentam discrepâncias na nomenclatura científica. Assim, usando os descritores “desenvolvimento sustentável” – sustentabilidade – conceito, no Google Acadêmico® encontram-se situações como a descrita na Tabela 2.1. A escolha do início da contabilização deve-se à publicação do livro *Nosso Futuro Comum* (1987), que definiu desenvolvimento sustentável como “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades”. É interessante observar que nesse início existem pouquíssimas publicações e que estas não estão correlacionadas à gestão ambiental. Na verdade, as 3 publicações listadas com os descritores desenvolvimento sustentável – sustentabilidade – conceito – gestão ambiental não abordam sustentabilidade direta ou indiretamente. A que mais se aproxima (CARVALHO, 1991), o faz considerando o conceito estrito de desenvolvimento sustentável, ou seja, “como aquele que deve atender às necessidades e aspirações do presente, sem comprometer a possibilidade de atendê-las no futuro”, mas, ao mesmo tempo afirma que “É preciso ser mais rigoroso com a ideia de sustentabilidade. Afinal, trata-se de sustentar o quê? Para quem? Atualmente, todos são partidários do desenvolvimento sustentável.”, o que

coloca os dois termos como sinônimos e termina observando que “Para ser coerente com um modelo politicamente alternativo de desenvolvimento, há que se pensar em outros parâmetros de sustentabilidade. Diante de tudo isso, cabe retomar a questão sobre o que sustentar. Qual o critério de sustentabilidade que está em jogo para o mundo dos negócios?”.

Tabela 2.1 – Descritores e respectivo número de citações no Google Acadêmico®

Descritores (publicações em português)	Número de citações – nos períodos de – até					
	87-91	92-96	97-01	02-06	07-12	13-17
“desenvolvimento sustentável” – sustentabilidade – conceito	14	150	1250	7980	15200	14600
“desenvolvimento sustentável” – sustentabilidade – conceito – “gestão ambiental”	3	42	426	2980	8280	12000
“desenvolvimento sustentável” – sustentabilidade – conceito – “gestão ambiental” - indicadores	1	30	267	2070	7780	7480
“desenvolvimento sustentável” – sustentabilidade – conceito – “gestão ambiental” – indicadores - taxonomia	--	1	12	113	514	604
“desenvolvimento sustentável” – sustentabilidade – conceito – “gestão ambiental” – indicadores – revisão – indicadores – inovação	1	21	189	1400	5360	5150

Fonte: O Autor

No próximo período, um trabalho do IPEA² chama atenção ao correlacionar tais conceitos. O estudo afirma “O conceito de ‘sustentabilidade institucional’ é uma aquisição recente dentro da filosofia do desenvolvimento sustentável e desenvolve várias premissas sobre como cidades devem se desenvolver para se tornar sustentáveis”. Além disso, Campos *et al.* (1996) tenta definir, com um estudo de caso, o Custo da Qualidade Ambiental, o que significa, a grosso modo, remover a questão ambiental de seu papel secundário ou de externalidade e colocá-la como parte integrante das discussões, e conclui afirmando: “Para que haja realmente um desenvolvimento sustentável, com vantagens tanto às empresas

² IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, fundação pública federal vinculada ao Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão.

quanto ao meio ambiente, estas empresas necessitarão realizar mudanças organizacionais, estratégicas e de foco de atuação”. No próximo período, livros discutindo desenvolvimento sustentável por inúmeras ópticas são observados. Sanches (2000) usa o termo “gestão ambiental proativa”, e coloca em duas esferas distintas o desenvolvimento sustentável – visto como ideia, e sustentabilidade – como estratégia. Assim, a autora sugere que “A base de desenvolvimento de ideias coloca novas formas de pensamento e questões como o desenvolvimento sustentável e a responsabilidade ambiental” enquanto que, de acordo com Sanches (2000):

[...]o conteúdo dos planos ambientais varia de empresa para empresa, mas as que se voltam para os princípios da sustentabilidade e responsabilidade ambientais geralmente utilizam requisitos internos ou metas até mais restritivos que os legalmente impostos, adotando uma abordagem integrada das questões ambientais em sua estratégia de negócios.

Ainda no começo deste século, Ruscheinsky (2003) preocupa-se com o uso indiscriminado da palavra sustentabilidade e ressalta que “para quem não quer sucumbir a modismos vazios de conteúdo”, dever-se-ia exigir “a definição do que se entende pelo conceito”. O autor chama a atenção dos diferentes atores (*stakeholders*) e suas interpretações do tema. Para ciências sociais, alguns autores privilegiariam mudanças culturais ou sociais que ocasionam mudança de valores; outros enfocariam o meio ambiente, as instituições políticas, a regulamentação. O autor também ressalta que a “sustentabilidade é um termo relativamente antigo, de origem no saber técnico na agricultura no século XIX”, mas que atualmente “é recente e por isso mesmo sujeito a ambiguidades e dilemas quanto ao seu uso e significado”. Assim, “em princípio a sustentabilidade refere-se à capacidade de um modelo ou sistema sustentar-se na dinâmica evolutiva sem permitir que algum setor se aprofunde em crises de tal forma que venha a atingir a totalidade”.

Por outro lado, a revisão de Araújo et al. (2006) há uma clara divisão entre desenvolvimento sustentável e sustentabilidade, porque, segundo o autor, para o primeiro:

[...]utilizam o termo para designar a expectativa de que o país entre numa fase de crescimento que se mantenha ao longo do tempo, faz com que tal forma de desenvolvimento pressuponha a expansão econômica permanente, gerando melhoria nos indicadores sociais, além da preservação ambiental (ALTENFELDER, 2004 apud ARAUJO, 2006).

Enquanto para o segundo é a capacidade de se *auto sustentar*, de se *auto manter*; uma atividade sustentável qualquer é aquela que pode ser mantida por um longo período indeterminado de tempo, ou seja, para sempre, de forma a não se esgotar nunca, apesar dos imprevistos que podem vir a ocorrer durante este período. Pode-se ampliar o conceito de sustentabilidade, em se tratando de uma sociedade sustentável, que não coloca em risco os recursos naturais como o ar, a água, o solo e a vida vegetal e animal dos quais a vida (da sociedade) depende (PHILIPPI, 2001 apud ARAUJO, 2006).

Além disso, o autor considera que “apesar de apresentarem similaridades, torna-se comum relacionar desenvolvimento sustentável a políticas públicas e sustentabilidade as demais ações”, e chama a atenção para o tripé de sustentabilidade (*triple-bottom line*), definido pela Cúpula Mundial do Desenvolvimento Sustentável, a Rio+10 “ao dizer que o Desenvolvimento Sustentável tem uma base formada por três pilares – o econômico, o social e o ambiental – e propõe a erradicação da pobreza como objetivo fundamental”. A revisão de Barbosa (2008) apresenta proposta semelhante.

A preocupação com indicadores é mais recente, por exemplo, a única entrada no período de 1987 – 1991 trata genericamente de assuntos diversos (GARCIA, 1991). No período seguinte, a importância dos indicadores começa a aflorar e o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA gera texto específico (MOTTA, 1996); no período seguinte uma dissertação aborda especificamente os indicadores do Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável – CEBDS (AZEVEDO, 2006) e Mikhailova (2004) revisa a definição de indicadores, informa que “os esforços mais significativos para mensurar o desenvolvimento sustentável começaram, somente, na década de 90” e descreve indicadores em três níveis: “A primeira etapa da elaboração de medidas de sustentabilidade foi

caracterizada pelos esforços em se obter único indicador no nível macro que poderia substituir os macro-indicadores convencionais (PIB *per capita*, por exemplo) utilizados para avaliar o bem-estar nacional”, e, a partir dos anos 90 os estudos concentram na questão “quais os indicadores econômicos, mensurados em valores monetários, ou naturais, mensurados em unidades físicas, são melhores para medir a sustentabilidade?” e, posteriormente, “tratam com índice único (mensurado em pontos)” como o Índice de Sustentabilidade Ambiental (ESI, *Environmental Sustainability Index*). Nos períodos seguintes, as definições e aplicações de indicadores em estudos de caso aumentam exponencialmente. A preocupação por melhores definições e, a melhor revisão dos conceitos, aparece por último, como pode ser visto a seguir.

Segundo a revisão de Sartori et al. (2014), o conceito de sustentabilidade ainda é mal compreendido e muitas vezes é tratado como sinônimo ao conceito de desenvolvimento sustentável. Ela desdobra a sustentabilidade em dois campos: fraca, substituíveis por práticas às vezes não-sustentáveis, compensatórias, e, forte, contundente e não-corruptível. Outro ponto importante de seu estudo com base no *triple-bottom line*, é sim preocupar-se com as gerações futuras, todavia os problemas devem poder ser resolvidos na geração atual. Por fim, no que tange à questão empresarial estratégica, ela aponta a relação de causalidade entre sustentabilidade e impacto financeiro, trazendo um tema muitas vezes distante das decisões importantes para a pauta das Empresas, relacionando melhoria de produtividade sem aumentar seus custos. Para tanto, afirma que é necessário mensurar a sustentabilidade através de índices e indicadores.

Fechando e completando esta análise, faz-se interessante trazer a revisão de Souza e Ribeiro (2013), que aponta a evolução do tema sustentabilidade entre os anos de 1992 e 2011. Ele parte do conceito, *a priori* tradicional de desenvolvimento sustentável, como sendo “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras a atenderem as suas próprias necessidades” (CMMAD³, 1988, p. 46). Todavia, complementa a importância de relacioná-lo com a importante busca do fim da pobreza, redução da poluição e melhor uso dos recursos, padrões de consumo e produção sustentáveis e elevação da eficiência no uso de energia. O estudo confirma que a sustentabilidade vem ganhando maturidade ao longo desses anos e aponta para a consolidação, através da disseminação aplicada de vários termos ligados, tais como: gestão ambiental, desenvolvimento sustentável,

³ CMMAD significa Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Comissão de Brundtland que atuou significativamente na Rio Eco 92, realizada no Brasil.

gestão de resíduos, recursos hídricos, contabilidade ambiental, *marketing* verde, sistema de gestão ambiental, responsabilidade social ambiental, inovação ambiental, sustentabilidade empresarial, mecanismo de desenvolvimento limpo e agricultura e meio ambiente. Por fim, seu trabalho lembra a inclusão de temas nesta seara com relação à responsabilidade socioambiental, sustentabilidade empresarial e produção limpa, sobretudo após o Protocolo de Quioto, ratificado em 15 de março de 1998.

Todavia, todos estes conceitos e estudos ganham relevância quando se afirma que as gerações futuras aumentam sua vulnerabilidade à medida que decisões e intervenções hoje praticadas não sejam passíveis de correção no futuro; e sublinha neste caso que a ética esteja fundamentada pela sustentabilidade, consolidando deste modo um desenvolvimento ainda que moderno e sustentável (BURSZTYN, 2001).

2.2.1 Considerações

Embora a Sustentabilidade não seja um conceito fácil, esta pesquisa apresenta uma suposição direta, isto é, é considerada como a aplicação do conceito de Desenvolvimento Sustentável, sua *praxis*, aos processos humanos. É utilizado aqui como proposto por Poudel (2002), que descreveu a Sustentabilidade como efetividade na forma de gestão aplicada para a obtenção de determinados objetivos, o que requer definir corretamente os critérios para avaliar os objetivos, metas e atores envolvidos na questão, juntamente com métodos para determinar critérios e indicadores, o que resulta em ferramentas de avaliação significativas. Ademais, posto que alguns conceitos ligeiramente discordantes possam ter sido usados para definir a Sustentabilidade nas últimas quatro décadas, como Adeodato (2005) observa, todas essas abordagens dizem respeito à busca por longas permanências de certas características necessárias, desejáveis em um sistema sociopolítico e seu ambiente natural, não infinitamente durável, mas que seja capaz de transformar a sociedade. Além de objetivos, metas e indicadores, a questão do tempo também deve ser avaliada. Finalmente, no setor secundário, um conceito muito importante é o da Ecologia Industrial, que afirma que todos os resíduos / materiais devem ser continuamente reciclados dentro do sistema e somente a energia solar ilimitada deve ser usada de forma dissipativa (ANDERSEN, 2007). Isto deve ocorrer de forma sinérgica – portanto, uma analogia entre os sistemas industriais e os ecossistemas naturais (o que favorece a avaliação do tempo na medida em que existe

preocupação com o fluxo de materiais) não ocorre somente entre empresas, mas também na sua interação com o ambiente. (HAUFF, WILDERER, 2007), (WHITE, 1994), (SEURING, 2004).

2.3 SETOR ELETROELETRÔNICO

A relevância do setor eletroeletrônico é inquestionável já que a nossa vida moderna é completamente dependente deste setor. Além disso, dispositivos eletrônicos são suprimentos (*Supply Chain*) para vários outros setores industriais, criam meios para inovação e também aumentam a sustentabilidade, tanto no país como fora dele (BARBATO, 2012). Um famoso escritor, J. A. Zuffo, dedicou 4 livros à demonstração de que a eletrônica os levou para uma nova era, a “infoera”, e também para analisar as mudanças decorrentes (LEÃO, 2005), (KANAN e ARRUDA, 2013). Por outro lado, o crescente consumo de eletroeletrônicos também gera considerável quantidade de resíduos. Segundo PARIATAMBY e VICTOR (2013) “uma estimativa da geração mundial de lixo eletrônico (*e-waste*) é da ordem de 20–25 milhões de toneladas”. Outras características relevantes dessa indústria são, por exemplo, ser “uma das mais globalizadas”, “caracterizada por altos níveis de colaboração e parceria” e “operando sempre em alta velocidade”, o que rapidamente leva à inovação e à utilização de soluções novas de TI⁴ para as cadeias de suprimento (BASOLE, 2016). Prokop (2015) enfatiza que a inovação é crucial nesse setor, mas que não ocorre sem parceria, o que significa a co-criação de novos produtos e serviços, mas também exige colaboração entre empresas, fornecedores, instituições etc. Em relação à inovação, Choi et al. (2016) lembra que algumas décadas atrás esta era focada em processos de produção, mas hoje “a capacidade de inovação no produto em empresas de alto valor agregado tornou-se uma necessidade”. Este estudo também observa que “a crescente complexidade dos produtos e a diminuição de seu ciclo de vida é parâmetro fundamental para a inovação em produto”, portanto “companhias inovadoras precisam de estratégia de inovação de processos que acomode a relação entre inovação em produto e em processo, de tal modo que a inovação de processo não se torne um fator inibidor da inovação do produto” (CHOI et al., 2016). Isso decorre da diferença de tempo (timing) entre os dois desenvolvimentos, com a inovação em processo, geralmente, necessitando de maior tempo para implantação.

⁴ TI – Tecnologia da Informação

No país, o setor eletroeletrônico é expressivo, devido ao número de empresas (4000 companhias), o de pessoal empregado (174000) e rendimentos ('earnings', US\$ 65 bilhões), muito embora a maioria, cerca de 80 %, dos empreendimentos seja de pequeno e médio porte, com menos de 100 empregados. Tal aparente dicotomia reflete-se no mercado internacional, onde o país tem baixa representatividade, além de crônico *déficit* na balança de pagamentos. Além disso, a indústria nacional age como “seguidora”, ou seja, não apresenta atividades pioneiras. É relevante considerar que o setor tem empresas agrupadas em 10 áreas de negócios: automação industrial, componentes eletroeletrônicos, equipamentos industriais, eletricidade – geração, transmissão e fornecimento – informática, suprimentos, telecomunicações, serviços, sistemas e utilidades domésticas (MURY, 2016).

Gavira & Quadros (2007) analisaram no país a atuação em Pesquisa e Desenvolvimento de subsidiárias de corporações multinacionais. Na área de geração e transmissão há poucas inovações tecnológicas ou desenvolvimento de produtos; o que se vê são mudanças incrementais. Uma possível explicação é o custo e a inerente complexidade do desenvolvimento de novos produtos, o que faz com que seu desenvolvimento ocorra fora do país; isto implicou que apenas uma empresa fosse categorizada como inovadora. Nunes et al. (2013), em seu estudo de caso sobre o setor, conclui que empresas em países emergentes precisam desenvolver estratégias globais de recursos (*global sourcing strategy*) para competir no mercado local e no de países também emergentes, ou seja, relações fortes entre fornecedores e compradores são necessárias. Por outro lado, Talamo & Carvalho (2012) veem grandes barreiras para tal estratégia, devido, sobretudo, ao perigo de comportamento oportunista, o que é um complicador sério já que setores que sofrem mudanças rápidas são amplamente dependentes dessa colaboração. Jabbour e Jabbour (2012) preocuparam-se com essas interações, e encontraram parcerias duradouras enquanto Scandelari e Cunha (2013) viram tais parcerias gerando inovação radical e novas ideias no longo prazo. Essas parcerias parecem favorecer melhor desempenho ambiental, especialmente se ocorrerem na fase de projeto e envolverem *decision makers* internos e externos; estas podem ser obtidas através da Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM) (JABBOUR et al., 2011).

É dentro deste contexto complexo que a área de energia eólica se apresenta, assim como definido pela ABINEE (*Brazilian Electrical and Electronics Industry Association*), “o setor

eletroeletrônico está qualificado e promove investimentos em várias áreas para prover equipamentos e soluções à sua geração (BARBATO, 2012)”.

2.3.1 Energia eólica – produtos, processos e necessidades

A sustentabilidade, entre outras ações, requer a produção de energia renovável como um bem primordial; portanto, a energia eólica desempenha um papel fundamental no que tange o setor de geração de energia.

A necessidade de, no entanto, se valer de um longo ciclo para fechar a viabilidade técnica para a utilização desta energia renovável é indiscutível; nota-se, portanto, que o custo elevado de cada equipamento instalado, montado e comissionado, além do problema ambiental resultante da eliminação de partes e peças com tamanhos e pesos consideráveis, é bastante relevante.

Assim, a fabricação de dispositivos de energia eólica pode ser uma atividade extremamente impactante, e deve, portanto, merecer cuidadoso estudo. Conforme será abordado, entre as partes e peças que compõem uma turbina eólica, o dispositivo de maior preocupação ambiental é o gerador. Existem várias características distintas para geradores eólicos desenvolvidos ao longo do tempo; contudo, o gerador síncrono de ímã permanente é uma abordagem recente que apresenta várias vantagens; ele também difere dos geradores convencionais, porque em vez de usar o controle de excitação para criar o campo eletromagnético, são utilizados ímãs permanentes. Este tipo de gerador já vem sendo amplamente utilizado, e tende em um futuro próximo a multiplicar-se, para gerar energia eólica, devido, sobretudo à baixa quantidade de matéria-prima aplicada e à nova tecnologia baseada em dispositivos magnéticos permanentes, o que reduz consideravelmente a quantidade de peças móveis na operação.

No entanto, para permitir esta aplicação, a eletrônica de potência tem o seu papel fundamental: pôr o vento não possui velocidade constante e não manter constantes as tensão e frequência, os conversores devem ser utilizados para estabilizar esses parâmetros, causando uma série de problemas ainda não conhecidos (VENUGOPAL et al., 2014), (MOHAMMAD et al., 2014). Uma vez que o gerador pode ser submetido a sobretensões,

gerando falhas desconhecidas, as ferramentas da qualidade, como anteriormente citado, são de extrema valia, como é o caso dos Diagramas de Afinidades, de Relações e Matricial.

No entanto, não há dúvida sobre o potencial eólico do país, como pode ser observado na Figura 2.3. É importante observar que valores de velocidade do vento maiores que 6 m/s são considerados adequados para a instalação de tais equipamentos. O limite superior desta medida também deverá ser considerado, conforme a tecnologia de projeto empregada, caso contrário, outros fatores, tais como: influências aerodinâmicas de obstáculos, topografia e aspereza, podem eventualmente diminuir a capacidade de geração de energia. De qualquer forma, a partir destes resultados, foi estimado um potencial eólico total de 143 GW (ABEEOLICA, 2014). Para comparação, pode-se utilizar o potencial de usinas hidrelétricas e térmicas, estimados em 260 GW (MORETTO, 2012) e 33 GW, respectivamente (TOLMASQUIM, 2013). Assim, considerando o enorme potencial eólico do país, vários parques eólicos foram e estão sendo instalados (ver Figura 2.3, detalhe) em sua maioria na costa brasileira, ou seja, posicionados bastante próximos do mar, o que explica a preocupação com a salinidade e sujeira citadas na introdução deste documento. Essas informações foram utilizadas para estabelecer os locais utilizados no estudo de caso, e estão abordados no item Resultados e Discussão.

Figura 2.3 – Distribuição do Potencial Eólico No Brasil

Fonte: Anuário Brasileiro de Energia Eólica (2014)

De fato, as diferenças de localização das turbinas eólicas, descritas na revisão de Horgan (2013), como a de pequena escala *onshore*, a de larga escala *onshore*, *offshore monopile* e *offshore* ‘fundação baseada na gravidade’, adicionada ao impacto econômico e social, entre outras razões, geram um custo maior de implantação do projeto se ele estiver mais próximo à costa. A localização é importante porque a maior concentração de íons (sais) presentes na atmosfera pode levar à corrosão de peças e equipamentos, o que também explica a necessidade de proteção da superfície, por métodos gerais de deposição de novas camadas, antes ou depois da montagem de partes e peças no equipamento (LISKIEWICZ, 2014).

Hoje, com 12,64 GW distribuídos em 6.500 aerogeradores, o país chegará em 2020 com 17 GW instalados (CANAL ENERGIA, 2017). Assim, considerando as informações disponíveis sobre o cenário de energia eólica, é razoável supor que as interações superficiais desempenham papel importante na deficiência de equipamentos de energia eólica. Vale a pena notar que a água é a base para as duas principais questões importantes sobre as perdas de produção: incrustações e corrosão. Incrustação significa uma deposição indesejada de material sobre superfícies e, mais importante, pode auxiliar ou iniciar a corrosão, sendo responsável por uma estimativa de perda de 0,25% do PIB nos EUA em 1988 (PRITCHARD, 1988).

A evaporação da solução aquosa sobre superfícies é uma maneira comum para o aparecimento de incrustação. Uma vez que a produção de incrustações pode também levar à corrosão, é obrigatório considerar que a própria corrosão atinja uma perda de aproximadamente 3-4% do PIB/ano (EL-MELIGI, 2010); entretanto, esses dados apenas consideram de corrosão direta, ou seja, 50% do total perdido (KOCH et al., 2002-3), isto é, 4,5% do PIB/ano em estimativa conservadora (EL-MELIGI, 2010), mais provável 6% (G2MT Labs., 2014), i.e. cerca de US \$ 1 trilhão perdidos a cada ano no mundo inteiro.

Os metais são um dos materiais mais sensíveis à corrosão e seu ataque químico também pode ocorrer ‘em condições secas, como altas temperaturas em ambientes gasosos, sais fundidos e metais líquidos’ (EL-MELIGI, 2010). Assim, para evitar incrustações e corrosão, o revestimento superficial/modificação é um procedimento comum (MÜLLER; ZHAO, 1997) ao lado de novas tecnologias e desenvolvimento de novos materiais (KILKOVSKY et al., 2014). Contudo, como já abordado anteriormente, NG (2013) afirma que é praticamente nula a tentativa de usar os novos materiais disponíveis ou em desenvolvimento, como os desenvolvidos pela nanotecnologia, na área eólica. Devido ao seu inter-relacionamento físico-químico-mecânico-elétrico, o uso de nanotubos de carbono no desenvolvimento de turbinas parece promissor.

Um exemplo primordial para a falta de sinergia entre as restrições macroscópicas sobre o equipamento de energia eólica e uma ação proativa na camada microscópica, a fim de evitar falhas, é a aplicação de tratamento de superfície em partes e peças magnéticas. A utilização de ímãs NdFeB é bastante comum em turbinas de energia eólica, mas devido à baixa resistência à corrosão de tais dispositivos, são necessários revestimentos de superfície (MAN; MAN; LEUNG, 1996). No entanto, o procedimento mais comum é a embalagem do

ímã e outras partes vitais com várias camadas macroscópicas, tais como material resinoso. Este é um dos aspectos tratado nesta pesquisa.

2.4 ENERGIA EÓLICA – CARACTERÍSTICAS E TECNOLOGIAS

Aqui será importante apresentar seu histórico e construtivamente discorrer como esta evolução ocorreu neste setor e como a tecnologia foi decisiva para a escolha do equipamento objeto desta pesquisa.

2.4.1 Histórico

Tudo começou há muito tempo, devido à necessidade do ser humano em realizar trabalho, tanto para movimentar objetos, aplicar força e, também, gerar energia. Estes foram alguns dos motivadores que estabeleceram a busca por tecnologia a fim de responder a estes anseios.

Um dos componentes primários abundantes na natureza é o vento. Transformar então o gratuito vento em energia mecânica passou a ser uma realidade próxima, são exemplos: (a) propulsão de barcos e navios (e isso acelerou a descoberta de mundos como as Américas), (b) bombas de elevação de água (os famosos moinhos de vento – os quais serviram para centenas de utilidades, inclusive movimentar a indústria), (c) moinhos de cereais, entre outros.

Já no fim do século XIX, o uso da energia elétrica passou a se alastrar rapidamente entre as nações, e nesse momento as primeiras turbinas eólicas tiveram tal finalidade e foram aplicadas na conversão da energia dos ventos diretamente em energia elétrica. As vantagens eram evidentes, sobretudo pelo fato de seu principal insumo vir da natureza (CRESESB, 2017)

Charles F. Brush, em 1887/8, operacionalizou a primeira turbina eólica automática; ela contava com as seguintes dimensões: diâmetro do rotor igual a 17m e 144 pás de madeira (TONG, 2010). A partir disso, a tecnologia avançou e foram desenvolvidos vários novos projetos e tipologias de grande porte que culminaram hoje na viabilidade deste modo de obtenção de energia.

Figura 2.4 – Primeira turbina eólica automática construída por Brush em 1888

Fonte: TONG (2010)

Pode-se afirmar que o marco em termos de tecnologia dessas turbinas ocorreu na Alemanha, anos 50, com configuração parecida com as de hoje, ou seja, pás fabricadas com materiais compostos, controle de passo e torres na forma tubular.

2.4.2 Tipos de tecnologias eólicas

Uma característica intrínseca do vento é a sua velocidade variável; por isso, não é possível naturalmente transformar a energia do vento em energia mecânica mantendo a rotação do eixo uniforme. Por isso, o primeiro passo é construir um gerador eólico capaz de entregar energia elétrica e entregar à rede com frequência constante. Outra característica importante deste tipo de equipamento é a baixa rotação desenvolvida pela turbina. Estes 2 fatores impactam diretamente tanto no projeto do equipamento como também no processo de fabricação e montagem de seus conjuntos.

Dadas estas informações, podem-se agrupar as tecnologias-base aplicadas às turbinas eólicas em:

1. Equipamentos assíncronos
2. Equipamentos síncronos

2.4.2.1 Equipamentos assíncronos

Para este projeto é necessário considerar o eixo da turbina eólica acoplada ao eixo de um gerador assíncrono trifásico, que pode ser com rotor de gaiola ou rotor bobinado. Importante notar que os geradores assíncronos são equipamentos elétricos que possuem velocidade operacional maior que a da turbina, por isso eles exigem que entre a turbina eólica e o gerador seja introduzido um amplificador de velocidade. Este grupo conecta-se à rede por um conversor de frequência; isso permite atender as 2 características básicas para a transformação da energia cinética dos ventos em elétrica.

2.4.2.1.1 Curva de potência

A potência da turbina eólica está em função da velocidade do vento e, portanto, possui uma curva característica de desempenho de energia. De acordo com o seu formato é possível prever a produção de energia, desconsiderando-se os fatores técnicos e construtivos. Neste caso, a curva de potência da turbina eólica é um gráfico (Figura 2.5) que mostra a máxima produção de energia elétrica em detrimento da variação da velocidade do vento. Três pontos são importantes para entender este comportamento e analisar seu desempenho: velocidade mínima, velocidade nominal e velocidade de corte. (MARQUES, 2004)

- Velocidade mínima (v_{min}): velocidade do vento indicada no momento de giro da turbina;
- Velocidade nominal (v_{nom}): velocidade do vento quando a turbina atinge seu ponto de operação (alguns autores consideram aqui a obtenção da potência máxima);
- Velocidade de corte (v_{corte}): velocidade do vento no momento que a turbina em operação é desligada, a fim de evitar sobrecargas e similares.

Figura 2.5 – Gráfico da curva de potência da turbina eólica

Fonte: Marques (2004)

2.4.2.1.2 Equipamentos síncronos

Este grupo apresenta o eixo da turbina eólica acoplado ao eixo do gerador síncrono trifásico, que pode ser construído a partir de um sistema com excitação independente no rotor ou ímãs permanentes no rotor.

Para este tipo de tecnologia, nos equipamentos com menor potência (abaixo de 1 MW), o gerador apresenta velocidade operacional superior à da turbina, exigindo neste caso um ampliador de velocidade acoplado entre a turbina e o gerador. Todavia, nos equipamentos com maior potência, normalmente o gerador é fabricado com um número de pólos considerável para frequência nominal relativamente baixa, ‘patamarizando’ as velocidades de operação e da turbina; este movimento descarta a necessidade do multiplicador de velocidade, todavia se vale de um planetário entre a turbina e o gerador para seu funcionamento.

A seguir serão apresentados os principais modelos construtivos de geração eólica através da configuração de seus equipamentos e tecnologias.

2.4.2.2 Geradores eólicos e suas tecnologias

Este item é baseado em livro seminal para a área (BURTON et al., 2001).

O princípio físico atrelado à geração de energia eólica é através da extração de potência do vento em um gerador eólico, transformando-a em energia elétrica através desta turbina. Há uma série de correlações com a aerodinâmica do conjunto gerador montado, sobretudo no que tange os principais ângulos que perfazem a aerodinâmica das pás eólicas, as dimensões do aerofólio, a velocidade relativa do vento sentida pela face da pá eólica, dentre outros fatores.

A seguir são apresentadas as características básicas dos Aerogeradores, assim como os principais tipos, a classificação destes equipamentos e movimentações da turbina.

(1) O gerador está conectado diretamente na rede elétrica e opera com velocidade fixa: este formato permite tanto trabalhar com equipamentos assíncronos como síncronos. Ambos trabalham com velocidade de rotação acima da turbina, o que exige neste caso a introdução da caixa multiplicadora de velocidade. O gerador síncrono trabalha com rotação constante, o que torna o equipamento rígido, exigente da sincronicidade com a rede. Como consequência, não permite regular a velocidade. O gerador assíncrono permite mínima variação de velocidade devido ao escorregamento (característica de funcionamento), tornando este sistema mais flexível.

Em alguns casos, é aplicado um gerador assíncrono de gaiola com duplo enrolamento no estator com polarização diversa. Esta configuração é limitada para a geração em até 1 MW. O sistema assíncrono apresenta vantagem, neste primeiro caso, por ser mais robusto, ter menor custo e não emitir componentes harmônicos para a rede. No que tange a eficiência, ambas as configurações são frágeis, devido sua rigidez em relação à regulação da velocidade de operação.

Figura 2.6 – Sistema eólico conectado diretamente à rede elétrica:

(a) gerador assíncrono de gaiola e (b) gerador síncrono com excitação independente

Fonte: Adaptado de Rüncos et al. (2005, p.4)

(2) Gerador conectado na rede elétrica através de um conversor: Neste formato, o sistema eólico pode ser construído tanto com o gerador assíncrono como síncrono, conforme Figura 2.7.

Figura 2.7 – Sistema eólico conectado na rede através de um conversor:

(a) gerador assíncrono de gaiola e (b) gerador síncrono com excitação independente.

Fonte: Adaptado de Rüncos et al. (2005, p.5)

Ambas as configurações operam com velocidade superior à da turbina, por isso é necessária caixa multiplicadora de velocidades. A ligação DC^5 (CC) do conversor desacopla o gerador da rede permitindo boa flexibilidade na regulação de velocidade. Sua eficiência já se apresenta melhor que o caso anterior. Comparando os modelos (a) e (b) da Figura 2.7, observa-se que o gerador assíncrono também é vantajoso pela sua robustez e menor custo

⁵ DC – do inglês Direct Current (Corrente Contínua) é o fluxo ordenado de elétrons sempre numa direção, diferente da corrente alternada cujo sentido dos elétrons varia no tempo.

por conta de maior simplificação de montagem mecânica e por ser composto de componentes *a priori* de baixo custo.

Vale salientar que o gerador síncrono, Figura 2.7.b, compensa os seus reativos através de excitação independente. No caso do gerador assíncrono, a demanda dos reativos necessários provém do conversor, não exigindo neste caso adicional banco de capacitores. Para ambas as proposições, o conversor CA/CC (corrente alternada para corrente contínua) eleva bastante o custo; isso porque toda a potência passa para a rede através deste conversor. Outra vantagem deste sistema é a não limitação de potência elétrica gerada, respeitando, portanto, os critérios técnicos, ambientais e socioeconômicos.

(3) Gerador assíncrono trifásico de rotor com bobinas duplamente alimentados com escovas: Esta configuração só trabalha com gerador assíncrono, trifásico com rotor com bobinas e duplamente alimentado através de escovas, conforme Figura 2.8.

Este sistema permite ampla faixa de regulação de velocidade – cerca de 30% em torno de sua rotação síncrona. O controle de velocidade é realizado através do conversor conectado ao rotor. Esta vantagem amplia o emprego deste tipo de gerador, sendo indicado também instalar em regiões onde a velocidade do vento é bastante variável. Como de praxe para estes equipamentos, a velocidade de operação é superior a da turbina, o que exige o emprego da caixa multiplicadora que normalmente compreende vários estágios.

De acordo com o projeto do rotor, o conversor de frequência para este sistema necessita ser dimensionado no máximo para 30% da potência nominal do equipamento; neste caso, precisa ser bidirecional para permitir o fluxo nos dois sentidos, ou seja, do gerador para a rede e da rede para o gerador. Isto lhe confere uma boa vantagem em relação ao custo, tornando-o muito competitivo. Ademais, sua eficiência é superior às configurações anteriormente apresentadas, devido ao controle de velocidade extraindo o máximo de aproveitamento energético em todas as faixas de velocidades de operação. Outra vantagem ainda se dá pelo fato do estator estar ligado diretamente na rede, o que gera uma onda sem harmônicos⁶; isto significa que não introduz no sistema elétrico poluição harmônica, e por isso não é necessária introdução de filtros harmônicos.

⁶ Denominada pelo Mercado como onda senoidal pura

Figura 2.8 – Gerador assíncrono trifásico de rotor com bobinas duplamente alimentados com escovas

Fonte: Adaptado de Rüncos et al. (2005, p.5)

Este formato é abundantemente utilizado pela maioria dos fabricantes para potência de até 5 MW, principalmente por apresentar além das vantagens descritas, um custo inicial baixo. Todavia, o uso de caixa multiplicadora de velocidades e escovas torna-se desvantajoso devido ao alto custo de manutenção.

(4) Gerador Síncrono Trifásico conectado na rede através de um conversor sem multiplicador de velocidade: Este formato é constituído de um gerador síncrono trifásico com excitação independente ou rotor com ímãs permanentes, de acordo com a Figura 2.9.

Figura 2.9 – Grupo eólico-elétrico conectado à rede elétrica através de um conversor:

(a) Gerador síncrono com excitação independente e (b) Gerador síncrono de ímãs permanentes

Fonte: Adaptado de Rüncos et al. (2005, p.6)

As configurações da Figura 2.9 (a) e (b) requerem um elevado número de pólos em sua construção; isto gera uma frequência baixa e variável de acordo com a velocidade da turbina. O conversor desacopla o gerador da rede e executa a conversão para uma ampla faixa de velocidade dos ventos. Por possuírem um grande número de pólos, trabalham em uma rotação mais baixa não precisando de caixa multiplicadora de velocidades, impondo frequência adequada ao circuito do rotor. O conversor conectado entre o esquema do rotor e a rede deve ser bidirecional, ou seja, de quatro quadrantes, permitindo o fluxo de potência em ambos os sentidos. O circuito do estator é fixo ao eixo estacionário e todas as variáveis do rotor são referidas ao estator. Por conta desta configuração, este sistema é uma solução muito utilizada pela maioria dos fabricantes até a faixa de potência de 5 MW, devido a sua grande flexibilidade de controle e baixo custo; porém necessitam de um multiplicador de vários estágios de velocidade e o sistema de escovas e porta escovas, os quais são componentes que requerem manutenção. Quando a excitação se dá através de ímãs permanentes, este custo *a posteriori* é bastante reduzido, todavia implica em uma série de fatores construtivos, logísticos, financeiros e tecnológicos não totalmente conhecidos em termos de controle e manutenção preventiva.

2.4.3 Principais topologias de turbinas eólicas

Hoje em dia as turbinas eólicas dispõem de uma variedade significativa em termos de inovação tecnológica, tanto aplicada aos geradores como também para a eletrônica de potência. Para tanto, a seguir serão apresentadas as topologias mais comuns com respeito às tecnologias eólicas já implementadas no Mercado. *A priori*, as turbinas eólicas podem operar tanto com velocidade fixa como velocidade variável.

2.4.3.1 Turbinas eólicas com velocidade fixa

Esta modalidade praticamente deu início às tecnologias aplicadas às turbinas eólicas. Neste caso, apesar de a velocidade do vento não ter controle ativo, a velocidade do rotor da turbina eólica é fixada e determinada pela frequência provinda do impacto do vento (rede de abastecimento), relação de engrenagem e do projeto do gerador.

Estes tipos de turbinas são normalmente montados com um gerador de indução (tipo gaiola) que está diretamente ligado à rede de abastecimento através de um *soft-starter*⁷ ou dispositivo de arranque suave e um banco de capacitores para reduzir a compensação de potência reativa. Eles são projetados para atingir máxima eficiência para determinada velocidade do vento. E, com o intuito de elevar a produção de energia, os geradores podem apresentar pelo menos 2 tipos de bobinado: um utilizado para baixas velocidades de vento, ou seja, 8 polos, e outro para médias e altas velocidades de vento, ou seja, 4-6 polos.

2.4.3.2 Turbinas eólicas com velocidade variável

Turbinas com esta configuração são projetadas para adquirir a melhor relação de eficiência aerodinâmica sobre a maior faixa possível de velocidades do vento.

Com uma operação de velocidade variável tornou-se possível adaptar continuamente (acelerar ou desacelerar) a velocidade de rotação ω da turbina eólica para a velocidade do vento v . Desta forma, a relação de velocidade da ponta (λ) é mantida constante a um valor predefinido que corresponde ao coeficiente de potência máximo. A razão de velocidade da ponta é

$$\lambda = \omega R / v \quad (1)$$

onde R é o raio do rotor (¹)

Ao contrário da velocidade fixa, o sistema com velocidade variável mantém o torque do gerador quase constante e as variações do vento são absorvidas pelas mudanças de velocidade do gerador. Sua construção é mais complexa e normalmente é montada com uma indução ou gerador síncrono e ligada à rede através de um conversor de energia. O conversor de energia auxilia no controle da velocidade do gerador; portanto, a variação de energia provinda das variações de velocidade do vento é absorvida principalmente por alterações da velocidade do gerador, e, por conseguinte do rotor.

Importante notar que este tipo de sistema abre o leque para a construção de vários tipos de geradores, atribuindo-lhes um maior número de graus de liberdade combinando tipo de gerador com tipo de conversor.

⁷ *Soft-starter*: dispositivo eletrônico de pontes de tiristores acionadas por placa eletrônica a fim de controlar a tensão de partida dos motores de corrente alternada trifásicos.

2.4.3.2.1 Controles de potência

Há várias formas de controlar as forças aerodinâmicas do rotor eólico e consequentemente reduzir o impacto sobre a turbina eólica em ventos muito fortes.

- O método mais simples, robusto e barato é o *stall control*, i.e., controle passivo ou controle de *stall*; aqui as pás são fixas e aparafusadas sobre o hub⁸. A configuração aerodinâmica do rotor faz com que o rotor pare (perca energia) quando a velocidade do vento excede a certo nível. Desse modo, limita-se a potência aerodinâmica das pás. A regulação da potência aerodinâmica para velocidade lenta causa menos flutuações de energia do que uma regulação de potência a passo rápido (*fast-pitch*). Algumas desvantagens do método são a menor eficiência a baixas velocidades de vento, sem arranque assistido, e variações na potência máxima de estado estacionário, devido a variações na densidade do ar e frequências de rede.
 - Controle de passo, ou seja, controle ativo ou de *pitch* onde as pás podem ser giradas para fora ou para dentro na direção do vento à medida que a saída de potência se torna demasiada elevada ou baixa, respectivamente.
- As vantagens desse tipo de controle é o denominado de controle bom⁹ de potência, além de possuir arranque assistido e disponibilizar a parada de emergência. Algumas desvantagens são a complexidade extra que surge do mecanismo de passo e as maiores flutuações de energia a altas velocidades de vento.
 - Controle ativo-passivo, ou seja, controle de ativo de *stall* ocorre quando o freio dinâmico da pá é ativamente controlado pelo passo das pás. Sob baixas velocidades de ventos, o controle ativo de *stall* se assemelha na prática ao controle de *pitch*, com o objetivo de atingir melhor eficiência.

⁸ HUB ou cubo que distribui/aloca as pás dispostas sob o mesmo ângulo entre si.

⁹ Controle bom de potência, sob o ponto de vista elétrico significa que para altas velocidades do vento, o valor médio da potência de saída é mantido próximo ao da potência nominal do gerador.

Em altas velocidades do vento, as pás ficam ligeiramente inclinadas na direção oposta à de uma turbina de passo controlado. A turbina então atinge uma potência limitada mais suave, sem grandes flutuações de energia, como no caso de turbinas eólicas controladas por *pitch*. Este tipo de controle tem a vantagem de ser capaz de compensar as variações na densidade do ar. A combinação com o mecanismo de passo (*pitch*) facilita a realização de paradas de emergência e o arranque da turbina eólica.

2.4.3.2.2 Sistema de controle da turbina eólica

As turbinas eólicas têm como suas partes principais os geradores eólicos, conjunto de pás eólicas, torres e fundação. Elas são basicamente equipamentos eletromecânicos projetados especialmente para converter parte da energia gerada pelos ventos em energia mecânica. A maioria dos projetos tem melhorado e evoluído ao longo dos tempos.

Os geradores eólicos têm como principais conjuntos de componentes os rotores e os estatores. Os rotores têm a função de girar impelidos por forças resultantes da ação dos ventos e têm um papel importante quanto à classificação dos dois tipos de turbinas eólicas, ou seja, turbinas de eixo vertical (a) e de eixo horizontal (b), como apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Turbinas tipo (a) de eixo vertical e (b) de eixo horizontal

Fonte – Adaptado de Bianchi (2007, p.13)

É importante notar que os dispositivos geradores e de transmissão do tipo da Figura 2.10 (a) de turbina estão localizados ao nível do solo: eles capturam o vento vindo de qualquer

direção sem precisar do *yaw*, um sistema de movimentação para as pás. Todavia, essas vantagens são contrapostas pela redução de captação de energia devido ao nível de incidência dos ventos nesta área. Outra questão importante e limitante é a manutenção complicada destes equipamentos, por estarem dispostos tanto o gerador como a transmissão ao nível do solo. Ademais, os rotores são suportados por cordas-guias que ocupam grandes extensões de terra. Pelas razões acima apresentadas, o uso de turbinas eólicas do tipo eixo-vertical vem cada vez mais tendo sua utilização declinada.

Por conseguinte, a maioria das turbinas eólicas traz como proposta principal de construção o tipo com os rotores no eixo horizontal, como na Figura 2.10 (b). O rotor está situado no topo da torre onde os ventos possuem maior energia e menos turbulência. As torres também sustentam a *nacelle*. Anterior à tecnologia de ímãs permanentes, a transmissão era composta por uma caixa de engrenagens (caixa multiplicadora). Neste tipo de turbina, o sistema de *yaw* é aplicado para girar as pás de tal modo que capte o máximo de energia possível dos ventos de acordo com a sua direção. Além disso, sua aplicação se apresenta mais simples quando se trata de equipamentos com baixa potência. Neste caso, de acordo com a necessidade, é importante salientar que tais equipamentos podem se tornar mais complicados quando aplicados em sistema de alta potência. Por fim, os acionamentos eletrônicos ficam dispostos ao nível do solo.

2.4.3.3 Conceitos aplicados ao Gerador Eólico

Basicamente, as turbinas eólicas são equipadas por qualquer tipo de gerador trifásico. Portanto, a corrente elétrica da rede pode ser atingida, ligando os conversores de frequência, independente se o gerador fornece corrente alternada (CA) de frequência variável ou corrente contínua (CC).

As configurações de turbinas eólicas mais comumente aplicadas são classificadas tanto pela sua capacidade de controlar a velocidade, conforme indicado anteriormente, quanto pelo tipo de controle de potência que usam. Já considerando o tipo de controle de potência (pás), as turbinas eólicas, como apresentado na Tabela 2.2, podem ser configuradas como: controle de *stall*, *pitch* e ativo de *stall* (parada ativa). Assim, para ambos os critérios (controle de velocidade e controle de potência), existem quatro diferentes tipos dominantes de turbinas eólicas, como descritas a seguir e apresentado na Figura 2.11.

1. Geradores assíncronos por indução:

- [Tipo A] Squirrel cage induction generator (SCIG) – gerador por indução tipo gaiola de esquilo;
- [Tipo B] Wound rotor induction generator (WRIG) – gerador por indução pelo rotor fechado:
 - OptiSlip induction generator (OSIG) – gerador por indução por deslizamento óptico;
 - Doubly-fed induction generator (DFIG) – gerador por indução por dupla alimentação.

2. Geradores síncronos:

- [Tipo C] Wound rotor generator (WRSG) – gerador com rotor fechado;
- [Tipo D] Permanent magnet generator (PMSG) – gerador com ímãs permanentes.

Tabela 2.2 – Conceitos de turbinas eólicas

Controle de velocidades		Controle de Potência		
		<i>Stall</i>	<i>Pitch</i>	<i>Ativo de Stall</i>
<i>Velocidade fixa</i>	Tipo A	Tipo A0	Tipo A1	Tipo A2
<i>Velocidade variável</i>	Tipo B	Tipo B0	Tipo B1	Tipo B2
	Tipo C	Tipo C0	Tipo C1	Tipo C2
	Tipo D	Tipo D0	Tipo D1	Tipo D2

não estão em uso no Mercado

Fonte: Ackerman (2005)

Figura 2.11 – Diferentes tipos de turbinas eólicas (os mais dominantes)

Fonte: Burton et al. (2001)

a) Tipo A – velocidade fixa

A configuração da turbina eólica com velocidade fixa combinada ao gerador assíncrono por indução tipo gaiola de esquilo (SCIG) está diretamente conectada à rede de abastecimento através de um transformador. Uma vez que este modelo sempre extrai energia reativa da rede, esta configuração usa um banco de capacitores para compensação da potência reativa. Uma conexão de rede mais suave é obtida utilizando um *soft-starter* (arranque suave).

Independentemente do princípio de controle de potência em uma turbina eólica de velocidade fixa, as flutuações do vento são convertidas em flutuações mecânicas e

consequentemente em flutuações de energia elétrica. No caso de uma rede de abastecimento fraca, estas podem produzir flutuações de tensão no ponto de ligação. Devido a estas flutuações de tensão, a turbina eólica de velocidade fixa extrai quantidades variáveis de potência reativa da rede elétrica (a menos que haja um banco de capacitores), o que aumenta tanto as flutuações de tensão quanto as perdas de linha. Assim, as principais desvantagens deste conceito são que ele não suporta qualquer controle de velocidade, ele requer uma grade rígida e sua construção mecânica deve ser capaz de tolerar alta tensão mecânica.

Outras três versões desdobradas (Tipo A0, Tipo A1 e Tipo A2) da turbina eólica de velocidade fixa Tipo A são também utilizadas na indústria de turbinas eólicas e podem ser caracterizadas da seguinte forma.

b) Tipo A0: controle de *stall*

Conceito tradicional de turbina eólica com três pás bastante utilizada a partir da década de 80. Tem sido muito popular por causa de seu preço relativamente baixo, sua simplicidade construtiva e sua robustez. As suas limitações, por sua vez, são: as turbinas eólicas controladas passivamente não podem realizar arranques assistidos, resultando que a potência da turbina não pode ser controlada durante a sequência de conexão.

c) Tipo A1: controle de *pitch*

As principais vantagens de uma turbina Tipo A1 são que facilita a capacidade de controle de potência, a partida controlada e a parada de emergência. Sua principal desvantagem é que, em altas velocidades do vento, mesmo pequenas variações na velocidade do vento resultam em grandes variações na potência de saída. O mecanismo de *pitch* não é rápido o suficiente para evitar tais flutuações de energia. Ao acionar o movimento da pá, variações lentas no vento podem ser compensadas, mas isso não é possível no caso de rajadas.

d) Tipo A2: controle ativo de *stall*

Esta configuração, basicamente, mantém todas as características de qualidade de energia do sistema regulado. As melhorias consistem numa melhor utilização do sistema

global, como resultado do uso do controle ativo de *stall* (parada). O acoplamento flexível das pás no HUB também facilita a parada de emergência e suas partidas. Uma desvantagem é o preço mais elevado decorrente do mecanismo de *pitching* e seu controlador.

Conforme ilustrado na Figura 2.11 e Tabela 2.2, o conceito de velocidade variável é usado por todas as três configurações, Tipo B, Tipo C e Tipo D. Devido a considerações de limitação de potência, o conceito de velocidade variável é usado na prática hoje apenas em conjunto com um mecanismo de *pitch* rápido. Nas turbinas eólicas de velocidade variável falta a capacidade para uma redução rápida da potência. Se a turbina eólica está funcionando na velocidade máxima e há uma rajada forte, o torque aerodinâmico pode começar criticamente elevado e pode gerar uma situação de fuga. Portanto, como ilustrado na Tabela 2.2, Tipo B0, Tipo B2, Tipo C0, Tipo C2, Tipo D0 e Tipo D2 não são usados na indústria de turbinas eólicas hoje em dia.

e) Tipo B: velocidade variável limitada

Esta configuração corresponde à turbina eólica de velocidade variável limitada com resistência variável do rotor do gerador. Utiliza um gerador de indução de rotor bobinado (*wiring*) desde meados dos anos 1990. O gerador é conectado diretamente à rede de abastecimento. Um banco de capacitores executa a compensação de potência reativa. Uma conexão de rede mais suave é obtida utilizando um *soft-starter*. Uma notória característica deste conceito é que ele tem uma resistência variável do rotor adicional, que pode ser alterado por um conversor controlado opticamente montado no eixo do rotor. Assim, a resistência total do rotor é controlável. Este acoplamento óptico elimina a necessidade de anéis deslizantes caros que precisam de escovas e manutenção. A resistência do rotor pode ser alterada e, portanto, controla o deslizamento. Desta forma, a saída de energia no sistema é controlada. O alcance do controle de velocidade dinâmico depende do tamanho da resistência variável do rotor. Tipicamente, a faixa de velocidade é 0-10% acima da velocidade síncrona. A energia proveniente da unidade de conversão de energia externa é despejada como perda de calor.

Wallace e Oliver (1998) descrevem um conceito alternativo usando componentes passivos em vez de um conversor eletrônico de potência. Este conceito consegue um deslizamento de 10%, mas não suporta um deslizamento controlável.

f) Tipo C: velocidade variável com conversor de frequência de escala parcial

Esta configuração, conhecida como conceito de gerador de indução duplamente alimentado (DFIG), corresponde à turbina eólica de velocidade variável limitada com um gerador de indução de rotor bobinado (WRIG) e um conversor de frequência de escala parcial (com aproximadamente 30% da potência nominal do gerador).

O conversor de frequência de escala parcial realiza a compensação de potência reativa e a conexão de rede mais suave. Tem uma escala mais larga do controle dinâmico da velocidade comparado com o Tipo A, dependendo do tamanho do conversor de frequência. Tipicamente, a gama de velocidades compreende velocidades síncronas -40% para $+30\%$. O conversor de frequência menor torna este conceito atraente sob o ponto de vista econômico. Suas principais desvantagens são o uso de anéis deslizantes e proteção no caso de falhas de rede.

g) Tipo D: velocidade variável com conversor de frequência

Esta configuração corresponde à turbina eólica de velocidade variável completa, com o gerador ligado à rede de abastecimento através de um conversor de frequência em grande escala. O conversor de frequência realiza a compensação de potência reativa e a conexão da rede mais suave. O gerador pode ser excitado eletricamente: seja por gerador síncrono de rotor enrolado (WRSG ou WRIG), seja por um gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG).

Alguns sistemas completos de turbinas eólicas de velocidade variável não possuem caixas multiplicadoras. Nestes casos, é utilizado um gerador multipolar de diâmetro.

2.4.3.4 O gerador síncrono de ímãs permanentes

O gerador síncrono de ímãs permanentes, equipamento-objeto utilizado na pesquisa, sendo também uma das principais escolhas tecnológicas de uso no Brasil, difere dos geradores convencionais, porque em vez de usar o controle de excitação para criar o campo eletromagnético, utiliza ímãs permanentes; podendo-se analisar a máquina como se o campo de excitação fosse constante, assegurando que as várias indutâncias da máquina sejam calculadas com base na permeabilidade efetiva do rotor de ímãs permanentes (FITZGERALD, 2006).

Este tipo de gerador está sendo amplamente utilizado na geração de energia a partir da energia eólica; para permitir tal aplicação, o estudo da eletrônica de potência tem o seu papel fundamental, pois como o vento não tem uma velocidade constante e sua potência é dada pela fórmula (2):

$$P = (1/2) * \rho * v^3 * A, \text{ onde} \quad (2)$$

P é a potência disponível do vento,

ρ é a densidade do ar (kg / m³),

A é a área da secção transversal do cilindro que é ultrapassada pelo vento (m²),

V é a velocidade do vento,

não podendo manter uma tensão e frequência constantes, utiliza-se conversores para estabilizar estes parâmetros, abrindo uma série de problemas ainda não conhecidos.

É importante notar que o gerador pode estar sujeito a sobretensões em princípio desconhecidas gerando falhas.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O gerador síncrono de ímã permanente difere dos geradores convencionais, porque em vez de usar o controle de excitação para criar o campo eletromagnético, utiliza ímãs permanentes para executar este processo. Este tipo de gerador está sendo amplamente utilizado na geração de energia a partir da energia eólica; vale salientar que por este tipo de tecnologia não conseguir manter uma tensão e frequência constantes, obriga a utilização de conversores para estabilizar estes parâmetros e por consequência abrindo uma série de problemas ainda não conhecidos. Os conversores podem ser normalmente categorizados como fonte de tensão e de corrente. O primeiro produz onda de tensão trifásica, enquanto o de corrente gera uma onda de corrente definida. As vantagens que do gerador tipo fonte de corrente apresenta é uma configuração mais simples, gerando formas de onda CA quase senoidais, aplicando um controle melhor para o curto-circuito e sua proteção. (REIS, 2013, p. 63)

Pelo exposto acima, fica clara a necessidade de atuação na área eólica de alguns modos distintos, entre eles a forte associação entre fornecedores e produtores. Isto decorre das pressões que são comuns ao setor de eletroeletrônico: inovação, rápida mudança, redução de custo e melhoria no desempenho. Também se deve considerar que o ROI só será efetivo se mudanças rápidas forem aliadas a ciclos de vida longo, de 25 anos (KALDELLIS et al., 2011) (DONES et al., 2007).

Como lembrado por Nemet (2008) a Califórnia está enfrentando tais questões não só com política de desenvolvimento, mas com uma abordagem de “aprender fazendo”, mudanças incrementais e inovação simultâneas (políticas de *pull demand* e *push technology*), em um ecossistema inovador (LETEN et al., 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no período de janeiro de 2011 a julho de 2017, e teve as seguintes etapas efetuadas e respectivos materiais utilizados.

3.1 MÉTODO

Uma observação inicial faz-se necessária, pois, como descrito na introdução deste trabalho, um PDCA (do inglês: PLAN – DO – CHECK – ACT ou Adjust) modificado foi proposto e aplicado, conforme o desenvolvimento da metodologia estudada para este trabalho, como também evidenciado e validado pela proposta de Jangam [2], que indica a aplicação de uma análise das etapas do processo, desde o levantamento das informações, organização dos dados a fim de identificar as questões críticas, e por consequência executar uma reanálise dos processos que possam ser considerados passíveis de inovação/modificação relevante; com isso, determinar as causas raízes das falhas, estudar quais ações serão aplicáveis e, por fim, implementá-las. Através da comparação destas duas forças motrizes distintas, é possível determinar quais são, no entanto, as necessidades técnicas a serem solucionadas.

Para o trabalho em questão, pelo seu conteúdo tecnológico e por envolver pesquisa de campo, uma vez que se ensejam os testes na planta piloto, utilizaram-se as metodologias do estudo de caso e da pesquisa-ação para sua composição acadêmica; todavia, para estabelecer os níveis de controle e análise dos processos e componentes, foi necessário utilizar-se das ferramentas da qualidade como prática de engenharia aplicada.

Adicionalmente, devido a gama de materiais envolvidos e disponíveis, foi preciso aplicar um estudo exploratório, pois algumas das hipóteses (como abordado na introdução) precisavam ser analisadas inicialmente; além disso, era mandatório descrever os procedimentos, já que algumas das premissas para a construção dos equipamentos precisavam ser testadas, mesmo que *semi-quantitativamente*, i.e. executar um trabalho empírico cuja finalidade era estabelecer as relações causais entre os parâmetros obtidos.

Inicialmente, por ter a participação direta do autor deste trabalho, a pesquisa-ação foi fundamental para estabelecer a fase da coleta e aquisição de dados a partir da análise da documentação disponível e pesquisa de campo, bem como resultados de experimentos

laboratoriais complementaram a investigação aplicada (DEMO, 2000), (MARTINS e THEOPHILO, 2009), (GIL, 1999) e (SELLTIZ et. al., 1990).

A seguir, foi desenvolvido o estudo de caso propriamente, por haver um número considerável de parâmetros a serem estabelecidos. Deste modo, o que favoreceu a aplicação do estudo de caso como método de trabalho foi a facilidade de acesso ao empreendimento objeto da pesquisa em todos os níveis gerenciais (operacional, tático e estratégico) e, também, as características da empresa em si, ou seja, uma empresa produtora de turbinas eólicas, detentora de importante parcela do Mercado, e, composta das principais etapas produtivas, gerando por fim dados suficientes para suportar qualitativamente a análise SWOT¹ (do inglês: *Strengths* (Forças), *Weaknesses* (Fraquezas), *Opportunities* (Oportunidades) e *Threats* (Ameaças). Importante observar que o produto fornecido pela empresa é o considerado como o futuro da área, com turbinas utilizando o gerador síncrono de ímãs permanentes.

Desta forma, pelos conceitos do Estudo de Caso, e de acordo com Yin (2005) e Dias (2000) têm-se:

1. Preparação do estudo: a partir do problema descrito no capítulo da Introdução (defeitos/comportamentos espúrios que diminuem a vida útil das turbinas), configura-se o estudo de caso; será aplicada – entre outras – a análise qualitativa através da ferramenta de SWOT para entender melhor a questão. É importante observar que a empresa estudo de caso é um grande *player* (integrante) do Mercado e fornecedora de diferentes parques eólicos no país. É também responsável pela manutenção de 2 *sites* (parques eólicos) com variações de propriedades bastante elevadas: um deles está próximo à praia e situa-se no nordeste brasileiro, enquanto aquele posicionado no sul do Brasil encontra-se a vários quilômetros dentro do continente. Deste modo é possível obter também uma série de informações ambientais distintas, além de diversidades na performance dos dois sites.

2. Seleção do Caso: um pré-projeto – com levantamento dos dados, permite a delimitação do problema. Neste momento, a montagem da análise das possíveis

¹ Ferramenta da Qualidade que analisa as fortalezas, fraquezas, oportunidades e ameaças de determinado ambiente com o intuito de identificar problemas que possam impedir progressos.

causas dos problemas incorridos, sobretudo o efeito de curto-circuito dos geradores, deve ser efetuado; para tanto, foi aplicado o Diagrama de Ishikawa, que permite descrever o sistema, delimitar a análise das ocorrências e avaliar criticamente o sistema.

3. Escolha do estudo de caso: condições de contorno – como abordado tanto na Introdução como nos Aspectos Teóricos deste trabalho, a empresa escolhida tem como vantagens sua sede no Brasil, tanto para construção de partes e peças como para retrabalho, tecnologia de processo e produto, além de uma cadeia de suprimentos (*supply chain*) complexa, em detrimento de um tipo de tecnologia para fabricação dos itens, pois de acordo com o projeto a composição dos componentes varia bastante.

4. Condução da Pesquisa: nesse momento foram descritos e classificados todos problemas ocorridos e geradores dos curtos-circuitos, desde aqueles originados no processo produtivo, tanto quanto aqueles gerados durante a operação das turbinas. Assim, a aplicação do Diagrama de Pareto (através de critério pré-estabelecido) definiu as necessidades nas etapas de laboratório e projeto piloto. Neste caso, o critério estava ligado ao impacto quanto à parada de produção de energia pelas turbinas montadas e perda sem reaproveitamento dos principais componentes destes equipamentos, quantificados tanto por massa como por quantidade.

5. Finalização da Pesquisa: As condições necessárias para as etapas de laboratório e piloto foram:

- a. Montar experimento no laboratório;
- b. Construir um projeto piloto;
- c. Emitir as conclusões do Estudo;
- d. Elaborar propostas de ações. Neste caso, como se verá nos Resultados e Discussões, processos de miniaturização mostraram-se bem eficientes. Assim, as soluções encontradas são, na maioria dos casos, decorrentes de se utilizar o conhecimento acumulado em microeletrônica, tanto em processos como em tecnologia.

Neste projeto, as etapas de 1 a 3 são as mais críticas; portanto, testes prévios precisam ser efetuados, tais como segue:

- Para determinar quais os principais fatores que influenciaram o desempenho das turbinas desenvolvidas e implantadas pela empresa estudo de caso no país, cada caso de não funcionamento foi seguido pelo prazo mínimo de 1 ano; a partir dessas informações, um estudo estatístico foi efetuado a fim de definir qual o principal parâmetro a influir nos resultados. O estudo gerou relatórios, e, como será apresentado no item Resultados e Discussão, permitiu inferir que a presença de água na fase líquida é responsável pela maioria dos curtos circuitos observados no equipamento.
- Esse problema foi abordado dentro dessa pesquisa considerando tanto o projeto do produto quanto a avaliação do processo. É importante observar que não se encontrou informação dessa abordagem na literatura, isto é, há uma componente de inovação tecnológica acerca deste tema relevante. Quanto às questões de processo, aplicou-se a análise preliminar para determinar os materiais a serem caracterizados, além dos respectivos métodos.
- Definidos os principais fatores, fez-se estudo preliminar e determinaram-se os novos parâmetros para evitar a ocorrências dos efeitos espúrios sinalizados no capítulo da Introdução desta pesquisa. Nessa fase testes laboratoriais foram importantes.
- A partir dos parâmetros definidos e respectivos testes, já em escala piloto, foram desenvolvidos protótipos e *mock ups* para avaliação dos materiais e desempenho de partes do conjunto montado. O uso desses protótipos e *mock ups* é relevante para a análise SWOT.
- Após os testes em protótipos ou *mock ups*, e aprovação das mudanças em escala piloto, a melhora no desempenho das turbinas foi seguida por um ano, ou eventualmente 2 anos, através de entrevistas não estruturadas.

- Os resultados obtidos no estudo de caso foram usados para criar um *roadmap* para desenvolvimento da tecnologia.

É importante observar que, para a melhor descrição dos instrumentos desenvolvidos na fase de planta piloto, fez-se uma diferenciação entre protótipo e *mock up*. Essa diferenciação nasceu de pesquisa no Google Acadêmico, onde se observou que, no setor eólico, os descritores protótipo (ou *prototype*) e *mock up*, ou mesmo versão alfa e beta, não recebem o mesmo significado para diferentes autores. A Tabela 3.1 apresenta a evolução do uso desses descritores ao longo de 4 décadas. O aumento do uso dos termos nas últimas décadas decorre do processo de desenvolvimento tecnológico, onde as mudanças incrementais tendem a ser incorporadas também em equipamentos que sofrem manutenção. Dentre as citações que abordavam protótipo e *mock up* escolheram-se aquelas designadas como mais relevantes e que tratavam de projeto, construção ou modificações de turbinas para análise. As tabelas 3.2 e 3.3 sumariam a avaliação dessas referências.

Tabela 3.1 – Descritores e respectivo número de citações no Google Acadêmico®

Descritores: <i>mockup prototype "wind power"</i> Publicações em qualquer idioma	Número de citações – nos períodos de – até				
	1971-1980	1981- 1990	1991 - 2000	2001 - 2010	2011 - 2019
	7	4	12	90	245

Fonte: O Autor

Tabela 3.2 – Resumo das definições e características comumente usadas para o termo protótipo

Protótipo			Tipo de Representação		Funcional	Finalização	Escala	Obs.	
Denominações	Palavras-chave/Frases	Autores	Física	Virtual				Construção	Exemplo
protótipo	apenas um passo antes do próprio produto	Jung, C.F.	X		Sim (completamente)	similar a amostra do produto	1:1	completamente da mesma forma que a versão final (produto)	aparelhos eletrônicos
serviço de protótipo	não é físico, mas tangível; estudar os pontos fortes e fracos da ideia e identificar novas direções	Brown, T.		X	Sim	não aplicável	não aplicável	esquemas	
protótipo	conceito de teste	Beckman, S.Barry, M.	X	X	Sim	similar a amostra do produto	1:1	corresponde a versão final	rolamentos, itens
sistema de protótipo	baseado em especificações; escrever as especificações e construir provas	Dwre, S. Rushby, J.M. Shankar, N.		X	Sim	não aplicável	não aplicável	esquemas	lógica fuzzy
protótipo		Perry (revisão), 2005, citação							
protótipo	modelo, útil para definir um primeiro projeto	Pressman, 1995		X	Sim	não aplicável	não aplicável	algoritmo	software
protótipo	representação de peças em um sistema completo, modelo operacional	Perrin, 1996	X		Sim, de certo modo	semelhante a partes e peças do produto final	1:1	com ferramentas semelhantes usadas no produto final	rolamentos, itens mecânicos
protótipo	Desenvolvimento Cooperativo do Sistema Experimental	Grenbaek, 1997		X	Sim	Versão demo ou beta para software	não aplicável	algoritmo	software
protótipo	versão altamente confiável, próxima do equipamento final	2, Netland, 2013	X		Sim	similar a amostra do produto	1:1	completamente da mesma forma que a versão final (produto)	robô de inspeção
protótipo	validar os conceitos de projeto e os resultados da análise	6, Karmaker, H.	X		Sim	similar a versão final	1:1	construída uma seção do produto total, de acordo com	Inserção de bobinas no estator
protótipo	equipamento funcional	10, Fernandes	X		Sim	similar a versão final	1:1	usado como sinônimo para mock up no resumo	

Fonte: O Autor

Tabela 3.3 – Resumo das definições e características comumente usadas para o termo “mock up”

Mock up			Tipo de Representação		Funcional	Finalização	Escala	Obs.	
Denominações	Palavras-chave/Frases	Autores	Física	Virtual				Construção	Exemplo
mock up modelo	modelo	1, Park, 2013	X		Sim	mesma função de alguma parte em um produto (do todo)	1:1	completamente da mesma forma que a versão final (produto)	equipamento de vento de exaustão
mock up	modelo	2, Netland, 2013	X		parcialmente	apenas alguma semelhança com o equipamento real	1:1	apenas visualmente semelhante ao equipamento real	turbina eólica - nacelle
mock up	estrutura de montagem camada externa da longarina com novo componente - termoplástico	3, Rijswijk	X		parcialmente	seção do item completo	1:1	semelhante ao produto (processo de montagem intermediário)	seção da pá da turbina eólica
mock-up	modelo para simular	4, SHIN, H-J, LEE, J-R, CHIA, C-C, YOON, D-J.	X		parcialmente	mesma função de alguma parte em um produto (do todo)	1:1	2 peças de placas coladas para formar um ângulo de 115°	seção da pá da turbina eólica
mock-up	modelos de escala completa para testar a vibração	5, Hines, E.,	X		totalmente	mesma função do produto completo	1:1	Faixas de 4 (pés) de largura da cunha inteira e preenchidas com obstruções semelhantes às cunhas reais	estrutura para aplicar testes
mock-up	verificar as dimensões das bobinas, do enrolamento final e outras folgas	6, Karmaker, H.	X		totalmente	seção do item completo	1:1	seção de estator de madeira	estator de um gerador
mock-up	parque eólico	7, Sperandio, M., 2013	X		totalmente	reprodução de um parque eólico	1:1000	semelhante às dimensões do parque eólico, mas diferente em relação às condições ambientais	parque eólico
mock-up	pá de turbina eólica - região da ponta	8, Shin, et al, 2010	X		parcialmente	reprodução da ponta da pá eólica	1:1000	material diferente se comparado com a lâmina real	
mock-up	pá de turbina eólica	9, Makaya et al, 2011	X		parcialmente	reprodução da ponta da pá eólica	1:10	usado como sinônimo para protótipo	

Fonte: O Autor

Como pode ser observado nessas tabelas, enquanto o protótipo é geralmente considerado um equipamento real e funcional em todos os aspectos, *mock up* é tido como uma peça simples, que apresenta características importantes e útil para testar partes e peças de um instrumento maior. Esta definição também será usada neste trabalho. Vale ressaltar que outras características também são diferentes em definições de protótipos e *mock up*, como dimensões, o que significa que a escala nem sempre é constante e igual a 1 (um).

Assim, por exemplo, apesar de raro não é incomum o uso de *mock up* e protótipo como sinônimos, porém é mais provável que a diferenciação se encontre na escala, sendo os *mock ups* definidos como instrumentos com escala 1:1, mas não os protótipos.

Finalmente, a simulação e outras ferramentas virtuais também podem ser definidas como protótipos às vezes.

Assim, neste trabalho, *mock up* foi considerado o dispositivo que possui escala 1:1, mas que, apesar de completamente funcional, corresponde a apenas uma parte de um equipamento ou instrumento enquanto protótipo pode ter diferentes escalas e representar apenas o teste de um problema específico.

Tais definições são importantes porque, para tornar a análise na planta piloto adequada para produzir inovações – na forma de um plano de negócios ou um *roadmap* – duas abordagens são possíveis: *Design Thinking*² a PMBox. Contudo, para o *Design Thinking*, protótipo significa que a idealização é visualizada ou construída para testá-la, ou seja, até mesmo um produto não físico seria aceito como protótipo em áreas de produção mais tradicionais, como a mecânica, que é o objeto considerado neste trabalho. Por outro lado, outra declaração importante sobre tal definição é a etapa de iteração, já que “iteração no *Design Thinking* começa normalmente após a ‘fase de teste’, no final de todo o processo, e é executada no protótipo”; em outras palavras, o *Design Thinking* não vincula absolutamente a existência de experimentos e protótipos, isto é, “até mesmo as primeiras hipóteses são testadas, não apenas a ideia prototípica”. Além disso, “sugere-se desenvolver um modelo de negócio além do protótipo, para validar a viabilidade do conceito”, o que significa que as primeiras ideias – mesmo antes da idealização – devem ser testadas (MÜLLER et. al., 2012). Portanto, essa abordagem não é adequada para uma tecnologia já madura e que está sofrendo mudanças por comparações com outra área (*benchmarking*).

² Design Thinking, segundo Cardon e Leonard (2010) é ferramenta que visa a compreensão, visualização e descrição de problemas complexos para, através da criatividade, auxiliar no desenvolvimento de soluções para tais problemas.

Por outro lado, um modelo de negócio pode ser obtido tradicionalmente pelo PMbok, um guia importante para o gerenciamento de projetos. Os processos de forma macro associados ao fluxo proposto no PMbok, as Etapas de Gerenciamento de Projetos e respectivas Ferramentas são apresentadas na Tabela 3.4. O gerenciamento de projetos é a aplicação de uma série de conhecimentos, metodologias e técnicas às atividades do projeto em si com o intuito de atender os seus requisitos. Nessa tabela, têm-se relacionados os processos de forma macro associados a este fluxo e seus desdobramentos-chave para a execução de um projeto, desde a ideia, seu planejamento até o respectivo fechamento (PMI, 2008). Com o aumento da complexidade dos projetos, cada vez mais se faz necessário aplicar métodos adequados para geri-los. O PMI, uma das maiores organizações de profissionais de gerenciamento de projetos do mundo, traz como principal definição que projeto seja um empreendimento transitório para atingir um resultado específico, seja físico seja tácito. A relação entre os macroprocessos associados, desde a sua concepção até a conclusão, tem como medidores de sucesso a boa execução das etapas de gerenciamento dos projetos, compreendendo as questões de custo, qualidade e prazo.

Das principais ferramentas indicadas pelo PMI, tem-se o gráfico de bolhas, a gestão de portfólio e a avaliação do ciclo de vida como vitais para seleção, administração de seus processos e o curso de operação como um todo no atingimento do resultado final. Para tanto, identificar os requisitos do projeto e atender as expectativas dos *stakeholders* são premissas fundamentais para dar início aos trabalhos. Portanto, conforme declarado no documento do *Project Management Institute* (PMI), “essa norma não é abrangente nem completa; é possível usar metodologias e ferramentas distintas para implementar a estrutura”, o que significa que se pode usar o PMBox como um guia em ambas as situações: inovação ou projetos tradicionais. Nesse trabalho as principais ferramentas indicadas na Tabela 3.4 foram utilizadas.

Tabela 3.4 Relação dos Macroprocessos da Gestão de Projetos indicados pelo PMI

Macroprocessos Associados	Etapas de Gerenciamento de Projetos	Metodologias/Ferramentas
Iniciação	Gerenciamento do Escopo	Gráfico de Bolhas
Planejamento	Qualidade	Gestão de Portfólio
Execução	Cronograma	Ciclo de Vida
Monitoramento e Controle	Orçamento	Etc.
Conclusão	Análise de Risco	

Fonte: O Autor

3.2. EQUIPAMENTOS

3.2.1 *Mock up* para teste de bobina

Como será apresentado no capítulo Resultados e Discussão, as bobinas apresentavam não conformidades sérias que necessitam de testes constantes; essas condições levaram à decisão de desenvolver *mock up* para tal teste.

Segundo KLAMT (2012), os *mock up*'s são úteis para “máquinas em alta altitude que necessitam de atenção especial durante o cálculo, projeto e teste”. O autor testou seis barras de bobina do estator e, para isso, usou uma autoclave. Assim, neste estudo de caso decidiu-se por um *mock up* de fabricação própria e, devido às necessidades do estator (ver configurações no capítulo 2), também foi projetado um sistema de aquecimento.

3.2.2 *Mock up* para teste em alta temperatura (forno)

No início dos testes, sobretudo para avaliar a bobina e o sistema de isolamento aplicado, algumas tomadas de decisão foram necessárias afim de pesquisar e analisar os efeitos e performance de produto. Neste caso, foi proposto utilizar um forno com controle de temperatura que expusesse as bobinas em condições reais (com aceleração de agressividade) de operação. Devido às dimensões exigidas em tamanho para produzir um ambiente similar ao produto em operação, foi necessário desenvolver um projeto para a construção do forno para tomar estes ensaios (dimensões do forno: 2 m x 1,2 m e 1,0 de altura), atendendo rigorosamente às normas do setor elétrico vigentes; esta atividade foi denominada de fabricação do *mock up* – forno (ver Figura 3.1.a).

O *mock up* (forno) foi composto por uma estrutura metálica com casaco de lã de rocha. O painel de controle (Figura 3.1.b) estava ligado a esta estrutura com a função de monitorização da temperatura da peça e do forno. A composição do painel era composta por sensores de temperatura tipo PT-100, além do próprio controlador. Construir um forno mostrou ter um custo-efetivo se comparado à compra.

A performance do instrumento em conjunto com a bobina testada está apresentada no item Resultados e Discussão.

Figura 3.1 – “Mock up” – Forno para testes de bobina

Figura 3.1 (a) – Forno e Figura 3.1 (b) – Controle do Paineiro do Forno detalhado

Fonte: O Autor

A tabela 3.5 sumariza as etapas de construção destes *mock up*’s

Tabela 3.5 – Etapas de construção de *mock up*’s (bobinas e forno)

Planilha de Horário				
Passos	Descrição das Tarefas	Dia inicial, dia	Dia Final, dia	Homem-hora, H-h
0	Definição das condições iniciais ou contorno*	-30.º	0 (nulo)	40h * 4: 160
1	Pontapé inicial do ensaio – planejamento	1.º	2.º	20h * 4: 80
2	Aquisição dos componentes	2.º	14.º	40h * 2: 80
3	Confeção dos equipamentos (estufa, painel, instrumentos de medição, etc)	14.º	29.º	160h * 4: 640
4	Teste de avaliação	29.º	44.º	150h * 2: 300
5	Emissão de relatório	44.º	50.º	70h * 2: 140
6	Análise e liberação da Engenharia	50.º	55.º	60h * 2: 120
7	Atualização do procedimento	55.º	60.º	50h * 1: 50
			Σ =	1410

*Passo 0 não foi incluído na somatória

* passo 0 – não foi adicionado o somatório

Fonte: O Autor

Além disso, duas bobinas de tamanho reduzido (protótipos) foram construídas. No primeiro caso, para testes de impregnação à vácuo, como será descrito em Resultados e Discussão. No segundo caso, após todas as modificações propostas neste trabalho, esta foi mantida em laboratório, por 2 (dois) anos, para avaliar (visualmente e por microscopia óptica) o envelhecimento de partes e peças.

3.2.3 Reatores

Para avaliar a percolação de água no estado vapor pelas fitas de mica foi construído um pequeno reator, baseado no reator de cavidade dupla desenvolvido por (LIMA et. al., 2009), apresentado no esquema da Figura 3.2. As principais diferenças do reator construído foram as dimensões, já que a amostra possuía aproximadamente 1 polegada quadrada (20 x 25 mm). Assim, devido às maiores dimensões, a cavidade foi fechada por rosqueamento (rosca métrica, Norma DIN 13), não prensagem; deste modo, o reator é desmontável. Além disso, foi possível utilizar como material do recipiente vidro e o volume total do recipiente é de 500 ml, o que facilita o aquecimento do líquido contido neste. Por outro lado, o uso de líquido, devido à gravidade, muda a forma de medir a percolação, ficando o detector na parte superior. A Figura 3.3 apresenta esquema do reator e foto do arranjo de medida. A resistência de aquecimento do líquido é mantida dentro do recipiente, que é seguro na posição vertical por uma terceira mão. A medida da umidade relativa é feita imediatamente acima da amostra. Portanto, para reprodução do reator os seguintes materiais são necessários:

- Controlador de temperatura;
- Becker de 500 mL;
- Borracha Isolante;
- Reator (com telas de aço para suporte da amostra);
- Termo Higrômetro;
- Tomada para aquecimento;
- Transformador para 220 V;
- Sensor de temperatura.

Figura 3.2: Reator de cavidade dupla desenvolvido por (LIMA et. al., 2009)

Fonte: Adaptado de LIMA et. al. (2009)

Figura 3.3 – (a) Esquema do reator e conjunto em medida (b) “set up” do reator

Fonte: O Autor

Para modificar o caráter superficial das amostras de fita (ver materiais), um dessecador foi utilizado como reator e cerca de 10 mL de hexametildissilazana (HMDS) foi adicionada em sua base, para funcionar como reagente de hidrofobização. O dessecador foi acoplado a uma bomba de pré-vácuo (bomba mecânica), o que permite evaporar quantidade significativa de reagente³.

3.2.4 Outros Equipamentos

Nos ciclos de produção e retrabalho, amostras foram obtidas e analisadas por microscopia eletrônica de varredura (SEM ou MEV, Nova Nano SEM 400, FEI, EUA).

³ Em processos industriais, com purga (*purge*) usando N_2 , é possível obter pressões de 10 Torr de HMDS na câmara (YES, 2014).

Para auxiliar com as medições de tensão e fluxo de corrente nas ligações das bobinas foi utilizado o HiPot, conforme apresentado na Figura 3.4. Este equipamento pode ser acoplado aos *mock ups*.

Figura 3.4 – HiPot: equipamento esquemático e painel

(a) (b)

(a) – Equipamento HIPOT e (b) – Detalhe do Painel de Controle do HIPOT

Fonte: O Autor

3.3 PROCEDIMENTOS

1) Ensaio de percolação de água: as etapas de execução do ensaio de avaliação das fitas isolantes a partir da simulação do ambiente em condições próximas ao do gerador em operação, foram:

- Cortar a mica em tamanho adequado;
- Colocar a mica entre as duas telas de aço acopladas no reator;
- Encher 50% do Becker com água potável;
- Conectar o conjunto do reator no Becker e isolar com borracha na lateral;
- Ligar o controlador de temperatura;
- Ajustar a temperatura a $100^{\circ}\text{C} \pm 2$;

- Medir a umidade do ambiente;
- Medir a umidade no orifício do reator;
- Repetir o procedimento, utilizando 02 micas e 03 micas – situação de aplicação na bobina;
- Tabelar e calcular o percentual de absorção de umidade da mica.

2) Ensaio para avaliar a adsorção de HMDS na Fita de Mica: o objetivo deste ensaio foi avaliar o comportamento da fita de mica com absorção do composto HMDS. Os materiais utilizados neste ensaio foram, além do Dessecador com tampa e Bomba à Vácuo:

- Composto HMDS (hexametildissilazana);
- Fita de Mica;
- Cola;
- Tesoura;
- Placa de Petri.

3) O Procedimento (exemplificado passo a passo na Figura 3.5) apresenta as seguintes etapas:

- Colocar a placa de Petri dentro do dessecador;
- Encher em 90% a placa com o reagente HMDS;
- Cortar 08 fitas de mica (5,0cm x 2,0cm);
- Colar as fitas na parte superior interna da tampa do dessecador;
- Deixar as fitas penduradas sem contato direto com o reagente;
- Fechar a tampa do dessecador;
- Abrir a válvula da tampa e conectar a mangueira da bomba;
- Ligar a bomba à vácuo por 01 minuto;
- Fechar a válvula do dessecador e desligar a bomba à vácuo;
- Deixar o dessecador em repouso por 48 horas;
- Coletar as fitas de mica para análise de umidade em reator.

Figura 3.5 – Estrutura de ensaio para avaliação do HMDS na fita de mica

<p>Estrutura para o experimento</p>	<p>Fitas de Mica coladas na parte superior</p>

<p>Adicionando vácuo no dessecador</p>	<p>Fitas de mica absorvendo HMDS</p>

<p>Fonte: O Autor</p>	

3.3.1 Materiais utilizados nos procedimentos

a) Reagente utilizado: HMDS, i.e., hexametildisilazana (composto orgânico) $C_6H_{19}NSi_2$, fornecido pela Baker®, grau GC.

b) Características:

- Líquido incolor.
- Reagente para análise.
- Reagente comum na síntese orgânica e para a química de organometálicos.

c) Amostras:

Foram testadas fitas de isolamento de três tipos: fita termocontrátil, fita de mica e fita poliéster.

O material utilizado para avaliar a resistência à umidade foi a mica poliéster (SISAFLEX P - 0,15mm X 20 mm) (Figura 3.6).

As condições de contorno para aplicação do ensaio foram:

- Cada fita adesiva pôde ser usada em um nível contínuo de temperatura;
 - Os dados de referência são para suportar 20.000 horas; classe térmica H (180°C)
- isolamento de alta tensão.

Figura 3.6 Mica (a) Rocha (b) – Fitas de mica (validade 12 meses)

Fonte: O Autor

Por fim, o vácuo foi aplicado no sistema através da válvula lateral do vaso VPI, aproveitando este controle de pressurização, porém sem possibilidade de valor em milibar. A aplicação do processo teve a duração de 01 minuto.

As etapas desta aplicação estão descritas conforme abaixo:

- As fitas de mica foram cortadas em tamanho aproximado de 5,0 cm e coladas e coladas com superbonder® na parte superior interna da tampa do dessecador.
- Durante o processo foi utilizado o próprio recipiente contido HMDS ao invés da placa de Petri.
- Foi adicionado silicone em gel nas laterais do dessecador para vedar a tampa ao corpo, evitando assim perda de vácuo.
- Para o procedimento de retirada das fitas de mica foi necessário abrir a válvula da tampa do dessecador para a entrada de ar.
- Utilizada fita de mica (SISAFLEX P - 0,15mm X 20 mm).
- Utilizado dessecador de 200 mm.

Portanto, para melhor analisar os resultados e seus efeitos, conforme descrito anteriormente, todos os ensaios foram reproduzidos a partir da miniaturização dos sistemas que formam a turbina eólica, utilizando os mesmos componentes aplicados nas etapas de fabricação do gerador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos até meados de 2017 com este trabalho. A apresentação segue a lógica do ciclo PDCA, onde após uma intervenção e nova verificação são realizadas novas interações processadas.

Assim, inicialmente escolheu-se o empreendimento estudo de caso, considerando-se as condições de contorno informadas nos Aspectos Teóricos, logo após procedeu-se a sua caracterização e, por fim, atribuíram-se as mudanças de acordo com o avaliado previamente (Ciclo PDCA), até compor uma rota de desenvolvimento; por fim, instaura-se sua comparação com o que pode ser obtido por projeto, produto, processos e microeletrônica (*roadmap*).

4.1 O EMPREENDIMENTO

4.1.1 Escolha do Empreendimento – contextualização

No país, em 2007 foi idealizado um projeto para a construção de 13 parques de energia eólica de 317 MW e expandir os horizontes da manufatura local, tendo em vista o mercado brasileiro.

Devido ao programa PROINFA¹, a Empresa teve a obrigação de fabricar os aerogeradores com índice de nacionalização não menor que 60%. Para tanto, foi necessário instalar uma fábrica de geradores no Brasil, neste caso no Estado de Pernambuco. Em novembro deste mesmo ano, foi decidida que a região que abrigaria tal fábrica seria SUAPE por estar recebendo grandes investimentos para a viabilização e operação de importante Porto no Nordeste Brasileiro.

O Mercado Brasileiro, em expansão – quase que concomitante a esta entrada, e junto com a Caixa Econômica Federal, ofertou a construção dos três primeiros parques, compostos por 66 máquinas, totalizando 99,6 MW – todos estes localizados no Estado do Ceará. Em julho de 2009, a maioria destes aerogeradores estava gerando energia limpa e

¹ PROINFA: o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, conforme descrito no Decreto nº 5.025, de 2004, foi instituído com o objetivo de aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica.

renovável a 120 km da cidade de Fortaleza, confirmando o grande investimento deste setor na América do Sul.

Um dos eixos principais deste investimento gerou empregos para mais de 3000 pessoas de forma direta e milhares de outros de forma indireta (TRALDI, 2018), (RODRIGUES, CHAGAS, 2016). Muitos destes profissionais foram treinados e formados internamente, pelo ineditismo desta indústria na região e falta de qualificação específica, pois inicialmente a região apenas atendia o setor agropecuário.

Em 2011, a produção anual da fábrica no país foi de 300 unidades, equivalentes a um total de 450 MW; ocorreu também o projeto de aerogeradores com capacidade de 2,0 MW a fim de gerar um montante de 600 MW e avançar em termos de inovação tecnológica. Isso significa a geração de energia limpa suficiente para abastecer 300.000 famílias. Em termos de impacto, esta produção evitaria o consumo de 3 milhões de barris de petróleo por ano, reduzindo, assim, a emissão de CO₂ em 1,5 milhões de toneladas (MELO, 2016).

Logo em seguida, iniciou-se a construção de 10 parques eólicos, no Estado de Santa Catarina. Estes parques representaram um investimento adicional de quase R\$ 1300 milhões (USD@ 2,00). Como consequência social, representaria a criação de pelo menos 25000 empregos durante sua construção² e centenas durante sua operação e manutenção (ABDI, 2018).

4.1.1.1 A Empresa – estudo de caso

O autor deste trabalho efetuou entrevistas não estruturadas, análise documental e auditorias na Organização que tornaram possível extrair as informações que aqui compõem a descrição deste empreendimento.

Quando da análise inicial, a Empresa estudo de caso oferecia bens de capital de alto valor agregado, incluindo serviços de pós-vendas para o cliente, operação e manutenção de equipamentos, e, instalações hidrelétricas, bem como a remodelação e modernização de centrais elétricas.

² O aparente elevado número de empregos envolvidos deve-se à construção do empreendimento, ocupando área considerável, além de diversos arranjos produtivos que se estabeleceram ao redor, para atender à demanda da fábrica.

A Empresa realizava investimentos de capital em projetos hidrelétricos, especialmente atendendo os modelos de contrato tipo BOT³ (*Build, Operate and Transfer*), BROT⁴ (*Build, Rent, Operate and Transfer*) entre outros similares.

Um serviço do tipo BOT é ofertado quando o cliente (órgãos públicos ou mesmo um grupo industrial) deseja que o parceiro privado participe ativamente na gestão do projeto, incluindo até também a corresponsabilidade pelo financiamento. Já o BROT é uma variação do tipo de contrato do tipo de PPP (parceria público-privada) em função das fases do ciclo de vida do projeto integrado e correlacionado com o empreendimento em questão (PINTO-FARIA, 2015).

A Empresa também possuía participação em negócios cujos projetos de infraestrutura são de relevante envergadura (energia hidroelétrica) em todo mundo. Seu principal modo de gestão é o EPCM⁵ (*Engineering, Procurement and Construction Management*), que apresenta um formato de contrato específico para grandes projetos envolvendo infraestrutura, mineração, recursos em geral e indústria de energia. A gestão do contrato tem por finalidade gerir todo o projeto técnico/engenharia, fluxo e aquisição de materiais, manufatura dos equipamentos, instalação e entrega dentro dos prazos estabelecidos (HARTMAN, 2003).

Ademais, a Empresa estudo de caso era detentora do projeto e produzia geradores eólicos de alta potência com tecnologia de ponta, aliando processo e custos competitivos.

A Empresa estudo de caso era uma nova unidade de negócios criada por um grande grupo industrial argentino, com missão de projetar, fabricar e comercializar equipamentos de geração eólica de alta potência com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento deste tipo de energia na região e aprofundar sua participação na matriz energética global. Os princípios básicos adotados pela Empresa quando da concepção do projeto eólico são:

- máxima eficiência na captura e transformação de energia,
- mínima manutenção, e
- preço altamente competitivo a partir da minimização dos custos operacionais e uso.

³ BOT: (Construção, Operação e Transferência) é uma linha de contrato que combina vários tipos de *expertises*: projeto e construção, serviços e modalidades de financiamento.

⁴ BROT: (Construção, Arrendamento, Operação e Transferência) – variação de contrato na relação PPP.

⁵ EPCM: (Engenharia, Comercialização - Suprimentos e Gerenciamento da Construção) – modo de gestão de projeto aplicado à inovação tecnológica e operações.

Historicamente, no país o que ocorreu na empresa foi como segue. O mercado de Energia Eólica, sobretudo na primeira década deste século, através de vários estudos do potencial eólico brasileiro, lançou alternativas para implantação deste tipo de energia (MELO, 2016), (ABDI, 2018).

O primeiro aerogerador no Brasil foi instalado em Fernando de Noronha em 1992. Em 2002, o governo federal criou o PROINFA (Programa de Incentivo às Alternativas de Energia Elétrica) com o intuito de incentivar outras fontes renováveis de energia, tais como: biomassa, eólica, pequenas centrais hidroelétricas (PCH's); *a priori* foram destinados 3.300 MW de energia produzida igualmente distribuída para os 3 segmentos citados. Em seguida, foi definido que a contratação de energia elétrica para atendimento do consumo e formação do lastro de reserva se daria através de leilões públicos específicos (SALINO, 2011).

Para o campo eólico foram realizados 3 leilões tendo como finalidade a contratação de energia, ocorridos nos períodos de dezembro de 2009, agosto de 2010 (energia de reserva) e agosto de 2010 (fontes alternativas), respectivamente.

Diante deste cenário convidativo, a Empresa consolidou sua entrada no Mercado Brasileiro através da instalação de sua planta fabril na região Nordeste, próxima as principais 'jazidas' eólicas brasileiras, ou seja, ventos favoráveis para captação desta energia⁶.

Esse movimento praticamente brusco ocorreu, contudo, através da direta expansão do modelo de operação hidráulico, forte e consolidado processo desta Empresa na América do Sul, em direção à energia alternativa e renovável. Vale salientar que a Empresa atua na área de metalurgia há mais de 100 anos, muitos deles aplicados na fabricação de equipamentos para Usina Hidroelétrica, ou seja, não está fortemente ligada ao setor eletroeletrônico em suas vertentes mais desafiadoras, como a área de dispositivos semicondutores, portanto, não está familiarizada com desenvolvimentos do tipo *pull & push*, descritos nos Aspectos Teóricos, e usados como modelo para a área eólica.

⁶ O processo iniciou-se em 2007 – tomada de decisão, seguida por início de implantação, e, em 2008, começo da operação com a fabricação de aerogeradores.

4.1.1.2 Detalhando a Empresa

A Empresa na qual foi aplicado o Estudo de Caso trata-se de uma fabricante de geradores eólicos e hidráulicos. Neste caso, a unidade de negócios foco é a fabricação de geradores eólicos.

A unidade da fábrica da Empresa estudo de caso, em 2009, havia conseguido a certificação de sua matriz pela ISO 9001:2008, como comentado anteriormente, a Empresa estudo de caso, além de fabricante de geradores eólicos, utilizava a tecnologia EPCM na aplicação de seus projetos; isto lhe conferia a capacidade de atuar como incorporadora de parques eólicos, ou seja, trabalhava com projeto da engenharia de ventos, montagem e instalação dos equipamentos, e por fim gestão de O&M⁷.

Importante salientar que, apesar de não ter obtido a certificação de gestão integrada⁸, a Empresa estudo de caso possui as ferramentas de monitoramento e controle necessárias para abastecer todos os levantamentos e informações para a elaboração desta pesquisa, pois:

- as métricas referentes ao controle da qualidade e produtividade estão estabelecidas;
- todos os departamentos estão intimamente ligados aos resultados operacionais da Empresa;
- os procedimentos, instruções de trabalho e registros estão armazenados no ERP⁹ vigente e disponíveis de acordo com o rol de autorização de acordo com a estrutura organizacional da Empresa;
- há claramente uma direção estratégica de mercado que dirige todos os demais processos da Empresa.

A Empresa estudo de caso já está no Mercado há mais de 100 anos, atuando nos campos de metalurgia pesada. Sua evolução atingiu o setor de energia hidráulica e *a posteriori*

⁷ O&M: operação e manutenção após comissionamento e entrega dos equipamentos fabricados.

⁸ Embora a Empresa não tivesse a certificação do sistema de gestão integrado, ela possuía processos de auditoria interna; assim, o presente trabalho, usando estes processos, efetuou uma avaliação de auditoria interna utilizando como base as 3 normas e verificou que ela possuía todos os requisitos para validar sua certificação. Uma possível explicação desse status deve-se a uma posição estratégica da Empresa que em meados de 2011 quando da estruturação da área contratou profissionais externos provindos da área automobilística com bastante experiência em certificação.

⁹ ERP: trata-se de uma sigla derivada do nome *Enterprise Resource Planning* que significa “Planejamento dos Recursos da Empresa”. ERPs são mais que *softwares* que integram todas as informações e processos de uma organização dispostos em um único sistema, totalmente integrado.

energia eólica. A matriz está locada na Argentina, onde participou de importantes instalações de infraestrutura energética daquele país.

Sua vinda ao Brasil teve como mote uma parceria tanto com o governo estadual de Pernambuco, como também sob a esfera Federal do Brasil, no intuito de gerar bom volume de empregos a partir da criação da cadeia eólica de manufatura na região do Nordeste Brasileiro, um dos ambientes tecnicamente mais propícios para este tipo de instalação e funcionamento.

Quanto à certificação, é importante salientar que, pela análise inicial deste trabalho (ver nota de rodapé n.º 6), já foi possível diagnosticar uma Empresa com sérias preocupações em melhorar seu nível de gestão, apresentando claras estratégias para implantar o Sistema Integrado de Gestão a partir das certificações complementares da NBR ISO 14001:2005 e OHSAS. Nesta linha, a Empresa estudo de caso, quando avaliado este projeto de pesquisa, já apresentava os indicadores responsáveis pelo monitoramento de seus macroprocessos, tais como: volume produtivo, custos logísticos e inventários, resultados financeiros e monitoramento dos projetos. Todavia, ainda longe de propiciar uma gestão com base na sustentabilidade de seus negócios e operações.

Como abordado na Introdução, uma das questões mais importantes enfrentadas pelo setor eólico, que se assemelha às enfrentadas pela microeletrônica, e que foi analisada neste estudo é: “Como conciliar as exigências do Mercado por tecnologia e potência do produto sem ter o projeto validado técnica e operacionalmente, e, seus equipamentos seguramente testados para corresponder aos requisitos técnicos dos contratos com no mínimo 20 anos de operação?”. Era intenção da empresa estudo de caso enfrentar esta questão através da obtenção de certificação técnica. Para tanto, um dos principais objetivos era *a priori* atingir a certificação técnica via órgão TUV¹⁰ que representava uma alternativa de solução imediata para validar seus equipamentos.

Além das questões estratégicas acima descritas, algo já se apresentava com grande preocupação – os primeiros equipamentos instalados nos parques eólicos começavam a apresentar falhas de impacto. Nesse instante, estabeleceu-se uma corrida contra o tempo para resolver os problemas técnicos e tratá-los de modo a melhorar tanto a concepção do projeto do produto como também os processos de manufatura dos seus equipamentos.

¹⁰ TUV: organismo certificador que oferece soluções globais em certificação, inspeção, gerenciamento de projetos, ensaios e testes em grandes equipamentos e novas tecnologias.

A Empresa se compunha de 2 grandes fábricas, uma no Brasil e uma na Argentina, sendo aquela do Brasil, localizada no Porto de Suape em Pernambuco. Numa avaliação preliminar, sua infraestrutura foi comparada a empresas líderes mundial deste segmento. Isto ocorreu através de uma visita efetuada em 2011 nas dependências da Empresa *Goldwind*, um dos maiores fabricantes de Aerogeradores na China, e, por conseguinte, entre os maiores do mundo.

Seus processos estão divididos em linhas paralelas de montagem das partes e conjuntos do gerador (nacelle – estator – rotor – gerador, propriamente dito – testes), de acordo com um projeto pré-estabelecido.

A fábrica do Brasil possuía aproximadamente 700 funcionários distribuídos entre áreas técnicas e administrativas. Seu corpo técnico era formado por engenheiros de várias especialidades, tecnólogos e técnicos trazendo um *mix* de especialistas e de novos profissionais; isto já com o intuito de transmitir experiência e formar estes novos profissionais. Notava-se que a região carecia de forte experiência industrial como também específica, no caso da eólica.

Os demais segmentos que compõem a Empresa estudo de caso estavam assim subdivididos:

- Hidráulico – desenvolvimento e aplicação de projetos com turbinas KAPLAN e FRANCIS, com mais de 43000 MW instalados em todo o mundo;
- Centro de Pesquisa – na matriz a Empresa mantém um laboratório com protótipos de diversos tamanhos e em escala bastante reduzida.
- Eólico – desenvolvimento de projetos com tecnologia composta por gerador e a turbina montados combinados, evitando o uso da caixa multiplicadora, para atender a meta de 1000 MW a ser instalada na América do Sul até 2020;
- Energia Nuclear – fabricação de componentes para centrais nucleares de potência;
- Óleo e Gás – Modalidade EPC, com serviços de manutenção;
- Serviços Ambientais – gestão integrada de resíduos sólidos, urbanos e patológicos, saneamento ambiental;
- Automação de Sistemas de geração e transmissão de energia elétrica – fabricação de equipamentos, projetos de estrutura de iluminação e controle, e, sistemas de supervisão ambiental.

Os departamentos existentes na planta analisada estavam distribuídos conforme o Quadro 4.1 (todos dirigidos diretamente pelo CEO da empresa):

Quadro 4.1 – Distribuição dos departamentos em operação na Empresa – estudo de caso

Nota: FEX – Fabricação Externa, COMEX – Comércio Exterior, SGI – Sistema Gestão Integrada, DOP – Desenvolvimento Operacional.

Fonte: O Autor

O modelo de gestão das operações da Empresa tinha como ponto originador todos os processos desde a Engenharia do Produto e sua ligação com as demandas de Mercado, ou mesmo no caso da Energia Eólica, uma relação propositiva.

Como abordado anteriormente, a Empresa, tendo como origem os processos de manufatura e operações hidráulicas, na composição das fábricas para fabricação dos geradores eólicos, ‘importou’ o mesmo modelo de aplicação tanto no segmento de projeto como também sua execução. O Quadro 4.2 detalha o modelo de gestão de projeto e sua relação com os diversos departamentos da Empresa, antes da reestruturação dos processos com base na Gestão da Qualidade, fruto dos estudos levantados nesta pesquisa. Este Quadro é útil para entendimento do funcionamento de gestão da Empresa até 2010 e foi

elaborado por uma investigação e auditoria de todos os processos e departamentos existentes, através de entrevistas não estruturadas com os seus gestores e acompanhamento *in loco* desses processos.

Quadro 4.2 – Modelo de gestão de projetos – antes da reestruturação dos processos com base na Gestão da Qualidade

Fonte: O Autor

Assim, *a priori*, a Empresa comprou o projeto e os direitos de execução de um escritório europeu de projetos eólicos. Dá-se então deste modo o nascimento do processo

técnico. A compra dos projetos deste Escritório foi porque a Empresa não tinha um projeto de produto maduro suficiente para lançar no Mercado, e, ao mesmo tempo já haviam contratos firmados no Mercado Brasileiro que precisavam ser atendidos. Por isso a compra desta tecnologia.

Após a aquisição do projeto do produto, a Empresa operacionalizou a fabricação e compra dos componentes, por recomendação do próprio detentor da tecnologia, com os fornecedores específicos europeus. Dentro deste contexto, na Empresa o grupo da Engenharia do Produto passou a explodir o projeto e detalhar em vários segmentos com base nos principais grupos de componentes (gerador, rotor e estator, nacelle, torre, fundações, ligação com a central elétrica, e, pás).

O projeto então era administrado pelo Gerente da Engenharia subdivido em diversas equipes montadas a partir dos grupos de componentes. Este processo não estava integrado diretamente às operações de fábrica e controle. Aqui a conexão era ditada pelo Administrador de Contratos que trazia as exigências estabelecidas pelo Mercado Privado e Governo.

A Engenharia do Produto, portanto tinha a responsabilidade do desenvolvimento do projeto do aerogerador e todos os seus componentes a partir da ‘tropicalização’ de um projeto já desenvolvido e instalado na Europa.

Da experiência da Engenharia do Produto Hidráulico, esses grupos dispunham de laboratórios para aplicar ensaios aos principais componentes e avaliar seus resultados. Vale salientar que também estes ensaios eram coordenados pela Engenharia do Produto, sem a participação das demais áreas técnicas, inclusive Engenharia de Processos e Controle da Qualidade.

Matricialmente, a figura do Gestor do Projeto passou a incorporar o ciclo e etapas deste processo¹¹, após avaliação da estratégia em reduzir os problemas geradores das falhas nos aerogeradores. Esta área tinha como principal missão a preliminar avaliação dos componentes e conjuntos, em termos de certificação, para assim apresentar às equipes do *Supply Chain* e obter o desenvolvimento e fabricação dos itens. Outra função bastante importante, com base na ferramenta de controle de projeto (cronograma *MS-Project*), era a

¹¹ Essa nova estrutura organizacional passou a existir a partir do 2.o ano deste trabalho.

de consolidar o planejamento de todas as atividades técnicas dentro dos prazos estabelecidos pelo contrato e/ou estratégia da Empresa e Mercado.

À medida que os conjuntos e componentes eram definidos, uma sequência de ensaios passa a ser aplicada com o objetivo de avaliar as características técnicas em termos de materiais, resistência, funcionamento e *performance*. Em princípio, o modelo de gestão aplicado nesta etapa equivalia-se ao PDCA por conta de sua validação antes de propor ao *Supply Chain* e o setor denominado como Fabricação Externa para comercialização dos itens. Estes trabalhos eram efetuados tanto em laboratórios próprios da Empresa como também em empresas de engenharia terceirizadas. Para todos os itens testados eram geradas suas fichas técnicas compostas de detalhes de fabricação, características técnicas dos itens e avaliações.

Neste crescente, uma vez combinadas as informações para a montagem dos itens provenientes já das áreas de Suprimentos, Desenvolvimento de Produto e Componentes, estes eram entregues à área de Controle da Qualidade para aprovação de acordo com sua ficha técnica ora elaborada pela Engenharia do Produto. Somente a partir da validação dos itens e a formação dos conjuntos, a Engenharia de Processos seguia também em conjunto com a área de Controle da Qualidade a desenvolver os processos de manufatura.

Outro cliente direto da Engenharia de Produto era a área de Sistema Integrado de Gestão (SGI), responsável pela certificação da Empresa e seus processos, elaboração dos registros técnicos e seu depósito no Sistema ERP da Empresa, de acordo com as exigências das normas técnicas.

Neste ínterim, a área de Controle da Qualidade em conjunto com a Engenharia de Processos, gerava os fluxos de controle e inspeção a partir das folhas de processos emitidas. Uma vez estabelecidos tais postulados, uma série de treinamentos na Manufatura foram elaborados e executados, e, por conseguinte, auxiliou os processos preliminarmente pela utilização de protótipos e *mock ups* para aprofundar as técnicas de montagem e controle.

Todas estas fases desde a concepção do projeto do produto, desenvolvimento dos componentes e conjuntos, desenvolvimento dos processos de manufatura e controle da qualidade eram geridos de modo matricial pelo Administrador de Contratos com o intuito de garantir o cronograma acertado em contrato com o Cliente Final. Apesar de tal

responsabilidade, a Empresa separava de forma contundente a área comercial e técnica, tendo esta última a responsabilidade da entrega dos resultados e informações para o Gestor do Contrato.

A Empresa enfim constituída de seus processos e execução, passou a entregar os conjuntos para os seus clientes. Todavia, já em 2008 os problemas de qualidade começaram a despontar, o que exigiu revisar e repensar todo o modelo de gestão técnica empregado.

Portanto, de um modo geral, a Empresa estava caracterizada da seguinte maneira¹²:

1. Problema crônico na Gestão da Cadeia de Suprimentos – falta de materiais diversos na rotina da produção;
2. Contratação de fornecedores sem a precisa avaliação de capacidade de entrega diante da demanda requerida;
3. Tropicalização e/ou transferência da manufatura de componentes para ampliar a produção dos itens, seguida de desenvolvimento de fornecedores ausentes de um procedimento padrão de acordo com o modelo de gestão: ex. – bobinas, chapas estatóricas;
4. Não uso do ERP instalado (SAP) para executar a gestão dos materiais; o SAP não era utilizado como ferramenta de controle de gestão – as várias áreas se utilizavam de controles manuais e/ou esquemas paralelos;
5. A interface da área de Engenharia de Produto e *Supply Chain* praticamente não existia; a metodologia de como melhor fabricar os itens não era acompanhada pelas áreas técnico-comerciais da Empresa; dimensões custo, capacidade produtiva (atendimento a especificação técnica do item não era tampouco levada em consideração – não tinha a participação da Qualidade);
6. Não havia a integração entre as áreas de Engenharia do Produto, Fabricação Externa e Qualidade;
7. Excesso de retrabalhos nos componentes comprados – devido à necessidade de abastecimento, o controle de qualidade aplicada ao produto não era priorizado; outro ponto é que a indústria e a cadeia de suprimentos não estavam preparadas para modo de produção seriada – eles trabalhavam por projeto (*pull demand*). Esta

¹² Estas informações foram extraídas através de entrevista não estruturada com os gestores da Empresa.

especificidade da indústria eólica impactou fortemente na garantia da qualidade dos itens;

8. Identificado também que a qualidade não estava presente nos processos dos fornecedores para garantir a especificação e a produção seriada – caldeiraria média e leve, chapas estatóricas, bobinados, usinados; apesar de os fornecedores serem certificados, na prática os processos não estavam garantidos;

9. O modelo de produção e engenharia para a composição das especificações dos itens era baseado na indústria hidroelétrica, que possui fatores de segurança bem distintos; deste modo suas especificações eram superestimadas, sobretudo para as chapas estatóricas.

10. Os itens eletroeletrônicos, itens relacionados ao comando e controle, também apresentavam vários problemas de projeto e fabricação, falta de estabilidade e, por conseguinte o nível de retrabalho impactava diretamente o *leadtime* de fabricação dos conjuntos, exageradamente altos, uma vez que a detecção desses problemas somente era evidenciada na etapa final de montagem e comissionamento da máquina;

11. A interface da manufatura e qualidade com a Engenharia de Produto era quase nula; não havia o acompanhamento da Engenharia do Produto no processo produtivo para avaliar a exequibilidade do projeto, de fato.

Portanto, em 2011, diante de um cenário bastante problemático, sobretudo pela vida útil de seus equipamentos apresentando curtos circuitos ocorrendo muito próximos de sua entrega e comissionamento, foi iniciado um grande levantamento de dados e informações de falhas. Estas falhas eram diversas e ocorriam tanto nos anéis como também no bobinado, principalmente.

4.1.1.3 Considerações sobre o conjunto de informações obtidas

Nessa primeira análise da Empresa, fica evidente o descompasso entre a necessidade em atuar numa área que carece de inovação constante e um modelo focado na entrega de partes e peças rigorosamente descritas. Essa questão fica evidente pela escolha do modo de resolução de problemas. A aplicação das normas TUV é esperada em sistemas maduros que estão exigindo controle técnico estrito do produto em sua linha de fabricação. Embora importante, tal enfoque não facilita a implantação de modificações, mesmo que apenas

incrementais. Assim, a certificação TUV liberou a fabricação do gerador em termos de processo e não de produto acabado.

Mesmo quando se considera a Qualidade apenas pelo aspecto de rastreabilidade e reprodutibilidade, o modelo instalado na empresa era falho, como indicam a falta de histórico de fabricação dos componentes, o não registro organizado das falhas ocorridas em campo e a falta de conhecimento das causas que geraram os constantes curtos-circuitos e paradas de funcionamento dos equipamentos entregues.

Nesta preliminar análise pôde-se também constatar a falta de conexão entre as áreas técnicas e, sobretudo a não participação da área de controle da qualidade no momento da concepção do projeto do produto e seus componentes. Nemet (2008) já havia sinalizado o dilema da área de Energia Eólica caracterizando tal *desbalanço*, desequilíbrio entre as políticas de tecnologia *pull & push* não implementada.

O resultado parcial mais importante dessa fase foi a constatação da necessidade de mudar-se o organograma da empresa, como será descrito posteriormente (Quadro 4.6). A mudança, contudo, deveria considerar varias etapas, que, correspondem aos vários ciclos PDCA descritos a seguir.

4.2 O ASPECTO MACROSCÓPICO

Devido a grande necessidade de mudanças pelo aspecto estratégico e a verificação de parâmetros de fácil aquisição, como por exemplo, as condições ambientais das regiões sob estudo, a análises puramente visuais dos produtos já instalados, etc. esta fase do trabalho foi denominada como aspecto macroscópico da otimização e ocorreu como segue.

4.2.1 Ciclo PDCA: primeira iteração

O caminho percorrido nesse primeiro ciclo está apresentado na Figura 4.1a, e, para permitir comparação, a Figura 4.1.b reproduz o mapa da pesquisa conforme apresentado no capítulo 1. É possível observar na Figura 4.1.a as etapas seguidas em cada fase de avaliação e as respectivas ferramentas utilizadas. Esse primeiro ciclo de PDCA também sustenta o proposto como mapa de pesquisa (Figura 4.1.b), onde fica claro que um sistema muito díspar em relação ao usado no setor eletroeletrônico vai favorecer apenas mudanças incrementais. Assim, muito embora mudanças tenham ocorrido no decorrer da implantação da Empresa, os problemas estavam cada vez mais aparentes tanto no local de uso dos geradores (Parques Eólicos) como no lugar de construção e remanufatura (chão de fábrica). Assim, por conta dos aerogeradores entregues estarem intermitentemente parando seu funcionamento nos parques, tratava-se de etapa crítica e que demandou, por parte dos responsáveis na Empresa, a detecção e resolução imediata de suas causas. Como consequência direta dos problemas nos Parques, a remanufatura tornava-se a atividade que atraía maior atenção na fábrica.

Figura 4.1 – (a) Fluxo operacional da pesquisa – método PDCA; (b) Mapa da pesquisa conforme apresentado no capítulo 1

Fonte: O Autor

4.2.1.1 O Chão de Fábrica

Para a melhoria de processos no chão de fábrica, o que deveria impactar positivamente também nos Parques Eólicos, as seqüências de ferramentas aplicadas e mudanças efetuadas são descritas a seguir.

Como o resultado da análise preliminar (item 4.1) indicou a necessidade de mudanças gerenciais, o gerente responsável pela Gestão da Qualidade e Processos propôs uma nova

metodologia para o monitoramento e controle na Empresa. Foram estabelecidas então auditorias técnicas de processo e de produto a fim de detectar falhas durante o processo de fabricação. Vale salientar que neste momento todos os componentes já haviam sido desenvolvidos. Outro ponto interessante é que o processo de controle de qualidade seguia o método final de tubo, onde as verificações eram efetuadas somente no final de cada montagem e por amostragem. O resultado deste trabalho de controle e auditoria gerou a detecção de vários problemas de atendimento às características de projeto e normas técnicas.

Diante desse cenário bastante problemático no que tange os aspectos técnicos e, sobretudo gerando uma série de falhas em campo e, apesar de a Empresa apresentar processos de gestão, estes não serem suficientes para impedir o aparecimento de falhas que obstruíram o funcionamento dos equipamentos entregues, foi proposto um novo modelo de operação desde a concepção do projeto até o acompanhamento do funcionamento das turbinas eólicas em campo. Assim, a estrutura organizacional das Operações passou a ter a configuração baseada na Gestão da Qualidade, e o organograma implantado é apresentado no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Estrutura Organizacional das Operações com base na Gestão da Qualidade

Fonte: O Autor

Em resumo, uma nova área, denominada de Engenharia da Qualidade, passou a configurar-se na Estrutura Organizacional da Empresa. Ela passou a ser de fato a interface e instrumento de comunicação entre todas as áreas técnico-comerciais da Companhia. A começar no setor de Engenharia, sobretudo Engenharia do Produto, as metodologias e ferramentas da Qualidade foram aplicadas a fim de detectar as causas das falhas na origem e neste instante solucionar os problemas e ou efeitos.

Portanto, esta área passou a aplicar auditoria de projeto e ser a responsável pelos ensaios e testes. Ademais, foi implantada a metodologia FMEA tanto no projeto do produto, como também no projeto do processo.

Este grupo passou a integrar a área de novos desenvolvimentos e através das metodologias clássicas de gestão da qualidade, APQP¹³ e PPAP¹⁴, foi possível rever a validação técnica de todos os itens do equipamento.

Outro ponto importantíssimo desta proposição foi a elaboração e implantação da Gestão da Não Conformidade aplicada tanto nos processos fabris como em campo. O processo de antemão foi introduzido no módulo de qualidade do ERP em funcionamento (módulo QM – *Quality Management*) e todos os registros eram automatizados com garantia de sua rastreabilidade. Este processo identificava as não-conformidades segundo 5 grandes grupos de origem: processo, projeto do produto, fornecedores, falhas de campo e refugos. A partir de então, a contabilização (*paretização*) das ocorrências passaram a ser monitoradas diariamente. Dessa medida, várias outras atividades surgiram: reuniões diárias para discussão e solução das não-conformidades, de acordo com sua categorização por problemas; neste caso, para tratar problemas mais complexos eram formados grupos interdisciplinares na análise e solução dos mesmos, com a utilização da ferramenta MASP¹⁵, sobretudo; foram impostas metas para resolver os problemas também em caráter tanto preventivo, como preditivo; ademais, visitas a fornecedores de acordo com a performance obtida em relação às não-conformidades foram estabelecidas; neste contexto,

¹³ APQP (Advanced Product Quality Planning) significa Planejamento Avançado da Qualidade do Produto é uma estrutura de procedimentos e técnicas usados para desenvolver produtos na indústria, particularmente na indústria automotiva. É semelhante ao conceito de *Design for Six Sigma* (DFSS).

¹⁴ PPAP (Production Part Approval Process) ou Processo de Aprovação de Peças de Produção é um processo padronizado nas indústrias automotiva e aeroespacial que ajuda fabricantes e fornecedores a comunicar e aprovar projetos e processos de produção antes, durante e após a fabricação.

¹⁵ MASP (Método de Análise e Soluções de Problemas) – trata-se de uma metodologia do campo da gestão de qualidade, que visa à identificação e a resolução dos problemas (não conformidades).

metas financeiras foram geridas para reduzir o impacto sobre os resultados operacionais da Empresa, entre outros.

Uma medida de gestão extremamente benéfica para a melhoria dos processos na Empresa foi a concepção do Custo da Não-Qualidade, diluído entre todos os seus departamentos, contabilizando a parcela de cada um nos custos operacionais, favorecendo a gestão comercial dos itens produzidos.

Todos os resultados passaram a ser demonstrados mensalmente para toda equipe de Gestão e Alta Administração da Organização.

Coligada as metas da qualidade, foi incorporada neste grupo a área de Engenharia da Segurança do Trabalho, que tanto funcionava com o olhar no ser humano, como também aplicava melhorias técnicas sobre o projeto e equipamento.

A partir das não-conformidades, várias análises quantitativas foram executadas a fim de priorizar os problemas e impor critérios para orientar o trabalho dos diversos grupos.

Os contratos passaram a ser administrados pela figura do Gerente de Contratos, que fazia interface junto ao cliente final e áreas técnico-comerciais da Empresa.

Outra mudança significativa no quadro de gestão foi a integração da área da qualidade com os parques eólicos, pois permitiu a retroalimentação de informações valiosas para todo o processo produtivo a fim de prover a solução de problemas de campo já internamente à fábrica. Este processo foi estendido às áreas logísticas e de transporte, pois procedimentos, instruções de trabalho, armazenamento e trabalhos de movimentação foram elaborados com o intuito de padronizar os processos, treinar seus colaboradores e controlar as atividades tendo tais documentos como base.

Toda a cadeia de fornecedores passou a ser auditada pela área de Controle da Qualidade e os principais itens inspecionados *in loco* por um representante da Empresa. Os investimentos aplicados foram substituídos principalmente pelo declínio das não-conformidades em campo (informação a ser apresentada posteriormente).

O sistema ERP passou a ser o núcleo de trabalho para o *Supply Chain* através de um projeto KAIZEN¹⁶ denominado SAP 100%. O trabalho aqui foi exterminar todas as planilhas de controle paralelas e disponibilizar no Sistema as informações e registros das operações da Empresa. Um ganho importante foi estruturar as listas dos itens, subdivididos neste momento em “sets”, e, propiciando melhor controle de compra, quantidade e *leadtime*, dos itens atendendo a produção no momento certo.

4.2.1.2 Os Parques Eólicos

Foram realizadas auditorias em 2 locais distintos, abordando em cada ponto aspectos e características diversos; no *site*, em entrevista não estruturada com a Alta Administração, os parâmetros críticos foram levantados e, em relação a tais parâmetros, foi efetuada uma minuciosa análise crítica do projeto, descrita *a posteriori*.

Em relação a análise dos parâmetros observados pelo Gestor de O&M do site, todos os aerogeradores que retornaram para avaliação foram analisados no mínimo visualmente para a procura da existência de particulados, sais e água no estado líquido.

Entre os efeitos detectados, foi encontrada quantidade significativa, de 2 a 3 litros, de água acumulada na região inferior do estator. Em relação às partículas, elas estavam dispersas por toda a região das conexões entre as bobinas impregnadas e partes de fixação do gerador. As partículas variavam de coloração desde branco até amarronzado, com as brancas solúveis em água indicando a salinidade deste grupo.

A existência de sais foi verificada observando-se a dissolução ou não das partículas em água destilada. Qualquer indício da presença de qualquer um desses aspectos foi devidamente registrado por fotografia¹⁷.

Portanto, neste último caso a ferramenta utilizada foi a observação direta e verificou-se a relevância dos ímãs, bobinas e aspectos construtivos de projeto para a falha do produto. O ímã era a etapa mais crítica do processo de remanufatura devido ao largo prazo de reposição de material, cerca de 6 meses, além de impacto financeiro apreciável. Desse modo, criou-se uma proposta de otimização que se baseou em 2 ações distintas: *workshop* dos ímãs permanentes e o estudo de confiabilidade do produto, descritos a seguir.

¹⁶ KAIZEN é uma ferramenta da Gestão da Qualidade provinda da cultura japonesa que tem por significado a melhoria contínua dos processos em geral.

¹⁷ Fotos não mostradas por questão de confidencialidade.

4.2.1.3 Ações de melhorias

Dos levantamentos e auditorias aplicados, tanto nos parques eólicos como na fábrica, e consequentemente nos principais fornecedores, chegou-se a conclusão da falta de informações decorrentes em um dos principais componentes e suas falhas, isto é, os ímãs permanentes e seu desprendimento da parede do rotor.

Mediante este cenário, foi proposto para área de Controle da Qualidade e assim aceito a realização de um *workshop* com os principais *players* deste tema – fornecedores, engenharia do produto, engenharia de processos, administradores de contrato, laboratórios de ensaio, instituições educacionais e demais áreas da Empresa, para juntos discutir a tecnologia aplicada aos ímãs, seu uso e aplicação para garantir a qualidade deste componente.

De acordo com Feng et al. (2018), a decisão aplicada ao ímã permanente deve-se, além da quantidade de falhas, a um fator econômico bastante importante – seu *leadtime* de obtenção beirava os 180 dias e o valor de mercado deste item, por conta exclusiva da exploração deste metal, praticamente pela China (atribui-se aqui a desistência dos demais países na obtenção e manufatura deste componente), cresceu assustadoramente, praticamente inviabilizando a possibilidade de falha do item, além de aumentar, por conseguinte o custo de fabricação do gerador eólico, ora não previsto nos contratos firmados.

O *workshop* foi realizado e preparado de forma a discutir quais as principais razões que levavam os ímãs a se desprenderem da parede do rotor e por consequência gerar um destruidor curto circuito que acarretava em grandes perdas tanto para o fabricante de geradores, como também para o cliente; sem contar o impacto ambiental e custos logísticos provenientes desta ocorrência.

Este evento foi gerenciado pelo Departamento da Engenharia da Qualidade, setor criado após a reestruturação dos processos na Empresa e gestão de Projetos.

A metodologia deste Encontro teve como base as Ferramentas Clássicas da Qualidade (lista de verificação, diagrama de Pareto, diagrama de Ishikawa, gráfico de controle a partir do histograma gerado); cada grupo convidado – fabricante dos ímãs, fábrica de geradores e seus departamentos técnico-comerciais, instituições acadêmicas e laboratórios

credenciados (Universidade de Pittsburg, EUA, e, USP), a partir do tema trouxe seus estudos, informações e resultados obtidos para ali no *workshop* levarem suas avaliações preliminares.

Um resultado importante obtido (Figura 4.2) foi a determinação das principais condições que podem levar à corrosão dos imãs, e, obviamente, seu descolamento e inoperância. Isto se deve, principalmente, ao modo de posicionamento do imã no aerogerador, pois dependia do uso de uma pequena quantidade de resina e da pouca resistência do imã às condições ambientais, como por exemplo, umidade e aquecimento, além de problemas de cobertura das peças. As soluções propostas são bastante semelhantes às aquelas encontradas nos processos de microeletrônica: uso de salas limpas, melhoria no processo de cobertura (*coating*) com o uso da tecnologia de vácuo, mudança no filme fino protetor e sua espessura e etc.

As discussões técnicas levaram a uma série de proposições às quais foram conduzidas através de ferramentas de investigação, i.e. 5 Porquês (“5 Why’s Method”) (ver Figura 4.3); através destas técnicas foi possível estabelecer prioridades sobre os processos críticos e os locais onde estes ocorrem.

Assim o produto deste trabalho gerou um plano de ação (via PDCA); contudo, como as soluções encontradas, apesar de factíveis, tinham níveis de dificuldade diversos, a aplicação destas foram divididas em três planos de ação de curto, médio e longo prazo (figuras 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente). Deste modo, o uso de sistema de vácuo foi mantido para longo prazo – já que implicava em certificação de resinas e compra de equipamento – enquanto o aumento das espessuras (resina de cobertura e de colagem do imã) foi de aplicação imediata. A procura de outras resinas, que pudessem funcionar como segunda camada de proteção também apresentou problema semelhante ao enfrentado nos processos de microeletrônica: o caráter hidrofílico de várias resinas, o que facilita a adsorção de água e é obviamente deletério para os dispositivos.

Por fim, é importante salientar que uma análise de processo com a abordagem macroscópica da questão foi capaz de revelar problemas em outros níveis, incluindo aí o microscópico, com a questão de tratamento de superfícies, tornando-se premente.

Figura 4.2 – Exemplificação do Diagrama de Ishikawa aplicado no *Workshop*

Fonte: O Autor

A questão de fundo abordada pelos 6 grupos é de superfície; assim o fornecedor do ímã tratou de modificar a superfície, mas isso é um trabalho de longo prazo, assim como outros processos subsequentes (tais como, cobertura). Por outro lado, os processos da Empresa, se abordados como problema de superfície, podem diminuir a corrosão a curto prazo, como será apresentado no final deste capítulo.

Figura 4.3 – Exemplificação de aplicação da ferramenta de investigação – “5 Why’s”

5 Porquês

Problema 1

Por que?	Razão	O que fazer?
Processo de colagem dos ímas pela IMPSA podem apresentar bolhas na resina.	Fatores humanos no processo da mistura e inserção	1 - Estudar e aplicar um novo processo de aplicação à vácuo 2 - Procurar por outro tipo de resina
Fatores humanos no processo da mistura e inserção		
0		
0		
0		

Problema 2

Por que?	Razão	O que fazer?
O transporte da resina pode estar chegando em uma condição de ambiente inadequada causando oxidação nos tanques de resina	Não há nenhuma recomendação para assegurar a transportação	Assegurar a transportação da resina em um ambiente controlado
Não há nenhuma recomendação para assegurar a transportação		
0		
0		
0		

Fonte: O Autor

Quadro 4.4 – *Workshop* Ímãs Permanentes, plano de ação de curto prazo

Item	Detalhado	Quem	Data	Limitações
Criar um processo pós moldagem com a nova resina	1. Solicitar à Vensys o procedimento 2. Realizar testes no WPE	1. Vladimir 2. Adêvid	1. 17-oct-2011 2. 21-oct-2011	1. Depende da resposta da Vensys 2. Adequar o molde
Implementar os aquecedores especificados pela Vensys	1. Realizar testes no WPE 2. Comprar 11 aquecedores 3. Modificar a planilha	1. Adêvid 2. Adêvid 3. Vladimir	1. 20-oct-2011 2. 25-oct-2011 3. 26-oct-2011	2. 60 dias para a entrega
Implementar ferramentas especificadas pela Vensys para concertar o GRP	1. Solicitar amostra à Vensys 2. Desenhar ferramenta 3. Fazer a ferramenta	1. Vladimir 2. Vladimir 3. Adêvid	1. 17-oct-2011 2. 21-oct-2011 3. 25-oct-2011	1. Tempo de entrega da Vensys
Estudar outro tipo de produto para limpar o polo	1. Especificar um novo produto 2. Enviar especificações técnicas à Vensys 3. Compra o novo produto	1. Gabriela 2. Vladimir 3. Gabriela	1. 28-oct-2011 2. 03-nov-2011 3. 07-oct-2011	1. Procurar produto feito no Brasil 3. Tempo de entrega
Estudar outro jeito de de concertar o GRP	Realizar testes com vácuo	Adêvid	30-oct-2011	GRP pode não funcionar com vácuo
Definir um outro tipo de revestimento para os ímãs	Enviar amostras à AMC 1. 18 como recebido 2.2(Ni-Cu + EP + PU) e (EP + PU)	Gabriela	1. 17-oct-2011 2. 31-oct-2011	Transporte aos EUA
Estudar um processo diferente para inserir ímãs cobertos	1. Definir cobertura 2. Realizar testes com GRP, PTFE e Mylar 3. Solicitar procedimento para inserir os ímãs	1. AMC 2. Vladimir 3. Vladimir	1. Nov-2011 2. 21-oct-2011 3. Nov-2011	2. Se o PTFE não suportar será necessário comprar mylar 3. Após definido o revestimento
Estudar a cobertura de tinta final sobre o GRP	1. Definir pintura 2. Modificar processo	1. AMC 2. Vladimir	1. Nov-2011 2. Dec-2011	Comprar o material pode ser um processo crítico
Implementar um novo selamento para o gerador	Enviar/Submeter desenhos para a aprovação da Vensys	Poroca	21-oct-2011	
Aumentar o número de furos no reforço – 6-24	Enviar os cálculos à Vensys para aprovação	Poroca	21-oct-2011	

Fonte: O Autor

Quadro 4.5 – *Workshop* Ímãs Permanentes, plano de ação de médio prazo

Item	Detalhado	Quem	Data	Limitações
Desenvolver outro tipo de resina	1. Solicitar resina à Henkel 2. Solicitar à Vensys pela realização de testes 3. Realizar testes	1. Appiolaza 2. Appiolaza 3. IPT/AEPI	2011-10-21	2. A Vensys precisa definir os testes para aprovação
Criar um processo pós molde -Nova resina(apenas) -Ambas as resinas(dois estágios)	Após as definições com a nova resina			
Isolamento da área do rotor	Estudo de custo-benefício para a implementação	Antônio Carlos	2012-01-01	Decisão na direção
Pintura/Material para substituir o GRP	1. Buscar materiais e fornecedores 2. Realizar testes 3. Definir opção	AMC	2012-03-01	

Fonte: O Autor

Quadro 4.6 – *Workshop* Ímãs Permanentes, plano de ação de longo prazo

Item	Detalhado	Quem	Data	Limitações
Estudar e implementar um novo processo para aplicar vaco durante a mistura e inserção de resina.	1. Solicitar à Vensys os resultados dos testes 2. Comprar material 3. Planilha	1. Vladimir 2. Depende dos resultados	2011-11	
Estudar a possibilidade da fixação de ímãs ser feita por parafusos	Vensys informou que não haverá modificação do desenho			Qualquer modificação resulta em perda da licença
Solicitar à Bakker por amostras com cobalto na composição dos ímãs e realizar testes (observar custos)	1. Desenvolver/Especificar novos ímãs 2. Bekker precisa desenvolver a possibilidade de confeccionar os novos ímãs e definir a data de entrega 3. Coordenar a resposta e receber a resposta	1. AMC 2. Bakker 3. AMC	1. Mar – 2012 2. Mar-2012 3. 21-out-2012	
Realizar testes para confirmar que a eficiência do sistema de refrigeração será mantida	Monitorar a temperatura dos geradores com o novo selante	O&M		

Fonte: O Autor

4.2.1.4 Considerações sobre as Ações de melhorias

Devido às propostas tecnológicas aplicadas aos ímãs e as descobertas obtidas no site e nas inspeções visuais efetuadas nos geradores instalados, como comentado anteriormente, ficou clara a necessidade de mudanças gerenciais na Empresa. Entre as mudanças, o controle estrito de modificações em equipamentos sob remanufatura e/ou em construção, facilitou a compreensão dos fenômenos e propiciou a retomada das mudanças (melhoria contínua) pela nova aplicação do PDCA. Assim, à medida que o diagrama de Pareto fornecia informações para todas as áreas da Empresa, uma mudança importante na gestão foi a implantação de controle de qualidade elétrico, mecânico e químico em vários pontos do processo de montagem dos equipamentos.

Igualmente importante foi a reavaliação do projeto, uma vez que a inspeção visual indicou a existência de água na fase líquida (Figura 4.4) internamente e em várias regiões do aerogerador. Obviamente que a existência de água pode ocasionar um curto circuito, mas, mais importante, devido às altas temperaturas que o equipamento pode se encontrar, especialmente no nordeste do país, a evaporação desta água pode gerar problemas nas áreas mais improváveis.

Figura 4.4 – (a) Desenho do estator indicando a região que é mais afetada com o acúmulo de água e (b) Foto do equipamento no ponto especificado

Fonte: O Autor

De modo geral, as seguintes ações foram efetuadas:

- Modificação do percurso de drenagem da água para fora da máquina;
- Adição de 06 escapes de água no cabeçote de reforço;
- Cobertura dos ímãs com resina mais espessa para evitar a oxidação e desprendimento do rotor;
- Inserção do anel de silicone para proteção das ranhuras (parte das bobinas), tanto de presença de água como de umidade.

4.2.2 Ciclo do PDCA: segunda iteração

Como as turbinas eólicas fabricadas, e aquelas já em operação, continuaram a apresentar graves problemas causando frequentes paradas e curtos-circuitos, os levantamentos quantitativos aplicados, seguidos de auditorias nos processos de fábrica e acompanhamento da performance em campo foram refeitos e obrigou o time técnico a repensar o modo como avaliar as causas e propor soluções eficazes. Assim um novo fluxo baseado no PDCA foi aplicado, como especificado na Figura 4.5. Observe-se que este PDCA foi modificado em

suas etapas, sendo a rastreabilidade (“traceability”) um importante início no processo, uma vez que as mudanças gerenciais anteriormente efetuadas já permitiram melhor controle sobre modificações pontuais no projeto do aerogerador (controle de água na fase líquida), no processo (pelo aumento da espessura do *coating* sobre os imãs), materiais (uma segunda resina foi encontrada para melhorar o *coating*) etc. esta rastreabilidade é reflexo da implantação de controle de qualidade elétrico, mecânico e químico em vários pontos do processo de montagem dos equipamentos, conforme Quadro 4.7 exemplifica.

Assim, uma vez compiladas as informações necessárias e após coleta de dados pelas equipes técnico-operacionais, foi elaborado e montado o banco de dados para a composição da rastreabilidade a partir das ocorrências detectadas e registradas. Esta informação de rastreabilidade teve como base o projeto do produto, materiais e componentes em geral.

As características operacionais medidas para composição da análise foram extraídas com o auxílio de equipamento de monitoramento, são elas: horas trabalhadas, energia gerada, isolamento elétrico; dados ambientais, tais como: precipitação e intensidade de elementos iônicos e polares, além dos dados de localização, foram também levantados, uma vez que combinados são úteis para medir o desempenho.

Quadro 4.7 – Fluxo de controle da qualidade mecânico, elétrico e químico na produção de geradores eólicos

Fonte: O Autor*

*A Empresa não permitiu a disponibilidade dos detalhes de cada processo devido a confidencialidade das informações.

Figura 4.5 – PDCA modificado adaptado para *roadmap* aplicado à energia eólica

Fonte: O Autor

Após a compilação e organização das informações extraídas, utilizou-se o Diagrama de Afinidades com Matriz em 'L' para a composição da análise estatística. O resultado deste estudo gerou vários pontos de melhoria, uma vez que os problemas de tempo foram

identificados e trabalhados através da análise da causa raiz; ocorrências não totalmente conhecidas puderam ser previstas à custa de falhas e problemas gerados.

Com isso, foi possível utilizar o ciclo operacional acima proposto e construir toda a análise com base em estudos de confiabilidade.

As ferramentas usadas para processar ambas as compilações, desde a revisão do processo de manufatura até a etapa de operação das turbinas (comissionamento) é detalhado no próximo item de desenvolvimento e análise destes resultados.

4.2.3 Desenvolvimento e análise dos resultados do PDCA

A partir deste ponto, como desenvolvimento deste estudo serão apresentados os efeitos obtidos através do emprego das ferramentas da qualidade utilizadas tanto para descrever o processo de investigação como também a aplicabilidade do método e seus impactos.

4.2.3.1 Folha de verificação e tabela de contagem (TOLEDO et al., 2013)

A Figura 4.6 apresenta um exemplo de folha de verificação utilizado para registrar e recolher os dados de forma rápida e simples; este modelo facilitou o uso em etapas posteriores a este levantamento.

Figura 4.6 – Folha de dados utilizada para o preenchimento de geradores de dados técnicos

Sistema de Controle Qualidade		FORMULÁRIO A2 ACOMPANHAMENTO DOS GERADORES				Data: 20/05/2012 Rev: 00 Reparado: Aprovado: LBA					
1 - DADOS:											
Nº de série do Gerador (OP)		Parque		Recebimento							
Nº do Aerogerador		Central eólica		Comissionamento							
2 - REGISTRO DE CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E OPERAÇÕES:											
Clima / Operação											
Temperatura Ambiente (°C)		Umidade Relativa do Ar (%)		Horas Trabalhadas Gerador		Energia Acumulada Gerador (MWh)					
Condições Climáticas											
3 - INSPEÇÃO VISUAL											
Existe		Item	Intensidade	Local (anexar foto)							
S	N										
		Sinais de Carbonização									
		Pó de Ímã									
		Oxidação									
		Ruídos Anormais									
		Água									
Observações:											
4 - MEDIÇÕES:											
Temperatura / Corrente / Tensão											
Fases	Temp.	Fases	Corrente	Fases	Tensão						
Fase 01		U1		U1 - V1							
Fase 02		V1		U1 - W1							
Fase 03		W1		V1 - W1							
Fase 04											
Fase 05											
Fase 06											
Resistência de Isolamento (MΩ):											
Temp. (°C)		Um (%)		Condições Climáticas:							
Sistema		Tensão (V):				RI (MΩ) referido à 40°C					
		250	1000								
		1'	30'	1'	10'	Cap. (µF)	30'	1'	10'	DAÍ	IP
S1	Massa										
S2	Massa										
S1	S2										
Instrumento utilizado:				Data da última calibração:							
5 - DIÁRIO DE BORDO:											
<div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>											
Inspeção:				Data:				20/05/2013			

Fonte: O Autor

A coleta das informações foi dividida em 4 grupos para facilitar a compreensão e manipulação das informações; a escolha da divisão nestes 4 pontos advém do reconhecimento da importância dos parâmetros elétrico, mecânico e químico, além das condições ambientais, como anteriormente mencionado:

- (1) dados do gerador e localização,

Além dos 4 M's (dimensões clássicas do Ishikawa: matéria-prima, mão-de-obra, método, máquina), foram atribuídas as dimensões que relacionam os materiais com o processo produtivo, sua obtenção e aplicação, tais como: fabricação, fornecedor, controle de qualidade e parques. Os itens máquina (com efeito para manutenção) e materiais (foco em não-conformidades) foram mantidos. A modificação no Diagrama é consistente também com o proposto no PDCA modificado, uma vez que permite uma análise mais detalhada da performance. A principal informação que o Diagrama forneceu foi mostrar as correlações das diversas causas, o que também é consistente com a folha de dados mostrada na Figura 4.6.

4.2.3.3 Diagrama de Afinidades

O diagrama de afinidades (Figura 4.8) foi composto por uma representação gráfica dos grupos de dados e informações que possuíam entre si alguma relação natural pelos entre as diferentes montagens de geradores, conforme a evolução do processo de fabricação dos mesmos; para tanto, como resultado, cada aerogerador ganhou uma classificação de configuração e por esta foram nomeados também em termos construtivos, gerando assim as gerações e famílias a partir da construção dos geradores eólicos¹⁸. Portanto, a Figura 4.8 traz a evolução das configurações dos geradores a partir dos modelos construtivos dos estatores, recebendo denominações de A a Y, seguida dos modelos construtivos dos rotores, recebendo a numeração de 1 a 6, acompanhada de 4 tipos de cabeçotes, recebendo portanto a numeração de 1 a 4 adicionando a letra O para observações intrínsecas ao modelo proposto, ou seja, conforme observa-se no último campo da tabela, o detalhe da denominação dos geradores, como exemplo AA10-O.

¹⁸As informações foram aplicadas através da coleta de dados dispersos ou grupos de dados organizados, todavia confusos devido à grande variedade de aspectos e natureza diversa entre si.

Figura 4.8 – Diagrama de Afinidades aplicado para combinar as várias combinações de geradores

Tipo Estator	
A	Bobinas Sem Esmalte/Imprregnação Roll Dip/Verniz Vermelho
B	Bobinas Sem Esmalte/Imprregnação Roll Dip/Verniz Vermelho/Gotejamento
C	Bobinas Sem Esmalte/Imprregnação Roll Dip/Verniz Vermelho/Gotejamento e Silicone
D	Bobina sem Esmalte/Imprregnação Roll Dip/Gotejamento/Silicone e Pintura Off-Shore
E	Imprregnação Roll Dip/Gotejamento/Silicone e Pintura Off-Shore/Bobina com Esmalte
F	Silicone/Pintura Off-Shore/Bobina com Esmalte/ Solo de Vedação/Imprregnação VPI
G	Silicone/Pintura Off-Shore/Bobina com Esmalte/ Solo de Vedação/Imprregnação VPI/Cabo de força Imprregnado/VPI
H	Silicone/Pintura Off-Shore/Bobina com Esmalte/ Solo de Vedação/Imprregnação VPI/Cabo de força Imprregnado/VPI/Encapsulamento do anel com silicone
I	Silicone/Pintura Off-Shore/Bobina com Esmalte/ Solo de Vedação/Imprregnação VPI/Cabo de força Imprregnado/VPI/03 voltas de mica com substrato de poliéster nos anéis-Melhoria nas interconexões
Y	Estator Recuperado
Tipo Rotor	
1	Ímã Neodímio, Resina Curada em Temperatura Ambiente
2	Ímã Neodímio, Tubo entre os Pólos e Resina Curada em Temperatura Ambiente
3	Ímã Neodímio, Tubo entre os Pólos e Resina Curada com Resistência e Pós Molding (OMP)
4	Tubo entre os Pólos, Resina Curada com Resistência, Pós-molding (OMP), Ímã Neodímio "niquelados" (Ni-Co)
5	Ímã Neodímio, Resina Curada com Resistência, Escudo OMP
6	Resina Curada com Resistência, Escudo OMP, Ímã Neodímio "niquelados" (Ni-Co)
Tipo Cabeçote	
1	Com 8 furos (Circular)
2	Com 12 furos (Circular)
3	Com 24 furos (Oblongo)
4	Com 08 escape de Água
Caracteres	Descrição das Legendas (ex. do tipo AA11)
1. ^o (A)	Novo ou Recuperado
2. ^o (A)	Tipo do estator
3. ^o (1)	Tipo do rotor
4. ^o (1)	Tipo do cabeçote
5. ^o (O)	Observações
AA11D = Novo (A), Tipo do estator (A), tipo do rotor (1), tipo do cabeçote (1), Observações (O)	
Y - Estator recuperado;	

Fonte: O Autor*

*A Empresa não permitiu a disponibilidade dos detalhes de cada processo devido a confidencialidade das informações.

Na Figura 4.9 mostra-se, a título de exemplo, são observadas as informações de modo pictórico. Nesse exemplo, embora a configuração EE11 tenha obtido uma taxa de sobrevivência 50% maior que a configuração DD11¹⁹ e é possível intuir (a totalidade dos dados encontra-se em planilhas como as apresentadas na Figura 4.8) que as falhas continuam se concentrando nos anéis.

¹⁹ Não é possível divulgar maiores informações por razões de confidencialidade da Empresa.

Figura 4.9 – Quantitativo de falhas por configuração de geradores

Fonte: O Autor

4.2.3.4 Diagrama Matricial

O diagrama matricial tipo matriz em 'L' correlaciona dois grupos de itens ou variáveis que são apresentados como linha e coluna. Neste caso, conforme apresentado na Figura 4.10, tem-se a visualização dos principais tipos de falhas por modelo de configuração do aerogerador, numa sequência temporal de fabricação. Nesta matriz foi possível observar que para as primeiras configurações, os principais efeitos ocorriam na ranhura dos anéis devido ao problema de isolamento; à medida que melhorias foram implementadas para solucionar este problema, questões de superfície em relação à proteção dos ímãs tornaram-se evidentes.

Tipo de Gerador	Curto Circuito na renhura problema elétrico	Curto Circuito na renhura falha mecânica	Curto Externo (anêlia)
AA11	X		
DD11		X	
AA11		X	
BB12			X
DD11			X
AA11	X		
BB11	X		
VD11			X
AA11		X	
BB11			X
VD11		X	
VD11		X	
AA11	X		
VD11			X
AA11		X	
AA11		X	
DD11			X
AA11	X		
BB12			X
VD11		X	
AA11	X		
VD11		X	
VD11			X
AA11		X	
VD11		X	
VD22		X	
AA11	X		
AA11		X	
BB11	X		
AA11		X	
BB22			X
BB22			X
AA11	X		
AA11			X
PP33			X
AA11		X	
VD11	X		
BB11			X
AA11	X		
BB11			X
VD22			X
DD11		X	
AA11	X		

*A Empresa não permitiu a disponibilidade dos detalhes de cada processo devido a confidencialidade das informações.

²⁰ Entre as ferramentas possíveis, aqui se utilizou o SWOT para levantar os pontos fortes e fracos e construir as melhorias.

4.2.3.5 Consequências imediatas do PDCA: *mock ups*

A partir do emprego de algumas ferramentas da qualidade²¹, como será observado ao longo deste texto, foi possível criar um método para análise de confiabilidade de geradores fabricados em sequência, como apresentado neste item. A partir deste preceito, algumas condições para os problemas foram determinadas, e, por conseguinte os pontos a serem coletados e analisados nos geradores síncronos especiais foram levantados e compilados. Além disso, sobressaem como resultado do aperfeiçoamento da configuração aplicada, a própria evolução de configuração utilizado como exemplo, da DD11 para a configuração EE11, ratificando, portanto, a tecnologia aplicada através das melhorias, anulando as possíveis causas geradoras de falhas da versão anterior. Desta forma, verificou-se que a aplicação de estudos técnicos a partir de uma metodologia estatística baseada na confiabilidade, pôde gerar resultados significativos.

Os levantamentos e estudos realizados também indicaram a necessidade de um melhor controle dos parâmetros de processo, o que pode ser atendido através da aplicação de *mock up*. O *mock up* foi proposto com o objetivo de identificar o problema de isolação nas bobinas e permitir sua correção. Contudo, ele é ineficiente se não considerar o envelhecimento dos componentes que ele teste. Para tanto, foi proposto um forno para teste de vida em ambiente agressivo. O tempo médio entre análise e decisão foi de 30 dias, ou seja, não impactou a aplicação do PDCA (para maiores detalhes, ver informações no Capítulo 3).

Nos parques eólicos que fazem parte deste estudo de caso, contudo, continuou sendo detectado um desligamento total de alguns dos geradores após recente montagem (menos de 2 anos de uso). Mesmo a olho nu, foi possível observar que o desligamento ou parada ocorreu devido aos curtos-circuitos, como exemplificado na Figura 4.11.a, principalmente aqueles que aconteceram próximos aos anéis das bobinas, ocorrendo com maior incidência em determinadas regiões desse dispositivo (Figura 4.11.b, para avaliar dimensões ver dispositivo completo na Figura 4.11c) – maioria dos casos. A existência de curto circuito pode ser inferida na Figura 4.11.a pela mancha escura devido à carbonização do material isolador das bobinas. Estatisticamente, de acordo com DUARTE (2007), as falhas nos

²¹ Entre elas, o SWOT.

estatores síncronos da máquina ocorrem principalmente devido ao colapso do isolamento interno das bobinas, e correspondem a aproximadamente 63% das falhas na área de enrolamento (ver Figura 4.12). Do mesmo modo esta conclusão foi detectada nesta pesquisa. A solução proposta por Duarte (2007) para o controle dessas falhas é a aplicação de modelos e uso de redes neurais e lógica Fuzzy. Contudo, o principal problema é que essas ocorrências se devem ao processo de fabricação e não foram detectadas neste, ou seja, o modelo de Duarte (2007) é mais indicado para equipamentos que estão em uso há longo tempo. Nesse cenário, torna-se obrigatória uma nova auditoria para determinar os principais fatores que causaram tais avarias e ações preventivas em relação ao novo equipamento. Pesquisa bibliográfica, apresentada no item Materiais e Métodos, apresentou a vantagem do uso de *mock up* para análise de problema desse tipo, principalmente porque as dimensões do dispositivo serão respeitadas (escala 1:1). Esta foi a principal razão que levou à sugestão, aceita pela empresa, da construção de *mock-up* para avaliar o processo de fabricação.

Figura 4.11 – (a) Imagem do curto-circuito da ranhura do anel (b) Regiões de maior incidência de curto-circuito no estator e (c) Estatores em construção

(a)

Fonte: O Autor

Figura 4.12 – Estatísticas de falhas pagas pela Allianz, Companhia de Seguros - [período de 1996 a 1999]

Fonte: Adaptado de DUARTE (2007, p. 15)

Após a análise dessas condições, foram definidas as etapas de construção, como apresentado no item Materiais e Métodos e o *mock up* construído. Este equipamento representa uma parte do enrolado, teve como propósito a simulação do isolamento da ranhura no estator e foi construído para equivaler a 3% da área total deste estator. Assim, 12 bobinas foram suficientes para permitir medições de isolamento e a Figura 4.13, com duas vistas distintas, permite avaliar a dimensão do equipamento e de todo o estator. Sua configuração é formada por um núcleo, folhas de estator de grãos não orientados de aço de silício, bobinas, material compósito para cobre eletrolítico com 99,99% de pureza, revestido com verniz isolante (ver detalhe 1, Figuras 4.14.a e b, vale ressaltar que trata-se

da área crítica da bobina), e isolam, camadas sobrepostas de mica e poliéster, cercado por folhas de *nomex*®, um produto Du Pont Co. Em resumo, os componentes que formam o *mock up* são: estrutura de suporte para montagem das bobinas, as bobinas propriamente ditas distribuídas em 2 conjuntos formado de 12 pares para cada lado, e por fim, o enrolamento formando os anéis. As bobinas são montadas lado-a-lado, protegidas cada uma pela camada de isolante tipo mica entre si. Ressalte-se que o *mock up* é totalmente funcional e é semelhante ao equipamento comercial. É importante observar que a construção de equipamentos desse tipo exige uma equipe multidisciplinar, especialmente para a definição do projeto de experimentos, o que favorece o uso do PMI.

Figura 4.13 Em duas vistas distintas: (a), (c) – *Mock up*, com detalhe da região de análise e (b), (d) – Visão global do estator

Fonte: O Autor

Figura 4.14 Bobina: Vista (a) frontal e (b) lateral

Fonte: O Autor

Os testes utilizando o *mock up* de bobinas foi processado com o controle de tensão e corrente efetuado pelo equipamento HIPOT® e as falhas obtidas foram registradas numa Matriz de estrutura e um exemplo é mostrado na Tabela 4.1. Esta matriz, que também considera a importância do aquecimento para cura das resinas e/ou testes ambientais, foi construída a partir da análise de partes e peças relevantes do gerador e sua correlação e impacto com as funções elétricas, mecânicas e químicas, divididas em 3 grupos: 1 – componentes relevantes (cobre, fita isolante, bobina e resina), 2 – estrutura e conexões e 3 – enrolamentos do estator, verniz e fita tipo nomex® (isolante). Os pontos positivos foram contabilizados como soma +1, os negativos como subtração -1 e os neutros como 0 relacionamento.

Vale ressaltar que nesta etapa de análise dos resultados fica evidenciado problemas de produção, ou seja, aspectos tecnológicos, como a oxidação provavelmente provocada por arranhões e outras questões de processo. A matriz, ainda, reforça esta questão mostrando um alto grau de dependência com características químicas de peças e peças em tal dispositivo. Isto é consistente com a importância do emaranhamento, muitas vezes apontado na literatura, mas nunca descrito com modelos operacionais, como foi feito nesta etapa.

Assim, se for desenvolvido um estudo criterioso e multidisciplinar utilizando *mock up* pode-se determinar mais rápida e melhor as principais desvantagens de um processo,

permitindo que a inovação incremental se mantenha durante as manutenções. Além disso, inovações serão igualmente testadas, devido à funcionalidade do equipamento.

Por outro lado, para P&D, provavelmente o *mock up* não precisa ser totalmente funcional, ou mesmo as dimensões não precisam ser mantidas em escala 1:1 e, neste caso o uso de protótipos seria aconselhável. Este fato provavelmente explica o porquê do laboratório de pesquisa da empresa, que possui protótipos, não notou muitas das questões evidenciadas com o *mock up*. Esse fato assemelha-se às questões do escalamento na microeletrônica para a diminuição dos dispositivos. Variações na dimensão implicam em variações não lineares em corrente, potência e etc., que provavelmente não foram averiguadas nos protótipos do P&D da empresa.

Tabela 4.1 – Matriz de estrutura de subsistência para maquetes, com base no modelo de FADEL (2008)

	Grupos	Partes & Peças											
		1				2		3					
		Cobre	Fita	Bobina	Resina	Estrutura	Aneis (ranhura)	Enrolamentos do Estator	Verniz	Nomex			
Funções	Elétrico	+	+	+	::	::	::	+	::	::	44.4	55.6	0.0
	Mecânico	+	::	::	::	+	+	+	::	::	44.4	55.6	0.0
	Químico	::	+	::	+	-	-	-	+	+	44.4	22.2	33.3
	Σ(+)	2	2	1	1	1	1	2	1	1			
	Σ(=)	1	1	2	2	1	1	0	2	2			
	Σ(-)	0	0	0	0	1	1	1	0	0			

Fonte: O Autor

Quanto ao segundo equipamento, o forno para testes ambientais, este também pode ser usado para simular condições ambientais adversas para o estator, o que exigiu, como comentado em Materiais e Métodos, uma maior dimensão para esse instrumento. O aquecimento do estator, contudo, não evidenciou variação na taxa de falhas, portanto, o principal problema nas bobinas deve ser de processo, não de envelhecimento (*aging* acelerado por aquecimento).

O forno também foi utilizado para desenvolvimento e certificação de novas resinas para proteção dos imãs. O uso de resinas para a impermeabilização implica na necessidade de um equipamento de aquecimento, para que tais resinas sejam curadas e, como consequência do uso desses *mock ups* foi proposto substituir o verniz de acabamento com

base *epoxi* por verniz com base de silicone ou PU²², mas verificou-se a necessidade de aplicar tal verniz de acabamento da isolasil®, porque ele é hidrofóbico e, portanto, menos sensível à salinidade, nos anéis após pintura de acabamento. Novamente a solução assemelha-se ao modo de avaliar sistemas em processos de microeletrônica. Além disso, essa fase propôs inovação, de acordo com o esperado no mapa de pesquisa, reproduzido parcialmente na Figura 4.15, ao criar duas ferramentas de gestão importantes – PDCA modificado e Matriz de estrutura – e mostrar a importância do uso de *mock ups* na pesquisa de campo, já que aparentemente a P&D em laboratório não é adequada para detectar algumas falhas de produção.

Figura 4.15 – Inovações propostas por essa fase da pesquisa que são aderentes ao mapa da pesquisa

Fonte: O Autor

²² PU – Revestimento de poliuretano

4.2.4 Ciclo do PDCA: terceira iteração

A seguir serão apresentados os principais resultados seguindo a mesma ordem utilizada anteriormente enquanto possíveis consequências e/ou cenários serão apresentados *a posteriori*. Vale ressaltar que a análise *in situ* foi realizada através de auditoria de processo nos dois *sites* (parques eólicos) e de produto no chão de fábrica; é importante ressaltar que, devido às ferramentas desenvolvidas anteriormente, é possível determinar as diferenças construtivas em cada aerogerador avaliado.

4.2.4.1 A abordagem macroscópica

Como mencionado anteriormente, um estudo macroscópico foi realizado previamente e indicou que a água, em fase líquida, acumulada poderia ser evitada por mudanças no projeto. Durante 6 meses ininterruptos, ambos os locais foram monitorados em razão das falhas; neste íterim, uma comparação com os resultados anteriores foi concretizada. A Tabela 4.2 mostra os dados obtidos. Como pode ser visto na tabela, a falha não foi evitada, embora a taxa de falha tenha diminuído significativamente (aproximadamente em média de 30%). Além disso, o local *onshore* (longe da costa) mostra menos ocorrência de falha. Vale a pena notar que a ocorrência de falha é mais acentuada nos meses chuvosos (por exemplo, site n. 1, que está próximo da costa – meses de abril a junho). Assim, a abordagem de melhoria do projeto para evitar água na fase líquida foi apenas parcialmente bem-sucedida.

Tabela 4.2 – Quantidade mensal de falhas por *site*

Site	Month/nr. Failures					
	1	2	3	4	5	6
1	2	2	3	6	7	5
2	1	1	2	3	2	1

Fonte: O Autor

Para melhor compreensão, a Figura 4.16 apresenta os principais resultados, de forma comparativa, para os dois locais pesquisados, a média de horas de trabalho e as principais falhas detectadas depois das mudanças no projeto do gerador, o que evitou a entrada de água na fase líquida dentro do sistema. Nesta figura está claro o predomínio de falhas e

correspondente menor tempo de trabalho no *site* do nordeste (Figura 4.16.c). Usando a ferramenta da qualidade dos ‘5 Porquês’ (5 *Why’s*), foi verificado com o gerente de O&M se esse efeito poderia ser considerado usual (porque no. 1); neste caso a resposta foi positiva. Assim, seguindo o protocolo, verificou-se se isso poderia ser esperado, realmente (porquê n.º 2). O principal motivo apontado foi a presença de água em excesso no local n.1 do Nordeste, uma vez que este *site* fica apenas a 5 km da praia, enquanto o parque eólico do Sul fica aproximadamente 500 km da praia.

Em uma avaliação subsequente, questionou-se o porquê (n.º 3) e como a água pode ser a principal razão de falhas. As respostas afirmaram que *a priori* não somente a água, mas também a presença de sais marinhos leva a fracassos/falhas.

Ao questionar o porquê (n.º 4) dos fatores sal e a água como a única razão para falhas, foi possível chegar a um modelo prático para análise; na verdade, um modelo mecanicista gerador de falhas. É amplamente aceito que o vento em torno da turbina de ar é obviamente mais intenso, e, como consequência, as partículas vão viajar até o canto superior do equipamento. Em caso afirmativo, essas partículas passam a ser as responsáveis no que tange a condução ou espalhamento da contaminação, tal como o material iônico, causador de falhas.

No entanto, até quando os autores sabem, não há estudos científicos visando especificamente essas partículas; contudo, por meio de inspeção visual, foi possível observar uma grande quantidade de partículas na parte superior desses equipamentos.

Por fim, para resolver essa aparente contradição, para cada falha detectada, em nova entrevista não estruturada, os inspetores de O&M foram questionados e indagados sobre a correlação com as principais causas possíveis, divididas em partículas, sal e água. Os principais resultados estão mostrados na Tabela 4.3. A informação mais surpreendente nesta tabela é que os principais mecanismos não se conversam diretamente com partículas ou sal, mas apenas com a água. Esta forte correlação entre a água e a falha é aparentemente reforçada pela inspeção visual durante a manutenção, como já informado, mas, como os mecanismos propostos são sempre macroscópicos, não se consideram outros fatores como percolação, evaporação de água, etc.; no entanto, durante a entrevista não estruturada, a informação de altas temperaturas perto das áreas de falhas foi confirmada, portanto, tais fenômenos precisam ser considerados.

Tabela 4.3: Falhas detectadas, possíveis causas e respectivos mecanismos, de acordo com os Inspetores O&M

Falha	Efeito	Possível causa	Mecanismo proposto
Curto-circuito na região exterior (cabeça das bobinas)	Curto-circuito e queima do estator	Presença de água e sal, evidenciada apenas por inspeção visual	A água gera um caminho preferencial que causa o curto-circuito
Curto-circuito nos anéis	Curto-circuito e queima do estator	Problemas de isolamento, evidenciados apenas por inspeção visual	Defeitos ou o material de isolamento causam o curto-circuito
Sem ocorrências de curto-circuitos	Interrupção do serviço	Desconhecida; adicionalmente, não foi observado nenhum dos possíveis contaminantes (partículas, água, sal)	Os casos são normalmente causados por excesso de aquecimento ou por sistemas de proteção contra curto-circuitos
Curto-circuito nos slots	Curto-circuito	Água condensada e a presença de sujeira	A água gera um caminho preferencial que causa o curto-circuito
Curto-circuito por ímã oxidado	Desprendimento de ímãs e detecção de pó de ímã	Água condensada, evidenciada apenas por inspeção visual	Reação direta da água (forças induzidas por momento magnético ascendente, produzido pelo curto-circuito)

Fonte: O Autor

Figura 4.16 – Quantidade de falhas levantadas nos *sites* pesquisados

Fonte: O Autor

A Figura 4.17 mostra um detalhe da *Nacelle in situ* e as partículas recolhidas perto desta estrutura. Considerando que os parafusos na foto são de diferentes materiais que da câmara onde eles estão ligados, como atesta a coloração verde no local onde o material aderido foi retirado (Figura 4.17.a), a corrosão eletroquímica pode ocorrer na presença de grande quantidade de espécies iônicas. Por sua vez, as partículas coletadas perto dos parafusos não suportam essa ideia (Figura 4.17.b), uma vez que não são sílica ou iônicos²³. Além disso, também é encontrada alguma gota de água nas mesmas partes nesta área, mas em pequena quantidade.

Figura 4.17 – Detalhe da *Nacelle*, conjunto do gerador eólico

Fonte: O Autor

A partir das anomalias detectadas e estudadas e observadas na pesquisa, o modelo mais adequado (porquê n.º 5) seria supor que aquecimento e umidade, além da diferença de materiais usados no equipamento, aceleram o envelhecimento de partes e peças. Muito embora água na fase líquida não tenha sido encontrada nos aerogeradores, a umidade pode ser significativa, devido ao aquecimento local (as pequenas gotas de água observadas podem gerar pontos com alta umidade e favorecer a corrosão).

A partir das evidências coletadas, foi proposto um conjunto de melhorias para evitar a presença de vapor de água em regiões sensíveis do equipamento, sobretudo quanto a vedação do gerador a fim de reduzir o impacto de influências externas sobre o conjunto máquina instalado. Apresenta-se a seguir como este processo foi desenvolvido.

²³ Análise de XRD foi processada por Davinson Mariano da Silva e indicou presença metálica, o que reforça a hipótese de corrosão eletroquímica

Uma análise gráfica dos resultados obtidos nessa fase, num total de 32 máquinas que falharam com curto-circuito nos anéis, é apresentada nos gráficos 4.1 e 4.2. No gráfico 4.1 é possível observar que a nova geração de máquinas (EE 22) também apresenta problemas nos anéis, o que enseja a melhor vedação do equipamento, principalmente o gerador. No gráfico 4.2 a localização do curto circuito em relação às bobinas associadas às falhas; neste gráfico a região entre os limites amarela e vermelho definem a região onde as bobinas são mais afetadas e, das 32 máquinas que apresentaram curto-circuito nos anéis, 56% das falhas estavam localizadas entre as bobinas 230 e 420, que é a localização crítica em relação a formação de vapor de água.

4.2.4.1.1 Vedação do Gerador

Foi identificado que com as turbulências existentes no lado da *Nacelle* e mudanças bruscas das condições climáticas, a fresta entre o cabeçote de reforço e o segundo plano e furos do cabeçote de reforço; o estudo do projeto avaliou que o dimensionamento da isolamento dos anéis era inadequado. Devido a isolamento inadequado do conjunto de fixação dos cabos, a irregularidade do sistema de fixação do olhal, do seu terminal, porca e parafuso, era evidente e apresentava espaços vazios e protuberâncias. Os espaços vazios permitem a geração de descargas parciais degradando o material polimérico aglutinante do sistema de isolamento (resinas epóxi). As protuberâncias além de possibilitar descargas parciais, durante o processo de isolamento danificam a fita de mica.

Outro ponto importante foi a proposição de novo arranjo de montagem dos anéis de ligação de circuitos. A ligação elétrica entre anéis, possivelmente devido à salinidade, permitia o acúmulo de poluentes no papel isolante instalado entre barras (anéis de ligação).

Por conta de auditoria no processo de montagem, em relação à vedação do gerador, outro fator determinante para o problema da isolamento foi detectado: distanciamento irregular entre os anéis e a ligação. Esta questão é tratada posteriormente em maiores detalhes neste trabalho (aspecto mesoscópico). A principal questão, contudo, era visual, porque a distância entre os anéis estava fora do especificado em projeto. O valor mínimo especificado em projeto era de 7 mm, sendo que os valores encontrados foram aproximadamente 4 mm.

Ainda foi detectada a ausência de proteção entre anéis e cabos de força: devido à fragilidade do isolamento dos anéis associado à movimentação do cabo por vibração, teve-se o desgaste da isolação dos anéis por abrasão mecânica e/ou descargas parciais.

Por fim, como melhoria foi proposto alterar a configuração das ligações em série das bobinas. Devido à proximidade e a forma de separação das ligações série das bobinas (feltro e *nomex*®), associado à provável presença de vapor de água, surgem descargas parciais, degradando o material polimérico aglutinante do sistema de isolação (resinas epóxi).

Assim, a análise gráfica, com relação às máquinas com configuração até EEXX, que antecedem as máquinas com tecnologia VPI²⁴ aplicada, temos um total de 32 máquinas que falharam com curto-circuito nos anéis, provavelmente provenientes da entrada de água na máquina (ver Gráfico 4.1). Foi proposto, portanto, reduzir o espaço existente entre o anel de reforço e o segundo plano utilizando silicone neutro ou massa de enchimento. Para aplicá-lo, foi desenvolvido um procedimento denominado de Critérios para Intervenção das Máquinas (ver Gráfico 4.2).

Gráfico 4.1 – Curto-circuito nos anéis por configuração de gerador fabricado

Fonte: O Autor

²⁴ VPI – vem do inglês *vacuum pressure impregnation* que corresponde a um sistema de impregnação por resina utilizando pressão à vácuo.

LOCALIZAÇÃO DO CURTO EM RELAÇÃO A BOBINA

EE12 DD11 EE11 EE12 EE22 AA11 EE22 EE22 EE22 EE22 EE22 EE22

500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0

Localização Bobina
Limite inferior
Limite superior

4.3 O ASPECTO MESOSCÓPICO

Com o objetivo de controlar melhor as causas das falhas, foram realizados novos histogramas sobre os defeitos nesses dois locais nessa fase da pesquisa. Os resultados são apresentados na Figura 4.18. A Figura 4.18.a mostra a média de horas dos geradores analisados nas 2 regiões: Nordeste e Sul enquanto as figuras 4.18.b e 4.18.c mostram a distribuição da quantidade de falhas ocorridas nesses geradores por tipo de ocorrência tanto na região Nordeste, como na região Sul, respectivamente: falha não identificado o curto-circuito, falha por corrosão dos ímãs, curto-circuito nas bobinas, curto-circuito nos anéis e curto-circuito devido a fatores externos, tais como influência do clima.

4.52

supor que questões internas, tais como não-conformidades do projeto e do processo ocorreram. Por outro lado, a intensidade diferente pode ser explicada pelo impacto das condições externas, tais como quantidade de partículas ou presença de sal.

Figura 4.18 – Quantidade de falhas geradas, etapa 2 (aspecto mesoscópico)

Fonte: O autor

Figura 4.19 – Microscopia da combustão sofrida em partes das bobinas (a, b e c) e ímã (d) devido ao curto-circuito

Fonte: O Autor

Para a mudança de abordagem, partes e peças que sofreram alguma avaria foram analisadas por microscopia óptica e a Figura 4.19 apresenta resultados típicos enquanto informações mais detalhadas encontram-se no Anexo A. os resultados obtidos foram apresentados aos engenheiros de O&M e, através de brainstorming foram determinadas as possíveis explicações para tais resultados. Como o principal problema decorre de desuniformidades na montagem e aplicação do nomex®, as seguintes opções foram levantadas:

- garantir a distância entre anéis (mínimo 7 mm);
- terminal da bobina com no mínimo a mesma proteção mecânica do anel (mínimo 0,5mm):
 - ✚ solução 1: utilizar dois espaguetes com diâmetros distintos (ex. 8 mm com 10 mm).
 - ✚ solução 2: utilizar 1 camada de cadarço de fibra de vidro com sobreposição de 50% (0,5 mm) e em seguida montar o espaguete de 0,5 mm.
- aplicação de 2 camadas de mica com sobreposição de 50% com no mínimo 0,5 mm de espaçamento;
 - a fita de mica deve ser porosa com substrato de fibra de vidro e para ser impregnada, isto é coerente com o proposto no Workshop de imãs, para proteção destes com processo a vácuo, o que não onera o sistema produtivo);
- aplicar 1 camada de cadarço de fibra de vidro com sobreposição de 50% (0,5 mm);
 - a fita deveria possuir acabamento que não solte fio de vidro (para permitir impregnação);
 - retirar o separador de papel isolante utilizado entre anéis;
 - utilizar massa em enchimento antes do isolamento em toda irregularidade existente no cobre e conexão do cabo.
 - soldar terminal do cabo no olhal do anel;
 - garantir que os cabos não tivessem contato direto com os anéis do estator.

Pôde-se observar que a maioria dessas soluções possui um caráter de alteração de material. Por isso, nova abordagem denominada microscópica foi proposta e desenvolvida.

4.4 ASPECTO MICROSCÓPICO

Para avaliar a estratégia de mudança de processo, foram utilizados os histogramas mais uma vez; a figura 4.20 mostra resultados típicos de acordo com a visão microscópica.

Os dados traçados mostram semelhança com aqueles descritos anteriormente nas Figuras 4.16 e 4.18, o que reforça a importância de considerar a superfície dos materiais como possível fator complementar de falhas. Para confirmar que a presença de água na fase gasosa e/ou líquida na superfície são os principais fatores de falhas do gerador os quais não puderam ser explicados por influências macroscópicas ou por razões de processo, novos testes foram propostos e, depois de aceitos, realizados. Estes testes contemplam não apenas propriedades dos materiais, mas também possíveis ações preventivas, para posterior implementação.

Figura 4.20 – Quantidade de falhas de acordo com a abordagem microscópica

Fonte: O Autor

Assim, o material de isolamento, especialmente a fita de mica, foi avaliado por percolação de vapor de água. Este experimento foi realizado em laboratório, como descrito em Materiais e Métodos, onde a Figura 4.21.a apresenta o reator utilizado. As amostras testadas podem ser vistas na Figura 4.21.b: fita termocontrátil, fita de mica e fita poliéster. Devido à pequena área da membrana efetivamente testada (área do medidor de umidade), aproximadamente 10 mm, todo o sistema pode ser considerado um mini ou microrreator. O isolador também foi exposto a HMDS (hexametildissilazano), o material de hidrofobização de superfície mais comum. Por exemplo, este reagente é vulgarmente utilizado para a alteração da superfície do vidro durante a produção de vários equipamentos, tais como analisadores de cromatografia (NAWROCKI, 1988).

Figura 21 – (a) Micro-reator utilizado para ensaio em laboratório para avaliação de fitas isolantes (b)

Fonte: O Autor

Vale ressaltar que nos sites, devido à presença de campos magnéticos e elétricos elevados, assim como seu isolamento, as superfícies metálicas podem atingir os quase 100 °C durante o dia; assim, todas as medições se utilizaram de vapor também nessa temperatura. Portanto, a água a 100°C foi mantida em um lado do micro-reator, o material

testado atua – ou não – como uma membrana permeável e o vapor de água correspondente são medidos no outro lado como um aumento na umidade relativa nas vizinhanças do teste sobre as membranas. Note-se que existe imprecisão de medição na área do orifício do reator, pois o vapor gerado modifica a umidade da área.

Além disso, uma maneira fácil de entender a afinidade superficial para uma substância química é a medição do ângulo de contato. Esta medição requer apenas a deposição de uma gota muito pequena da substância na superfície do material ensaiado, e uma vez que a água é utilizada neste caso, também pode ser chamada de molhabilidade. Todos os materiais testados mostraram-se hidrofóbicos, isto é, o ângulo de contato da água é de aproximadamente 90°, o que significa que a água não será facilmente adsorvida nessa superfície. Portanto, experimentos laboratoriais sugeriram a necessidade de modificação superficial e, *in situ* isso foi proporcionado pela impregnação do material de superfície durante a produção do processo.

Em seguida, por razões de comparação, também foi realizado um teste final após os mesmos materiais serem expostos a uma resina usada para proteger as partes e peças do gerador, e as fitas de poliéster não apresentaram percolação de água após a impregnação de resina.

As tabelas 4.4 a 4.8 foram montadas a partir dos resultados coletados nos testes descritos pelo procedimento acima. A Tabela 4.4 apresenta o teste utilizando de 1 a 3 fitas de mica quando ocorrem pelo menos duas medidas consecutivas e a Tabela 4.5 apresenta o dado após uma semana do primeiro teste.

Tabela 4.4 – Teste de percolação de água nas fitas de mica: umidade obtida

Medições	01 mica			02 micas		03 micas	
Umidade Área (%)	66,40	42,80	62,00	63,00	64,00	67,50	68,00
Umidade Orifício (%)	72,40	48,30	70,80	64,50	66,20	68,20	69,30
Umidade Absorvida (%)	6,00	5,50	8,80	1,50	2,20	0,70	1,30
Valor Médio	6,77			1,85		1,00	

Tabela 4.5 – Teste de percolação de água nas fitas de mica: umidade obtida

Medições	1 mica	2 micas	3 micas
Umidade Área (%)	55,40	55,70	55,10
Umidade Orifício (%)	66,50	66,50	61,10
Umidade Absorvida (%)	11,10	10,8	6,00

Para a Tabela 4.4:

- A média da Umidade da Área (desconsiderando menor e maior valor) foi igual a 64,58 %;
- A média da Umidade do Orifício (desconsiderando menor e maior valor) foi igual a 67,8%;

Para a Tabela 4.5:

- A média da Umidade da Área foi igual a 55,40%;
- A média da Umidade do Orifício foi igual a 64,70%.

Para todos os testes foi observada a absorção de umidade; neste caso, a diferença foi menor utilizando 03 micas juntas.

Há uma considerável variação na média de umidade absorvida entre o teste 1 e o teste 2.

No Teste 1, verificou-se que com 01 camada de mica, a permeabilidade é 4,5 vezes maior que com 02 camadas, e, 6,77 vezes maior que com 03 camadas. Já no Teste 2, esta proporcionalidade não se manteve, mas a relação decrescente entre as 3 condições ocorreu.

Os testes ocorreram em momentos (dias) diferentes. Portanto, houve variação de umidade na área do laboratório, assim como na região do orifício do reator.

Percebe-se que, mesmo a umidade da área do primeiro Teste ser maior que no momento do segundo, a diferença de umidade detectada no Teste 2 é bem maior que aquela ocorrida no Teste 1, da ordem de 9,3 em percentuais absolutos.

Portanto, observada a variação de umidade relativa, ocorrendo a absorção de umidade pela mica, e, comprovada a existência de permeabilidade deste material.

Tabela 4.6 – 1 Teste de percolação de água nas fitas de mica expostas ao HMDS: umidade obtida

Medições	01 mica			02 micas		03 micas	
Umidade Área (%)	74,60	74,60	74,6	76,3	76,3	76,3	76,3
Umidade Orifício (%)	78,00	84,4	80,2	79,8	78,0	78,2	78,2
Umidade Absorvida (%)	3,40	9,80	5,60	3,50	2,70	1,90	1,90

Tabela 4.7 – Teste de percolação de água nas fitas de mica: umidade obtida (após 1 semana do primeiro teste)

Medições	1 mica	2 micas	3 micas
Umidade Área (%)	76,6	76,3	76,6
Umidade Orifício (%)	82,0	79,7	79,1
Umidade Absorvida (%)	5,4	3,4	2,5

Em todos os testes foi observada absorção de umidade, reduzindo sensivelmente utilizando 03 micas juntas, com tendência melhor performance. Considerar que houve variação de umidade na área do laboratório, assim como no orifício. Todavia, mesmo tendo esta variação, existe a possibilidade de a mica absorver umidade. Há também imprecisão na medição da área do orifício do reator, pois o vapor gerado modifica a umidade da área.

Em seguida, por razões de comparação, também foi realizado um teste final após os mesmos materiais serem expostos a uma resina usada para proteger as partes e peças do gerador, e as fitas de poliéster não apresentaram percolação de água após a impregnação de resina. Essa resina, como mostrado na segunda iteração do PDCA, significou um aumento correspondente nas horas de trabalho pelas turbinas eólicas; no entanto, não o suficiente para garantir a vida de 25 anos, conforme esperado e registrado em contrato.

Portanto, todos os experimentos indicam a necessidade de mudança da superfície do material e um resumo deste fenômeno pode ser visto na Tabela 4.8. Os resultados indicam que o tratamento de superfície do material de isolamento pode ser uma forma de evitar o vapor de água e, provavelmente, também a reação da água. Por outro lado, outros fenômenos que não apenas a percolação do vapor de água deve estar ocorrendo e serem responsáveis por curto-circuito e/ou algumas restrições do processo as quais estão dificultando o bloqueio total de água pela resina.

É importante ressaltar que a impregnação da resina é ligeiramente diferente da exposição do HMDS, uma vez que a última alternativa altera a superfície do material mesmo em áreas realmente pequenas; isto porque é uma reação baseada na fase de vapor. Por outro lado, a concepção do estator favorece áreas limitadas, o que pode dificultar a adesão da resina e propiciar a formação de vazios; em tais áreas, o vapor do ar e de água poderia ser prendido e a equipe técnica na planta relacionou também que a análise microscópica apontou para a “formação da bolha” em algumas circunstâncias.

Assim, uma possível explicação para problemas de corrosão do estator pode residir profundamente nas propriedades da superfície do material ou, em outras palavras, dependem da cobertura (resina) mais do que da modificação das propriedades dos materiais (reação superficial do HMDS). Portanto, todas as bobinas foram recuperadas por um novo tipo de deposição de resina – conhecido por VPI (*vacuum pressure impregnation*), e já proposto no workshop de ímãs.

A escolha, após o *brainstorming*, foi pela aplicação de resina diretamente sobre o ímã, pelas razões a seguir:

- Escudo de colocação dos ímãs; (explicar que qualquer ocorrência sobre a superfície do ímã poderia causar a corrosão e posterior desprendimento). Daí a importância do workshop no sentido de não haver manipulação humana nesta operação, e também denotar que o filme espesso da resina é mais eficiente que o filme fino para evitar riscos nesta superfície;
- Máquina recoberta de resina.

A nova configuração de máquinas foi acompanhada como nas etapas anteriores e observou-se que esta mudança permitiu o aumento no ciclo de vida em pelo menos um ano.

Tabela 4.8 – Facilidade de percolação do vapor de água sobre a fita de mica de material de isolamento (Vapor a aproximadamente a 100°C)

Material	Aumento da umidade relativa devido à percolação da água em %
Mica, uma camada de fita, pristine	6,2
Mica, duas camadas de fita, pristine	3,1
Mica, três camadas de fita, pristine	1,9
Uma camada de fita de poliéster, exposição HMDS	6,8
Duas camadas de fita de poliéster, exposição HMDS	1,8
Três camadas de fita de poliéster, exposição HMDS	1,0
Uma camadas de fita de poliéster, resina	0,0
Duas camadas de fita de poliéster, resina	0,0
Três camadas de fita de poliéster, resina	0,0

Fonte: O Autor

4.4.1 Protótipos: chapas estatóricas e bobinas

Os testes anteriores ao mesmo tempo em que aumentaram a vida útil da turbina expuseram outras áreas que demandavam atenção. Assim, foi observado que as chapas estatóricas eram parte ativa nos problemas de mau funcionamento do aerogerador e estas foram examinadas a cada remanufatura.

A principal informação obtida por inspeção visual foi a diferença da coloração próxima a problemas onde ocorreram curtos ou mau funcionamento de modo geral, o que levou os engenheiros na empresa a associarem o problema à oxidação, supondo, novamente, problemas com água. Contudo, peças recém recebidas também apresentam variações na coloração, mesmo que em menor intensidade.

Para comprovação da hipótese de corrosão por água, este trabalho tomou duas ações: verificou a peça usando microscopia eletrônica de varredura (MEV), a procura de desuniformidades que explicassem o fenômeno observado e, também, avaliou-se por XRD²⁵ a composição da liga metálica, comparando duas regiões, próximo de onde ocorreu e distante do ponto de incidência do defeito. Enquanto a análise por XRD não apresentou diferenças significativas, as análises MEV revelaram várias características do processo de produção (usinagem) que impactam a isolamento dessas placas. A Figura 4.22 apresenta resultados típicos e breves comentários enquanto o Anexo B disponibiliza informação

²⁵ Informação XRD foi obtida por Davinson Mariano da Silva, e não pode ser veiculada por questões de confidencialidade

semelhante, porém em maior quantidade e/ou diferentes peças. É possível observar (tanto no anexo como na Figura 4.22) que não há variação significativa na estrutura da superfície, até mesmo em relação ao contorno de grão, não região do curto ou próximo a ela. Contudo, pode-se observar que a ferramentaria que produziu a peça gerou desuniformidades semelhantes a estrias e que as bordas dessas estrias apresentam particulado. Neste contexto, tais desuniformidades vão dificultar a deposição da próxima camada, no presente caso trata-se de polímero orgânico, denominado genericamente por verniz. Assim, mesmo que o verniz recubra eficientemente a superfície, pode ocorrer variações grandes nos campos elétricos e, mesmo sem presença de água, gerar mau funcionamento. Esse caso é similar ao que ocorre com os ímãs de NdFeB que apresentam superfície bastante rugosa, apesar de possuírem três camadas – níquel, cobre e resina epóxi.

Figura 4.22 – Resultados típicos, obtidos por MEV, para as chapas estatóricas:

- a) região de curto a arredores;
- b) ampliação da região onde o curto não se desenvolveu;
- c) irregularidades da superfície devido ao processo de produção

Fonte: O Autor

Considerando que os imãs possuem alta sensibilidade ao vapor de água, uma nova camada deve ser inserida no sistema. Essa camada deve ser bastante espessa e produzida de modo a não gerar bolhas, ou seja, ela está de acordo com o *roadmap* original produzido no workshop (ver item 4.2.2). A solução proposta foi o uso de um sistema de impregnação a vácuo²⁶ (VPI).

O uso de VPI não é recente, especialmente na produção de motores elétricos. Em 1968 a patente de Sargent (1970) informava que um modo aceitável de fabricar bobinas era por VPI (SARGENT, 1970) e, em 1975, a patente de (KAMIUCHI et al., 1976) propunha a produção de uma bobina usando isolamento elétrica a partir de impregnação a vácuo. Em 1976, foi proposta a impregnação de poliéster a partir de resina e processo a vácuo pois, segundo os autores, tal método era útil na produção de transformadores para alta tensão (SCHWIDER, BURNHAM; BURITZ, 1976). A patente de SCHORM; ZYCH; DEUTSCHMANN (1994) tratava da impregnação e em como manter partes e peças do sistema na posição adequada; nesse caso dava-se especial atenção ao isolante (mica) ao redor da bobina. A preocupação com o tipo de isolante nas bobinas, e o modo de “enrolar” tal produto é recorrente porque, segundo (OMRANIPOUR, HAQ, 2008), as altas tensões existentes implicam em campo elétrico altamente não uniforme. Para reduzir essa desuniformidade, não só o processo de impregnação deve ser avaliado, mas também os processos e materiais anteriores; os autores recomendam câmeras de infravermelho na procura de regiões com grandes gradientes de campo e enfatizam que pequenas impurezas, mesmo que altamente

²⁶ Vacuum Pressure Impregnation

resistivas, podem mudar essa distribuição de campo. Essa situação é condizente com o que foi observado, em termos de falhas, para as placas estatóricas; uma vez que estas apresentam várias partículas, decorrentes do processo de produção e aderidas à superfície pela deposição do verniz que age como isolante, campos intensos podem ocorrer nessas partículas e/ou ao redor delas, o que favorece o curto.

Assim, no início do século XXI, (CHABRA & KUMAR, 2000) enfatizaram que uma pequena revisão de literatura já é suficiente para considerar a técnica como a mais promissora para máquinas elétricas de alta tensão, especialmente se a impregnação é total (cobre a maior área possível). Por outro lado, as etapas limitantes eram a resistência mecânica da mica, sua facilidade de impregnação e resinas adequadas em termos de viscosidade e capacidade de cobertura. Assim, no início da presente década de 2010, segundo (EVANS; KNASTER; RAJAINMAKI, 2012), VPI é uma técnica bem estabelecida, derivada de um processo bastante utilizado, conhecido como *Vacuum Assisted Resin Transfer Mould* (VARTM) e tem se tornado o modo mais comum para isolamento elétrica, especialmente no que tange a imãs supercondutores. Porém, ainda segundo os autores, a etapa de desgaseificação é fundamental para o bom andamento do processo, ou seja, se ocorre adequadamente não haverá a formação de bolhas.

Neste contexto, o uso de protótipo parece ser o mais adequado e duas bobinas em pequenas dimensões²⁷ foram construídas para serem testadas: a primeira para testes da resina escolhida e o desenvolvimento dos parâmetros de processo utilizando VPI (efetuado na empresa) e uma segunda para ser mantida em laboratório, mas sob constante avaliação para verificar possível início de corrosão. A Figura 4.23 apresenta a aparência do protótipo da bobina, antes e após a impregnação utilizando a técnica VPI. Aparentemente toda área externa da bobina encontra-se recoberta e medida de ângulo de contato indicou valores de 90° em toda a região; contudo, análise por microscopia óptica (Figuras 4.24 e 4.25) permite visualizar que as muitas camadas de isolamento ainda apresentam descontinuidades na resina, ou seja, percolação de vapor de água não será completamente impedida, a não ser que várias camadas sejam depositadas simultaneamente.

²⁷ Tamanho total: aproximadamente 40 cm

Outra questão relevante é que o conjunto placa estatórica/bobina/imã, etc. compreende, em termos de regiões com constrictões – portanto passíveis de fenômenos de condensação, capilaridade e de percolação – são em muito maior número. Assim, durante o processo, a formação de bolhas, tanto as externas – portanto de fácil localização e controle, quanto às internas, de difícil previsão – podem se formar. A Figura 4.26 apresenta exemplos de formação de bolhas externas. O mais interessante, contudo, é observar as regiões com diferentes cores, devido a não homogeneidade de deposição. Os resultados indicaram a necessidade de desenvolver melhor o processo, o que foi efetuado pelos engenheiros da fábrica.

Quanto à bobina mantida em laboratório, esta não apresentou variação significativa durante todo o tempo de observação (três anos), indicando que os materiais de que compõem são bastante resistentes a condições ambientais não agressivas. Além disso, acompanhamento de relatórios de falhas, para as turbinas que sofreram impregnação, indicou que estas continuavam sem apresentar defeitos após três anos da manutenção.

Figura 4.23 – Aparência do protótipo da bobina, (a) antes e (b) após a impregnação utilizando a técnica VPI

Fonte: O Autor

Figura 4.24 – Detalhes do protótipo da bobina após impregnação

Fonte: O Autor

Figura 4.25 – Possíveis problemas com tal camada

Fonte: O Autor

Figura 4.26 – O confronto final, Impregnação por resina: exemplos de formação de bolhas externas e de regiões com diferentes cores, devido a não homogeneidade

Fonte: O Autor

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ITERAÇÕES DO PDCA

Nos cinco anos de acompanhamento das falhas das turbinas aéreas, algumas percepções foram alcançadas, previamente em uma abordagem macroscópica. Sob a abordagem macroscópica e fase preliminar de avaliação, a otimização do gerador foi realizada utilizando ferramentas da qualidade e foi eficiente para evitar a entrada de água na forma líquida, não importando se por gotejamento ou outra forma de coleta de material. Embora esta abordagem mostre melhorias no ciclo de vida das turbinas eólicas, não foi suficiente para garantir o tempo de vida esperado e outros dois ciclos de melhoria foram realizados (denominados de abordagens mesoscópica e microscópica) com as melhorias correspondentes. A Figura 4.26 mostra a evolução do ciclo de vida dos geradores a partir da aplicação das melhorias tecnológicas ao longo do tempo; a sequência ocorreu da seguinte maneira:

- (a) Com a abordagem macroscópica, os problemas começaram a ser identificados e seu tratamento melhorou o funcionamento dos geradores de 5000 h para 10000h, em média, o que pode ser considerado um primeiro retorno de que os estudos estavam bem endereçados.
- (b) Com a abordagem mesoscópica, as avaliações resultaram em melhorias em toda a cadeia, buscando avaliar tanto o produto, como o processo, gerando um ganho no ciclo de vida dos geradores de 10000h para 18000h, em média.
- (c) Após a abordagem microscópica, avaliando as questões relacionadas com o isolamento dos anéis, existência de microfissuras entre seus componentes, reavaliação do controle de qualidade no processo de montagem, e por conseguinte, controle das especificações dos itens fornecidos, – além de adição de outros processos de produção, como impregnação a vácuo, gerou-se um ganho no ciclo de vida atingindo mais de 26000h de funcionamento dos geradores.

Este grafo indicado pela Figura 4.27 indica claramente a tendência para o aumento no ciclo de vida após cada intervenção. No entanto, para obter a extensão de vida esperada de 25 anos, muito mais deve ser feito. Neste contexto, o cronograma estabelecido neste documento também fornece um *roadmap* técnico para futuras pesquisas e desenvolvimentos.

Figura 4.27 – Impactos nas horas trabalhadas até a falha sob análises macro-meso-microscópicas, na linha do tempo

Fonte: O Autor

Os resultados experimentais apontados nesta pesquisa indicam situação crítica porque, uma vez que a falha ocorre na turbina eólica em operação, os custos relacionados com a logística, componentes e perdas materiais devido ao curto-circuito, esses materiais que muitas vezes ficam inutilizáveis, e também os custos relacionados à interrupção da geração de energia, estão atualmente²⁸ em despesas de R\$ 1 milhão (XIN et al., 2014). Associado a isso, a perda de credibilidade e confiança do produto no Mercado são consequências bastante onerosas.

No que diz respeito ao processo, especialmente a montagem do estator, ações de conscientização e autocontrole através de treinamentos técnicos, podem mitigar a ocorrência de falhas na etapa de isolamento da bobina de anel. No entanto, é necessário desenvolver mecanismos para evitar os efeitos da água e sujeira sobre esses componentes se o ambiente é muito agressivo. Em outras palavras, é uma questão de desenvolvimento científico.

Considerando, então, o tipo de problemas envolvidos, observe os seguintes requisitos:

²⁸ Valores de 2017

- Tratamento de superfície para obtenção de revestimentos mais rígidos requer equipamentos e tecnologia de alto valor agregado. O custo, mesmo se você só usar o contrato de locação, é muitas vezes proibitivo;

- O tamanho das máquinas e a infraestrutura necessária tornam difícil qualquer deslocamento, isto é, em geral essas máquinas são compradas com um propósito particular. Possíveis substituições são a busca, novamente restrita ao campo acadêmico;

- O desenvolvimento de novos revestimentos requer pessoal especializado, muitas vezes com nível de pós-graduação acima.

As limitações descritas acima são importantes para o desenvolvimento de qualquer nova aplicação, ou em caso extremo, de novas tecnologias, sob a forma de parceria.

- Muitas vezes, o desenvolvimento desses envoltórios requer o uso de uma área crescente de pesquisa, denominada genericamente de novos materiais, como até mesmo notado por NG (2013).

Uma vez que a otimização em tais equipamentos requer pesquisa acadêmica, é obrigatório que o setor industrial estabeleça os requisitos de engenharia corretos (inputs/outputs) em uma abordagem de parceria porque qualquer melhoria deve ser testada em várias camadas diferentes (como inserir na produção, que procedimentos para mudar, como isso afeta os custos, como desenvolver um estudo piloto, etc.).

Portanto, considerando uma abordagem proativa, foi proposto com esta pesquisa que, em semelhança com a construção do modelo feito no setor automobilístico, seja inserida uma nova denominação de classe para *on* e *off shore* (Figura 4.28). Nesse caso, o intermediário, denominado limites *on/off shore*, corresponde aos geradores que estão próximos às linhas costeiras, o que para as condições climáticas brasileiras pode significar vários quilômetros.

Figura 4.28 – Nova denominação de classe para instalação de turbinas eólicas nos *sites*

Fonte: O Autor

4.6 PROPOSTA DE ROADMAP

Portanto, após o estudo aqui descrito, foi possível propor um *roadmap* para o desenvolvimento deste setor. Este *roadmap* pressupõe a ajuda estrita do setor de microeletrônica, através do desenvolvimento conjunto de processos e produtos. Essa proposta está em consonância com a opinião dos engenheiros de processo e demais operadores da empresa estudo de caso.

O *roadmap* aqui proposto considera que no setor a existência de laboratórios de pesquisa internamente às empresas é comum. A Figura 4.28 apresenta as etapas de construção desse *roadmap* e o resultado final.

(a)

Fonte: O Autor

(b) Resultado Final

Alguns comentários sobre o *roadmap* proposto facilitam sua compreensão. No início do processo as mudanças foram principalmente organizacionais, o que tornou o site, e considerando que a empresa estudo de caso mantém laboratórios de desenvolvimento, e a parte de pesquisa mais adequados para situações em que há o desenvolvimento em paralelo com a remanufatura (*push and pull*). Com esta configuração é possível parcerias (simbiose industrial) com startups da área de eletrônica e para recuperação de materiais. Na hipótese de implantar decisões desse tipo é importante observar que o local de instalação da empresa deve supor o parceiro, se não em comodato no próprio site, funcionando em um pólo industrial. Essa situação foi estudada por Arbúcias (2008) e Gameiro (2002) quanto à utilização das instalações para a produção na área de microeletrônica como início de um ecossistema industrial; além disso, o autor dessa tese também trabalhou na formação de simbiose industrial para a área de energia no setor eletroeletrônico (LIMAD, 2010); assim, já há método estabelecido para tal situação.

A simulação é uma questão interessante e que poderia utilizar os protótipos dos laboratórios das empresas da área eólica, uma vez que a informação sobre a relevância das partículas para os processos de corrosão no *site* não está plenamente analisada, em um gráfico de causa-efeito ou qualquer outra ferramenta mais adequada. Compreender como essas partículas trafegam no aerogerador é fundamental para propor processos preventivos e, para tanto, o modo mais eficiente de desenhar (design) e posicionar os componentes que possam indicar sua existência em grande quantidade; esse é o caso dos impactadores que, se miniaturizados, poderiam ser adaptados aos sites. Por outro lado, a obtenção de seus dados deveria ser automatizada, o que implica em desenvolver sistemas de visualização e de transmissão da informação. Além disso, como a simulação, em fase inicial, deveria ser validada por dados de campo, seria necessário estabelecer uma grande área de coleta, provavelmente com o uso de adesivos. Um exemplo da falta de conexão entre partículas e corrosão é apresentado no Anexo C. Como comentado anteriormente, partículas foram observadas em uma região próxima do local em que um dos parafusos de contenção sofreu corrosão e, aparentemente, fragilizou a área o suficiente para a entrada de vapor de água, o que continuou o processo de corrosão. A existência de simulação e impactadores poderia comprovar se tal mecanismo é predominante e propor soluções de manutenção preditiva.

Uma questão bastante relevante é o uso de novas resinas; muito embora o sistema após a impregnação com VPI tenha permanecido sem falha por três anos, a interface resina/materiais isolantes não é a mais adequada, uma vez que a resina desenvolvida é hidrofílica e está sendo depositada sobre materiais hidrofóbicos. Uma vez que não só o processo (deposição) e a interface (última superfície/resina) devem ser considerados, mas também a topografia camada a camada, sensores e novos processos de análise precisam ser desenvolvidos para otimizar a etapa conhecida com VPI.

Assim, de modo geral, o *roadmap* desenvolvido neste trabalho aponta três grandes áreas de desenvolvimento necessárias: sensores, miniaturização e novos materiais, o que permite modificar brevemente a figura apresentada no início deste trabalho, para adaptar a conclusões do *roadmap* (Figura 4.30).

Figura 4.30 – Etapas desenvolvidas neste trabalho

Fonte: O Autor

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo geral a utilização de metodologia/processos/produtos da área de microeletrônica para a otimização de equipamentos de produção (turbinas) de energia eólica. Neste aspecto o trabalho foi bastante frutífero. O uso de ideias e processos da microeletrônica, tanto de análise como de construção, culminando com micro-reator e protótipos, foi de grande valia para a definição de melhorias incrementais ao processo de produção e remanufatura de turbinas eólicas. O trabalho também relacionou necessidades que, se corretamente atendidas, podem proporcionar o aparecimento de novas formas de produção e controle de falhas, gerando, portanto, inovação num mercado produtivo bastante relevante, que é o de energia renovável.

Neste contexto, uma possível sugestão é tentar duas tendências diferentes no desenvolvimento acadêmico das últimas décadas: miniaturização e sensores. Por várias décadas e devido a muitas razões diferentes, a miniaturização tem sido o princípio orientador para o setor eletrônico. Dado que este setor influencia outras áreas de produção importantes e distintas, a miniaturização tem sido difundida por indústrias insuspeitas, tornando-se “ferramentas” em outras plantas produtivas, etc. Um exemplo emblemático é o setor da engenharia química. Nesta área de produção, reatores geralmente significam um enorme recipiente, cujo volume às vezes excede várias toneladas métricas, que deve ser aquecido e em que líquidos e/ou sólidos devem ser misturados. Em tais condições, uma grande quantidade de energia é dispensada apenas com transporte de material e aquecimento/arrefecimento.

Porém, por mais de duas décadas, o uso de pequenos reatores, por exemplo, com o tamanho de uma caneta, ou mesmo micro reatores que não podem ser vistos sem análise de microscopia, é uma realidade e leva a formas mais eficientes de produzir, com menos consumo de energia ou formação de subprodutos (MILLS et al., 2007). Esta tendência levou Charpentiers (2007) a argumentar que em um futuro próximo as usinas de Engenharia Química lidarão com reator *meso-escala* (poucos centímetros de comprimento), o que aumenta consideravelmente a complexidade e também requer ‘intensificação’ de operações e o uso de precisão no projeto por nanotecnologia e microtecnologia. É também “altamente desejável desenvolver uma variedade de sensores inteligentes, técnicas de visualização, análise de imagem e sondas on-line fornecendo

informações instantâneas e locais sobre o estado do processo”. Mas vale a pena notar que isso requer conjuntos ordenados de sensores locais e atuadores.

O autor também afirma claramente a importância da microeletrônica – o início da cadeia de suprimentos no setor eletrônico – por seus processos e equipamentos para atingir tais objetivos. De acordo com Charpentiers (2007), a necessidade de sustentabilidade obriga que tais compromissos sejam respeitados em um curto espaço de tempo pela maioria das empresas, o que também permite contemplar uma aparência física completamente diferente para fábricas de produtos químicos, com menor área construída, infraestrutura modesta etc. Portanto, mudanças similares e suas várias consequências para outras áreas produtivas devem ocorrer rapidamente e a energia eólica é uma delas.

Hoje em dia é impossível conceber uma indústria altamente tecnológica, como o setor de energia eólica, sem o controle rigoroso de parâmetros importantes e complexos que regem o comportamento microscópico; esta pesquisa apenas salientou e tratou alguns. No entanto, mesmo este estudo preliminar apontou a necessidade de pelo menos um melhor controle sobre a presença de água. No entanto, como discutido na introdução deste trabalho, à existência de água no ambiente, seja na forma de umidade ou precipitação, seja na formação de gelo, os sensores propostos pela ISO 12494 são cilindros coletores com 30 mm de diâmetro e 0,5 mm de comprimento onde outros sensores em geral não são empregados por serem considerados de alto custo. Em outras palavras, a miniaturização e suas matrizes de sensores ainda não atingiram essa área vital para a melhoria do desempenho ambiental em termos de geração de energia. Assim, este trabalho propôs um *roadmap* para que tais mudanças possam ser viabilizadas.

Utilizando tal *roadmap*, pode-se inferir que a próxima missão será atuar diretamente no *site* onde turbinas eólicas são mantidas e propor sensores de dimensões pequenas, de baixo custo e descartáveis para controle preventivo da situação. Quanto às possíveis soluções, considerando que se deve controlar umidade, salinidade e particulados, estruturas MOEMS parecem adequadas, entre elas; para particulados e sais, impactadores parecem ser a melhor opção e serão estudados em futuro próximo. Portanto, como trabalho futuro decorrente dessa pesquisa, espera-se sugerir uma linha de investigação na área de sensores para equipamentos eólicos.

Além disso, é crescente a necessidade de estabelecer procedimentos e métodos em busca de programas de manutenção tanto preventiva como preditiva. O Mercado busca incessantemente pela garantia de permanência da performance destes equipamentos conforme estabelecida em contrato no momento da venda definida pelo projeto. A academia, neste caso, poderá contribuir com pesquisas de aprofundamento dos danos que poderão ocorrer a partir da deterioração de partes e conjuntos das turbinas eólicas, sobretudo a partir da investigação utilizando como base os fundamentos de análise de causa apresentados nesta pesquisa.

É marcante, portanto, que uma visão historicamente comum à microeletrônica possa ter sido adaptada a um setor empresarial que possui em seu bojo tanto versões modernas como ancestrais de tecnologia. Assim, essa visão da microeletrônica propiciou a criação de uma nova cultura dentro da empresa, e que pode ser expandida para empresas semelhantes. Essa nova cultura torna procedimento comum e manutenção preditiva o modo de atuar da microeletrônica, principalmente no que tange à análise de fenômenos interlaçados e abordagens do macro ao micro.

Durante o período do desenvolvimento deste trabalho, ocorreram as seguintes publicações:

1. POMS¹ [2014]: Reliability of special synchronous air generators;
2. AJM² [2014]: Reliability of Special Synchronous Air Generators;
3. ENGEMA³ [2015]: Environmental Importance of Surface, Miniaturization and Other Critical Issues on Wind Power Turbines Production and Use;
4. LAJMSD⁴ [2015]: Environmental Importance of Surface, Miniaturization and Other Critical Issues on Wind Power Turbines Production and Use;
5. CLEANER PRODUCTION⁵ [2015]: Recyclability in wind power area and the consequent economic and environmental impact;

¹ POMS: Production and Operations Management Society

² AJM: American Journal of Management

³ ENGEMA: Encontro Internacional sobre Gestão Ambiental e Meio Ambiente

⁴ LAJMSD: Latin American Journal of Management for Sustainable Development

⁵ CLEANER PRODUCTION [Elsevier]: Cleaner Production Journal

6. CBRAVIC [2015]: Determination of Technological Needs Assessment on Wind Power Sector.

6 Referências

ABDI, **Atualização do Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil**, Relatório 6.1 – FGV Projetos, 2018, 144 p.

ABEEOLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim Mensal de Dados do Setor Eólico**. Disponível em <http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim_Dados-ABEEolica-Janeiro-2014-Publico.pdf>. Acesso em 07/02/2014.

ABEEOLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Geração de energia eólica cresce 15% em 2018**. Disponível em <<https://abeeolica.org.br/noticias/geracao-de-energia-eolica-cresce-15-em-2018-2/>>. Acesso em 27/03/2019.

ACKERMANN, T.; SÖDER, L. **Wind energy technology and current status: a review**. Renewable and sustainable energy reviews, v. 4, n. 4, p. 315-374, 2000.

ADEODATO, M. T. P. C. **Análise das estratégias do projeto para incorporação de princípios e indicadores de sustentabilidade em políticas públicas no município de Jaboticabal (SP)**. Dissertação de Mestrado. UFSCAR, São Carlos, SP, 2005.

ANDERSEN, M. S. **An introductory note on the environmental economics of the circular economy**. Sustainability Science, vol. 2, pp. 133–140.
In: GRAEDEL, T.E; ALLENBY, B.R. Industrial Ecology. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 2003.

ARAÚJO, G. C. de, BUENO, M. P., SOUSA, A. A. de, MENDONÇA, P. S. M. **Sustentabilidade Empresarial: Conceito e Indicadores**. III CONVIBRA – 24 a 26 de novembro de 2006. Disponível em <http://www.convibra.org/2006/artigos/61_pdf.pdf>. Acesso em 21/01/2017.

ARBÚCIAS, Janaína Gameiro. **Melhoria Da Sustentabilidade Pela Aplicação Do Conceito de Ecologia Industrial: Estudo de Caso no Setor Eletroeletrônico**. J.G. Arbúcias -- São Paulo, 2008. 99 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Elétrica – Sistemas Eletrônicos.

ARDEN, W.; BRILLOUËT, M.; COGEZ, P.; GRAEF, M.; HUIZING, B.; MAHNKOPF, R. **“More-than-Moore” White Paper**. ITRS – International Technical Roadmap for Semiconductors, pp. 31, 2010.
Disponível em: <<http://public.itrs.net/Links/2010ITRS/IRC-ITRS-MtM-v2%203.pdf>>. Acesso em 30/03/2018.

ARDEN, W.; BRILLOUËT, M.; COGEZ, P.; GRAEF, M.; HUIZING, B.; MAHNKOPF, R. **More-than-Moore white paper**. Version, v. 2, p. 14, 2010.

AZEVEDO, A. L. V. **Indicadores de sustentabilidade empresarial no Brasil: uma avaliação do Relatório do CEBDS**. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, vol. 5: 75-93, 2006. Disponível em <http://www.redibec.org/IVO/rev5_06.pdf>.

BARBALHO, Sanderson César Macêdo *et al.* **Aplicabilidade do gerenciamento da mudança de engenharia na tropicalização de um equipamento industrial**. Revista Produção Online, v. 16, n. 2, p. 743-753, 2016.

BARBATO, H. **The electrical and electronic industry driving the green economy and the sustainability**. National Confederation of Industry. Brazilian Electrical and Electronics Industry Association. Editor. Brasília, pp. 36, 2012.

BARBOSA, G. S. **O Desafio do Desenvolvimento Sustentável**. Revista Visões, 4.^a Edição, n.4, vol. 1, pp. 1-11, jan./jun. 2008.

BASOLE, R. C. **Topological analysis and visualization of interfirm collaboration networks in the electronics industry**. Decision Support Systems, vol. 83, pp. 22-31, 2016. ISSN 0167-9236, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2015.12.005>.

BAZMI, Aqeel Ahmed; ZAHEDI, Gholamreza. (2011). **Sustainable energy: role of optimization modeling techniques in power generation and supply – a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, issue 8, pp. 3480 – 3500. Available at <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.003>>.

BERMANN, C. **Energia para quê e para quem no Brasil**. Workshop – Heinrich Böll, AHK – Câmara Brasil e Alemanha, Edição IEE-USP, São Paulo, 2007.

BIANCHI, F.D.; BATTISTA, H.; MANTZ, R.J. **Wind Turbine Control Systems: principles, modelling and gain scheduling design**. Edit. Springer Science: London, 2007. ISBN-13:9781846284922.

BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future: relatório Brundtland**. United Nations, 1987.

BURSZTYN, M. **A difícil sustentabilidade: política energética e conflitos ambientais**. pp. 257, pág. 19, Ed. Garamond: Rio de Janeiro, 2001.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook**. UK: Wiley & Sons, pp. 261, 2001.

CALAPRICE, A. **The expanded quotable Einstein**. Princeton: Princeton, 2000.

CALDEIRA FILHO, O. **Uso de ferramentas da qualidade na melhoria dos processos de fabricação de tubos PVC extrudados**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNESP, Ilha Solteira, SP, 2004.

CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total**. Fundação Christiano Ottoni, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1996.

CAMPOS, L.M.S., SELIG, P.M., KLIEMANN NETO, F. J., POSSAMAI, O. **O Processo de Gestão dos Custos da Qualidade Ambiental**. III Congresso Brasileiro de Gestão Estratégica de Custos – Curitiba, PR, Brasil, 6 a 9 de outubro de 1996. Disponível em <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3404/3404>>. Acesso em 10/02/2018.

Canal Energia – Revista Eletrônica. Disponível em <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53044906/brasil-chega-a-mais-de-500-parques-eolicos-instalados>>, 12/12/2017. Acessado em 28/01/2018.

CARDON, E. C., LEONARD, S. **Unleashing design: planning and the art of battle command**. Army Combined Arms Center Fort Leavenworth Ks, 2010.

CARROZZA, M. C.; DARIO P.; BENVENUTO, A.; MENCIASSI, A. **Micro-systems in biomedical applications**. Journal of Micromechal Microengineering, pp. 235-244, 10-2000.

CARVALHO, I. **Ecologia, Desenvolvimento e Sociedade Civil**. Rev. Adm. Pública, 25 (4): 4-11, out. /dez.,1991

CARVALHO, M. M.; PALADINI, E. P. **Gestão da Qualidade: Teoria e Casos**. Editora Elsevier: Rio de Janeiro, pp. 420, 2012.

CHABRA, O. P.; KUMAR, M. C. **Techno-scientific aspects of epoxy mica vacuum pressure impregnation insulation system for rotating electrical machines and generators**. In: Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 00CH37075). IEEE, 2000. p. 24-27.

CHEN, ZHE; GUERRERO, J.M. **A review of the state of the art of power electronics for wind turbines**; In: BLAABJERG, F., **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, issue 8, pp.1859 – 1875, 2009.

CHOI, K., NARASIMHAN, R., KIM, S. W. **Opening the technological innovation black box: The case of the electronics industry in Korea**. European Journal of Operational Research, vol. 250, issue 1, 1, pp. 192-203, 2016. ISSN 0377-2217, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.054>.

CIOSEK, P.; WRÓBLEWSKI, W. **Sensor arrays for liquid sensing–electronic tongue systems**. The Analyst, 2007.

CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988.

CRAWFORD, R.H. **Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, issue 9, pp. 2653-2660, 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.008.

CRESESB – Centro de Referência para as Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – Eletrobrás Página 1/8. Atualizado em 12/06/2017 <

http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_eolica. Acesso em 30/01/2018,

DE LIMA, Elaine Carvalho; SANTOS, Isabela Amâncio; MOIZINHO, Luzélia Calegari Santos. **Energia Eólica no Brasil: Oportunidades e Limitações para o Desenvolvimento Sustentável**. Revista Estudo & Debate, v. 25, n. 1, 2018.

DEMO, P. **Metodologia do conhecimento científico**. São Paulo: Editora Atlas, 2000.

DEVIN, Y.; MCALLISTER, V.; ALLEN, M. G.; PRAUSNITZ, M. R. **Annual Review of Biomedical Engineering**, pp. 289-313, 2000.

DIAS, C. **Estudo de caso: ideias importantes e referências**. Mai. 2000. Disponível em <<http://www.geocities.com/claudiaad/qualitativa.html>>. Acesso em 15/10/ 2015.

DONES, R.; BAUER, C.; BOLLIGER, R.; BURGER, B.; HECK, A.; EMMENEGGER, V.M.F.; FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N. **Life cycle inventories of Energy Systems: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries data**. Ecoinvent Report nr. 5, vol. 2. Paul Scheerrer Institut Villigen: Dübendorf, CH, 2007.

DUARTE, J.L.B. **Utilização de Técnicas Inteligentes nas Metodologias de Manutenção de Geradores Síncronos**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação – COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

EL-MELIGI, A.A. **Corrosion preventive strategies as a crucial need for decreasing environmental pollution and saving economics**. Recent Patents on Corrosion Science, vol. 2, pp. 22-33, 2010.

EVANS, D.; KNASTER, J.; RAJAINMAKI, H. **Vacuum pressure impregnation process in superconducting coils: best practice**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 22, n. 3, p. 4202805-4202805, 2012.

FEENEY R.; KOUNAVES, S. P. **Electroanalysis**, pp 677 – 684, 12(9), 2000.

FENG, G. et al. **Simultaneous Stator Winding and Permanent Magnet Temperature Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machines**. In: 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2018. p. 1945-1951.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JR., C., UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. Artmed – Bookman Editora, São Paulo, SP, 2006.

FREUND, H.; SUNDMACHER, K. **Towards a methodology for the systematic analysis and design of efficient chemical processes: Part 1 – From unit operations to elementary process functions**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47:12, pp. 2051-2060, 2008.

FOYER, SCOTT; WILCOX, PETER. **Managing risk in wind power projects.** Renewable Energy Focus, vol. 15, issue 4, pp. 42-43, 2014. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1755-0084\(14\)70099-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1755-0084(14)70099-7)>. Acesso em 10/10/2016.

GAMEIRO, J., **Desenvolvimento de tecnologias mais limpas aplicadas à Microeletrônica.** 2002. Dissertação (Microeletrônica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 137 p.

GARCIA, E. A. **National policy for water resources: some implications for Amazon region.** Cadernos de Ciência & Tecnologia. vol. 15, n. 2, maio/ago, v. 8, n. 1/3, p. 86, 1991. ISSN 0104-1096.

GARCÍA MÁRQUEZ, F.P.; TOBIAS, A.M.; PINAR PÉREZ, J.M.; PAPAELIAS, M. **Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods.** Renewable Energy, v. 46, pp. 169–178, 2012.

GARCÍA-SERNA, J.; PÉREZ-BARRIGÓN, L.; COCERO, M.J. **New trends for design towards sustainability in chemical engineering: green engineering.** Chemical Engineering Journal, vol. 133, issues 1-3, pp. 7-30, 15 September 2007.

GARRETT, A.J.M. **Ockham's Razor.** In: Grandy WT, Schick LH, editors. Maximum Entropy and Bayesian Methods. Fundamental Theories of Physics. Dordrecht: Springer; 1991.

GERSTENBERG, K. W. **Colloid & Pol. Sci.**, v. 268 (4), pp. 345, 1990.

GIANNETTI, B. F. C.; ALMEIDA, M. V. B. **Ecologia Industrial: Conceitos, ferramentas e aplicações.** Edgard Bücher, São Paulo, 2006.

GIL, A. C. **Técnicas de pesquisa social.** EPU, São Paulo, 1999.

GILLES, Ken. **MEMS in Medicine.** All Flexible Circuits, LLC (d.b.a. All Flex) Edição: Flexible Circuit Manufacturer, 2016. Disponível em <<http://www.allflexinc.com/mems-in-medicine/>>. Acesso em 05/01/2017.

GONZÁLES VIDAL, A. P.; TERROSO-SAENZ, F.; SKARMETA, A. F. **An open IoT platform for the management and analysis of energy data.** Future Generation Computer Systems, v. 92, p. 1066-1079, 2019.

GWR – Global Wind Report. **Annual Market updated 2012.** Global Wind Energy Council, 72 pages. Disponível em <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf>. Acesso em 03/11/2014.

G2MT Labs. Disponível em <<http://www.g2mtlabs.com/cost-of-corrosion>>. Acesso em 10 de agosto de 2014.

HANEIN, Y.; BÖHRINGER, K.F.; WYETH, R.C. **Willows Sensors Update**, pp. 47 – 75, 10/1/2002.

HARTMAN, F.T. **The ten commandments of better contracting: a practical guide to adding value to an enterprise through more effective smart contracting.** ASCE Publications, pp. 69–71, 2003. ISBN 9780784470985.

HASEBE, S. **Design and operation of micro-chemical plants:** bridging the gap between nano, micro and macro technologies. *Computer and Chemical Engineering*, vol. 29: 1, pp. 57-64, 2004.

HATTON, B.; LANDSKRON, K.; WHITNALL, W, PEROVIC, D.; OZIN, G.A., **Accounts of Chemical Research**, v. 38:4, pp. 305-312, 2005.

HAUFF, MICHAEL VON; WILDERER, PETER A. **Industrial ecology: engineered representation of sustainability.** *Sustainability Science*, vol. 3, issue 1, pp. 103-115, 2007.

HORGAN, C. **Using energy payback time to optimize onshore and offshore wind turbine foundations.** *Renewable Energy*, vol. 53, pp. 287-298, 2013.

JABBOUR, A. B. L. S.; ALVES FILHO, A. G.; VIANA, A. B. N.; JABBOUR, C. J. C. **Factors affecting the adoption of supply chain management practices: Evidence from the Brazilian electro-electronic sector,** *IIMB Management Review*, vol. 23, pp. 208-222, 2011.

JABBOUR, A. B. L. S.; JABBOUR, C. J. C. **Lançando luzes sobre a gestão de operações do setor eletroeletrônico brasileiro.** *Ver. Adm. Pública*, vol.46(3):817-40, 2012.

JANGAM, S. V.; KARTHIKEYAN, M.; MUJUMDAR, A. S. **A critical assessment of industrial coal drying technologies: role of energy, emissions, risk and sustainability.** *Drying Technology*, v. 29, n. 4, p. 395-407, 2011.

JEYAPRAKASH, J. D.; SAMUEL, S.; BRENNER, THILO; PRUCKER, OSWALD; GRUMANN, MARKUS; DUCREE, JENS; ZENGERLE, ROLAND; RÜHE, JÜRGEN. **Tailormade Microfluidic Devices through Photochemical Surface Modification Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 211, issue 2, pp. 195–203, 2010.

JOSELIN HERBERT, G.M.; INIYAN, S.; SREEVALSAN, E.; RAJAPANDIAN, S. **A review of wind energy technologies.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, issue 6, pp. 1117–1145, 2007.

KALDELLIS, John K.; ZAFIRAKIS, D. **The wind energy revolution:** a short review of a long history. *Renewable Energy*, vol. 36, issue 7, pp. 1887–1901, 2011.

KALLIO, P.; KUNCOVA J. **Microfluidics** – Technology Review no. 158. National Technology Agency, pp. 36, Helsinki & Germany, 2004.

KAMIUCHI, Junichi *et al.* **Method of manufacturing an electrically insulated coil.** U.S. Patent n. 3, 991, 232, 9 Nov. 1976. Available at <<https://patents.google.com/patent/US3991232A/en>>.

KANAN, L. A., ARRUDA, M. P. **A organização do trabalho na era digital**. Estudos psicológicos (Campinas), v. 30, n. 4, pp. 583-591, 2011. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-166X2013000400011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 31/05/2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-166X2013000400011>.

KILKOVSKY, B.; STEHLIK, P.; JEGLA, Z.; TOVAZHNYANSKY, L.L.; ARSENYEVA, O. KAPUSTENKO, P.O. **Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies – I**. Energy recovery from flue gas, Applied Thermal Engineering, vol. 64, issues 1–2, pp. 213–223, March 2014.

KLAMT, T. **High voltage machines operating at high altitude — dielectric considerations**. Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 – IEEE International Symposium, p. 193 – 198, San Juan, PR, June 10-13, 2012. DOI: 10.1109/ELINSL.2012.6251456

KOCH, G.H.; BRONGERS, M.P.H.; THOMPSON, N.G.; VIRMANI, Y.P.; PAYER, J.H. **Corrosion cost and preventive strategies in the United States**. Report Numbers FHWA-RD-01-156, R315-01. National Technical Information Service, pp. 773, 2002-3. Disponível em: <<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/011536.pdf>>. Acesso em: 10 de Agosto de 2014.

KONOPLEV, B. G.; LYSENKO, I. E.; EZHOVA, O. A. **Evaluation Criteria Fingers Hardness Electrode MEMS comb Converters**. Biosciences Biotechnology Research Asia, v. 12, n. 3, p. 2345-2350, 2015.

LAMENDOLA, R., D'AGOSTINO, R. **Pure & Appl. Chem.**, v. 70(6), pp. 1203, 1998.

LENZEN, M.; MUNKSGAARD, J. **Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines** — review and applications. Renewable Energy, v. 26, issue 3, pp. 339–362, 2002.

LEÃO, M. I.A. **A infoera transformando as relações sociais**. Comunicação & Educação, Brasil, v. 10, n. 1, p. 61-70, 2005. ISSN 2316-9125. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/comueduc/article/view/37510>>. Acesso em: 31/05/2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9125.v10i1p61-70>

LETEN, BART; VANHAVERBEKE, WIM; ROIJAKKERS, NADINE; CLERIX, ANDRÉ; VANHELLEPUTTE, JOHAN. **IP Models to Orchestrate Innovation Ecosystems**: IMEC, a Public Research Institute in Nano-Electronics. California Management Review, vol. 55, nr. 4, 2013.

LEUNG, D.Y.C.; YANG, Y. **Wind energy development and its environmental impact**: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, issue 1, pp. 1031–1039, 2012.

LIEBERMAN, M. A., LICHTENBERG, A. J. **Principles of Plasma Discharges and Materials Processing**. John Wiley & Sons, pp. 514-516, 220-222, 2005.

LIMA, R.R., HERNANDEZ, L.F., CARVALHO, A.T., SILVA, M.L.P. **Corrosion resistant and adsorbent plasma polymerized thin film: *Sensors and Actuators B***. vol. 141, pp. 349–360, 2009. DOI: 10.1016/j.snb.2009.07.003

LIMAD, Waltson Gomes Neto de. **Utilização de Conceitos e Ferramentas da Logística para a Melhoria da Sustentabilidade: Um Estudo de Caso**. Ano de Obtenção: 2010, Mestrado em Gestão de Tecnologias Ambientais, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 136 p. Disponível em <http://www.portal.cps.sp.gov.br/pos-graduacao/trabalhos-academicos/dissertacoes/tecnologias-ambientais/2010/waltson-gomes-neto.pdf>.

LISKIEWICZ, T. “Coating solutions for wind energy”, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 61, issue 3. Somente online < <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?issn=0003-5599&volume=61&issue=3&articleid=17112039&show=html&PHPSESSID=kcpv198pght5ls5p5g25nhls5>>. Acesso em 14 de Agosto de 2014.

MAN, H.H., MAN, H.C., LEUNG, L.K. **Corrosion protection of NdFeB magnets by surface coatings - Part I: salt spray test**. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 152, pp. 40-46, 1996.

MANCHERI, Nabeel; SUNDARESAN, Lalitha; CHANDRASHEKAR, S. **Dominating the World. China and the Rare Earth Industry**. National Institute of Advanced Studies, Bangalore, India, v. 10, p. 1-74, 2013. Available at <<http://threeconsulting.com/pdfs/China-rare-earth-strategyin-wHighlights-.pdf>>.

MARQUES, J. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSM, Santa Maria – RS, 2004.

MARTINS, G. A.; THEÓPHILO, C. R. **Metodologia da Investigação Científica**. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

MELO, José Maria Gonçalves Nunes de. **O papel das políticas públicas no desenvolvimento das capacidades tecnológicas de empresas do setor eólico e o impacto no desempenho social e ambiental**. Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Estudos Sociais, 2016, 153 p.

MENCKEN, H.L. **Prejudices: Second Series**. [s.l.]: Alfred A. Knopf, 1920.

MIKHAILOVA, I. **Sustentabilidade: Evolução dos Conceitos Teóricos e os Problemas da Mensuração Prática**. *Revista Economia e Desenvolvimento*, n.º 16, pp. 22-41, 2004.

MIZUNO, S. **Gerência para melhoria da qualidade: as sete novas ferramentas do controle de qualidade**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1993.

MOHAMMAD, SYED NAIME; DAS, NIPU KUMAR; ROY, SAIKAT. **A review of the state of the art of generators and power electronics for wind energy conversion**

systems. In: ICDRET – 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology. IEEE, pp. 1-6, 2014.

MORETTO, E. M. et al. **Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinas hidrelétricas brasileiras: a antiga e atual fronteira Amazônica.** Ambiente Soc., São Paulo, vol. 15, n. 3, Dez. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2012000300009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 15 de Agosto de 2014 <<http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2012000300009>>.

MOTTA, R. S. **Indicadores Ambientais no Brasil: aspectos ecológicos, de eficiência e distributivos.** Texto para discussão n.º 403, pp. 101, IPEA, 1996. <<http://hdl.handle.net/11058/1754>>.

MOTTA, R. S.; RUITENBEEK, J.; HUBER, R. **Uso de Instrumentos Econômicos na Gestão Ambiental da América Latina e Caribe: Lições e Recomendações.** Texto para Discussão n. 440, IPEA, pp. 66, 1998. Disponível em <<http://hdl.handle.net/11058/1941>>.

MÜLLER, Roland M.; THORING, Katja. **Design thinking vs. lean startup: A comparison of two user-driven innovation strategies.** Leading through design, v. 151, p. 91-106, 2012.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; ZHAO, Q. **Investigation of low fouling surface alloys made by ion implantation technology.** Chemical Engineering Science, vol. 52, issue 19, pp. 3321–3332, 1997.

MURY, L.G. M. **Analysis of SME Brazilian Exporters of Electro-electronics in the Context of International Entrepreneurship.** Journal of Entrepreneurship and Innovation in Emerging Economies, 2(1), 24–37, 2016.

NASCIMENTO FILHO, A. P. **Produção de Novos Filmes Para Detecção de Poluentes,** Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 2002.

NAWROCKI, J. **On some aspects of the silica surface modification with hexamethylcyclotrisilazane, hexamethyldisilazane and their mixtures.** Chromatographia, vol. 25, n. 5, pp. 404-408, 1988.

NEMET, G. **Demand-pull energy technology policies, diffusion and improvements in California wind power.** In: T.J., Foxon et al. Innovation for a low carbon economy, pp. 47-48. Edited by Edward Elgar, 2008.

NG, KAI-WERN; LAM, WEI-HAUR; PICHIAH, SARAVANAN. **A review on potential applications of carbon nanotubes in marine current turbines.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 28, pp. 331–339, 2013.

NOGUEIRA, S. **Caracterização de filmes obtidos a partir da deposição por plasma de Hexametildissilazana,** Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 2000.

NOVOTNY, Z.; BIEDERMAN H. **Vaccum,** v. 39(1), pp. 17, 1989.

NUMES, M.P., VIEIRA, L.M, ANTUNES, J. A. V. **The adoption of Global Sourcing by a Brazilian Company**. Journal of Operations and Supply Chain Management, vol. 6, nr. 2, pp. 114 – 127, 2013.

OLIVIER PARENT, A.I. **Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: critical review**. Cold Regions Science and Technology, v. 65, issue 1, pp. 88–96, 2011.

OMRANIPOUR, R.; HAQ, S. U. **Evaluation of grading system of large motors AC stator windings**. In: Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. IEEE, 2008. p. 158-161.

ORTIZ, Carlos Enrique Arroyo; VIANA JÚNIOR, Elias Marques. **Rare earth elements in the international economic scenario**. In: Revista Escola de Minas, v. 67, n. 4, p. 361-366, 2014.

PANESCU, D. **MEMS in medicine and biology**. Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, vol. 25, no.5, pp.19-28, Sept. – Oct. 2006.

PARIATAMBY, A.; VICTOR, D. **Policy trends of e-waste management in Asia**. J. Master Cycles Waste Management, 15:411–419, 2013. DOI: 10.1007/s10163-013-0136-7

PARK, S. Y.; KIM, N.; KIM, U. Y.; HONG, S.; SASABE, H. **Polym. J.**, v. 22(3), pp. 242,1990.

PEREIRA, G. J.; DA SILVA, M. L. P.; TAN, I. H.; GOUVEA, D. J. **Mater. Chem.**, v.10, pp. 259 – 261, 2000.

PINTO-FARIA, J.C.C. **A análise de risco em investimentos do tipo de parcerias público-privadas**. Tese submetida ao Programa de Doutorado em Engenharia Civil da Universidade do Porto, pp. 248, Porto, Portugal, 2015.

POUDEL, M. P. **Assessment of Sustainability of Community Forestry through Combined Analysis of Field and Remotely Sensed Indicators**. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, Netherlands, 2002.

PRITCHARD, A.M. **Fouling Science and Technology**. NATO ASI Series, vol. 145, pp. 31-45. The economics of fouling, 1988.

PROKOP, V. **The Impact of Public Knowledge Investments on Enterprises' Competitiveness: Electronics Industry Case**. Editado por: Massaro, M; Garlatti, A, Proceedings of the 16th European Conference on Knowledge Management (EKCM 2015), pp. 968-975. Local: Univ Udine, ITALY, Data: 03-04, 2015.

PYZDEK, T. **Uma ferramenta em busca do defeito zero**. HSM Management, edição maio-junho, pp. 64-70, 2003.

REIS, Joana Magda Vaz da Silva. Tese – COPPE. **Comportamento dos geradores eólicos síncronos com conversores diante de curto-circuito no sistema**. Rio de

Janeiro, 2013 – UFRJ; disponível em <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2013-1/2013100301-2013100301/file>>.

RODRIGUES, Thiago Pastorelli; CHAGAS, André. **Brazilian Wind Farms and Its Impacts in the Labor Market of the Municipalities in Northeast Region.** Working Paper Series nº 2016-36 University of São Paulo (FEA-USP), 2016. Disponível em <http://www.repec.eae.fea.usp.br/documentos/Rodrigues_Goncalves_Chagas_36WP.pdf>.

ROY, KAUSHIK; JUNG, BYUNGHOO; RAGHUNATHAN, ANAND. **Integrated Systems in the More-than-Moore Era:** Designing low-cost energy – Efficient systems using heterogeneous components. VLSI '10: 23rd. International Conference on VLSI Design, pp. 464-469, 3-7, 2010. Bangalore, India.
DOI: 10.1109/VLSI.Design.2010.84.

RUSCHEINSKY, A. **No Conflito das Interpretações: O Enredo da Sustentabilidade.** Revista Eletrônica Mestrado Educação Ambiental, vol. 10, pp. 39-50, Jan./Jun. 2003.

RÜNCOS, Fredemar *et al.* **Geração de energia eólica tecnologias atuais e futuras.** GRUCAD-EEL-CTC-UFSC, Florianópolis-SC e WEG MÁQUINAS, Jaraguá do Sul - SC. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-geracao-deenergia-eolica-tecnologias-atuais-e-futuras-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>.
Acesso em: 30/05/ 2018.

SALINO, P. J. **Energia Eólica no Brasil: uma comparação do PROINFA e dos novos leilões.** Projeto de Graduação da UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

SANCHES, C. S. **Gestão Ambiental Proativa.** ERA – Revista de Administração de Empresas, n. 1, jan./mar. 2000.

SARGENT, John W. **Dynamoelectric machine coil and method of making same.** U.S. Patent n. 3,531,751, 29 set. 1970. Available at <<https://patents.google.com/patent/US3531751A/en>>.

SARTORI, S.; LATRÔNICO, F.; CAMPOS, L.M.S. **Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável: uma taxonomia no campo da literatura.** Revista Ambiente & Sociedade, vol. XVII, pp. 1-22, São Paulo, Jan./Mar. 2014.

SCANDELARI, V. R. N., CUNHA, J. C. **Ambidestralidade e desempenho socioambiental de empresas do setor eletroeletrônico.** Rev. Adm. Empresas. vol. 53, n. 2, pp. 183-198, mar/abr. 2013. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-75902013000200006>>.

SCHORM, Josef; ZYCH, Otakar; DEUTSCHMANN, Gottfried. **Process for producing the electric insulation of electric machine windings.** U.S. Patent n. 5,341,561, 30 ago. 1994.

SCHWIDER, Alfred W.; BURNHAM, John; BURITZ, Robert S. **Polyester fiber-vacuum impregnated epoxy resin insulation system for high voltage transformers.**

U.S. Patent n. 3,979,530, 7 set. 1976. available at <https://patents.google.com/patent/US3979530A/en>.

SHAJIEE, S.; PAO, L.Y.; WAGNER, P.N.; MOORE, E.D. **Direct ice sensing and localized closed-loop heating for active de-icing of wind turbine blades**. American Control Conference (ACC), pp. 634 – 639, Date of Conference: 17-19, June 2013.

SCHUBEL, P.J.; CROSSLEY, R.J.; BOATENG, E.K.G.; HUTCHINSON, J.R. **Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades**. Renewable Energy, v. 51, pp. 113–123, 2013.

SCHMID, G; BAUMLE, M; GEERKENS, M; HELM, I; OSEMANN, C; SAWITOWSKI, T. **Chemical Society Reviews**, v. 28:3, pp. 179-185,1999.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - Ferramenta: **Análise SWOT (Clássico)** - Disponível em: http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/ME_Analise-Swot.PDF. Acesso em: 02 de fevereiro de 2018.

SELLTIZ, C.; WRIGHTSMAN, L. S.; COOK, S. W. **Métodos de pesquisa nas relações sociais**. EPU, São Paulo, 1990.

SEURING, S. **Industrial ecology, life cycles, supply chains: differences and interrelations**. Business Strategy and the Environment, vol. 13, pp. 306–319, 2004.

SILVA, M.L.P. **Revista Brasileira Aplicação de Vácuo**. Campinas, vol. 37, n°2, pp. 42-43, maio – agosto, 2018.

SOUZA, M.T.S.; RIBEIRO, H.C.M. **Sustentabilidade Ambiental: uma Meta-análise da Produção Brasileira em Periódicos de Administração**. ANPAD, vol. 17, n.3, art. 6, pp. 368-396, Rio de Janeiro, mai./jun. 2013.

STAPLES, E.J. **The First Quantitatively Validated Electronic Nose for Environmental Testing of Air, Water, and Soil**. ACS National, 219: 236 – ANYL Part 1, American Chemical Society, 2000.

SWICKRATHA, MICHAEL J.; BURNS, STEVEN D.; WNEK, GARY E. **Sensors and Actuators B: modulating passive micromixing in 2-D microfluidic devices via discontinuities in surface energy**, v. 140, pp. 656–662, 2009.

TALAMO, J. R., CARVALHO, M. M. **Cooperação com empresas de base tecnológica: pesquisa-ação no setor elétrico**. Revista Gestão Produção, 19, vol. 2, pp. 433-444, 2012. DOI: 10.1590/S0104-530X2012000200015.

TAN, I. H.; DEMARQUETTE, N. R.; DA SILVA, M. L. P.; DEGASPERI, F. T.; DALLACQUA, R. **ISPC-14 Symposium Proceedings**, pp. 1907, 1999.

TAYLOR, MARGARET. **Beyond technology-push and demand-pull: lessons from California's solar policy**. Energy Economics vol. 30, pp. 2829-2854, 2008.

TOLEDO, J.C. **Qualidade Industrial: conceitos, sistemas e estratégias**. Editora Atlas, São Paulo – SP, 1987.

TOLEDO, J.C.; BORRÁS, M.Á.A.; MERGULHÃO, R.C.; MENDES, G.H.S. **Qualidade: Gestão e Métodos**. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

TOLMASQUIM, M.T. (Organizador), **Anuário estatístico de energia elétrica, Ministério de Minas e Energia**, pp. 253, 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf>. Acesso em 8 de agosto de 2014.

TONG, W. **Wind Power Generation and Wind Turbine Design**. WIT Press: Southhampton, UK, 2010. ISBN: 978-1-84564-205-1

TRALDI, Mariana. **Implantação de parques eólicos no semiárido brasileiro e a promessa da geração de empregos**. Bahia Análise & Dados, Salvador, v. 27, n. 1, p. 174-202, abr. 2018., EISSN 2595-2064. Disponível em: <<http://publicacoes.sei.ba.gov.br/index.php/bahiaanaliseedados/article/view/75>>. Acesso em: 01 abr. 2019.

VENUGOPAL, J.K.; KHAN, Z.J. **A review paper on modeling and simulation of permanent magnet synchronous generator based on wind energy conversion system**. International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 4, issue 6, pp. 34-43, 2014.

VERPOORTE, E.; ROOIJ, N.F. **Microfluidics Meets MEMS**. Proceedings of the IEEE, v. 91, ed. 6, p. 930-953, 2003.

WHITE, R. In: Allenby B.R., **The greening of industrial ecosystems**, pp. 259. National Academy Press: Washington – D.C., 1994.

WRISTERS, D. **Complex trade-offs – Enablement of Moore-than-Moore Era**. ICICDT – International Conference on IC Design & Technology, pp. 1-2, 29-3. Pavia, Italy, 2013. DOI: 10.1109/ICICDT.2013.6563288.

XIA, Y.; GATES, B.; YIN, Y.; LU, Y. **Advanced Materials**, pp. 693 – 713, 12/10/2000.

XIN, JIN; ZHAOLONG, ZHANG; XIAOQIANG, SHI; WENBIN, JU. **A review on wind power industry and corresponding insurance market in China: current status and challenges**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 38, pp. 1069-1082, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.048.

XINYU, J., YU, Z., RUI, W.; KANGSHENG, C.; SUZHEN, L. **J. Vac. Sci. Technol. B**, v. 15(6), pp. 2688, 1997.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

Anexo A – Principais questões observadas com a microscopia óptica

Imagens	Comentários/Análises
01	<p>O material que o dedo indicador aponta é diferente dos outros poliésteres? Ele está na parte mais externa do anel (esse material não apresenta resina, mas está acessível a ela, provavelmente, no processo de deposição)</p> <p><i>(Fig. 01)</i></p>
02	<p>As cordas nessas duas peças (indicadas com os dedos) foram bastante impregnadas pela resina, diferentemente do material anterior (ver foto na Fig 1) que se encontra na mesma região. Os materiais são semelhantes.</p> <p><i>(Fig. 02)</i></p>
03	<p>As fitas que envolvem o cobre são impregnadas de modo bem distinto de um lado (formação de material fino, indicado com dedo indicador esquerdo), essa parte ficou igualmente exposta, se comparada ao outro lado (dedo indicador direito)</p> <p><i>(Fig. 03)</i></p>

Foto detalhe da peça anterior; observa-se que houve aderência do lado direito (mão com luva). Tem alguma dificuldade do fluido percorrer um dos lados devido à montagem do processo.
(Fig. 04)

Anexo B: Microscopia – Parte I, padrão grande

Tabela 1 – Imagens Padrão Grande

Imagem	Magnitude	Corr.	Detector	Modo	Dist.	Res.	Tensão (KV)	Ab. (spot)	Incl.
					(mm)				
Padrão Grande_00	100000	0,38nA	TLD	SE	5.8	500nm	20	4	0
Padrão Grande_01	50000	96pA	TLD	SE	6	1um	20	3	0
Padrão Grande_02	25000	96pA	TLD	SE	6	2um	20	3	0
Padrão Grande_03	13000	96pA	TLD	SE	6	3um	20	3	0
Padrão Grande_04	7000	96pA	TLD	SE	6	5um	20	3	0
Padrão Grande_05	4000	96pA	ETD	SE	6	10um	20	3	0
Padrão Grande_06	2000	96pA	ETD	SE	6	20um	20	3	0
Padrão Grande_07	1000	96pA	ETD	SE	6	40um	20	3	0
Padrão Grande_08	500	96pA	ETD	SE	6	50um	20	3	0
Padrão Grande_09	250	96pA	ETD	SE	6	100um	20	3	0
Padrão Grande_10	130	96pA	ETD	SE	6	300um	20	3	0
Padrão Grande_11	70	96pA	ETD	SE	6	500um	20	3	0
Padrão Grande_12	40	96pA	ETD	SE	6	1mm	20	3	0

Anexo B: Microscopia Parte II, padrão médio

Tabela 2 – Imagens Padrão Médio

Imagem	Magnitude	Corr.	Detector	Modo	Dist.	Res.	Tensão (KV)	Ab. (spot)	Incl.
					(mm)				
Padrão Médio_13	100000	96pA	ETD	SE	5	500nm	20	3	0
Padrão Médio_14	50000	96pA	ETD	SE	5	1um	20	3	0
Padrão Médio_15	25000	96pA	ETD	SE	5	2um	20	3	0
Padrão Médio_16	13000	96pA	ETD	SE	5	3um	20	3	0
Padrão Médio_17	7000	96pA	ETD	SE	5	5um	20	3	0
Padrão Médio_18	4000	96pA	ETD	SE	5	10um	20	3	0
Padrão Médio_19	2000	96pA	ETD	SE	5	20um	20	3	0
Padrão Médio_20	1000	96pA	ETD	SE	5	40um	20	3	0
Padrão Médio_21	500	96pA	ETD	SE	5	50um	20	3	0
Padrão Médio_22	250	96pA	ETD	SE	5	100um	20	3	0
Padrão Médio_23	130	96pA	ETD	SE	5	300um	20	3	0
Padrão Médio_24	70	96pA	ETD	SE	5	500um	20	3	0
Padrão Médio_25	40	96pA	ETD	SE	5	1mm	20	3	0

Anexo B: Microscopia Parte III, padrão pequeno

Tabela 2 – Imagens Padrão Médio

Imagem	Magnitude	Corr.	Detector	Modo	Dist.	Res.	Tensão (KV)	Ab. (spot)	Incl.
					(mm)				
Padrão Pequeno_26	100000	96pA	ETD	SE	5	500nm	20	3	0
Padrão Pequeno_27	100000	96pA	ETD	SE	5	500nm	20	3	0
Padrão Pequeno_28	50000	96pA	ETD	SE	5	1um	20	3	0
Padrão Pequeno_29	25000	96pA	ETD	SE	5	2um	20	3	0
Padrão Pequeno_30	13000	96pA	ETD	SE	5	3um	20	3	0
Padrão Pequeno_31	7000	96pA	ETD	SE	5	5um	20	3	0
Padrão Pequeno_32	4000	96pA	ETD	SE	5	10um	20	3	0
Padrão Pequeno_33	2000	96pA	ETD	SE	5	20um	20	3	0
Padrão Pequeno_34	1000	96pA	ETD	SE	5	40um	20	3	0
Padrão Pequeno_35	500	96pA	ETD	SE	5	50um	20	3	0
Padrão Pequeno_36	250	96pA	ETD	SE	5	100um	20	3	0
Padrão Pequeno_37	130	96pA	ETD	SE	5	300um	20	3	0
Padrão Pequeno_38	70	96pA	ETD	SE	5	500um	20	3	0
Padrão Pequeno_39	40	96pA	ETD	SE	5	1mm	20	3	0

Anexo C: Processo de corrosão observado em aerogerador já instalado

Início corrosão	Estado físico de peça próxima ao local do início da corrosão

Estado físico de peça próxima ao local do início da corrosão	Estado físico de peça próxima ao local do início da corrosão
Estado físico de peça próxima ao local do início da corrosão