

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO: APRESENTAÇÃO
DE UM MÉTODO DE PROTOTIPAGEM DE HÉLICES NA
ÁREA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Enrique Rachor

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

Resumo

O desenvolvimento de produtos é um dos processos-chave para a manutenção da competitividade de uma empresa no ambiente atual, desde que bem organizado e estruturado. Para isso, se utiliza um modelo de referência, responsável pela padronização das atividades realizadas ao longo do processo. Neste contexto, o trabalho de conclusão de curso apresenta as etapas de uma das fases do processo de desenvolvimento de produtos (PDP) para a concepção das hélices de um gerador eólico, além de estar conforme os principais modelos de referência encontrados na literatura e, por meio de estudo de caso, mostrar as soluções encontradas durante o desenvolvimento do projeto e como resultado, o protótipo finalizado.

Palavras-chaves: Processo de Desenvolvimento de Produtos, Hélices de um Gerador Eólico, Protótipo.

Abstract

Product development is one of the key processes to maintaining the competitiveness of a company nowadays, if well organized and structured environment. For this, we use a reference model, responsible for standardization of activities throughout the process. In this context, the paper presents the steps of a phase of product development process (PDP) for the design of a propeller for a wind generator, besides being within the main reference models found in the literature and, through case study, showing the solutions found during the development of the project and as a result, the finished prototype.

Keywords: Product Development Process, Propellers of a Wind Generator, Prototype.

1. Introdução

Com vista à crescente competitividade industrial, o processo de desenvolvimento de produtos tem apresentado uma importância fundamental para manutenção lucrativa das empresas, aproximando consumidores e empresa. Isso acaba se revertendo em vantagens competitivas. Na era da evolução tecnológica, os melhores produtos são as idéias, pois, são as descobertas científicas que estimulam as inovações tecnológicas gerando mudanças rápidas que alteram completamente o paradigma do momento. Além disso, o autor versa que essa inovação tecnológica cabe aos engenheiros por serem profissionais preparados e criativos (Bazzo, 1996).

Segundo Romano (1999, p.27), “engenharia é o equacionamento simultâneo de fatores científicos, tecnológicos e humanos no projeto dos elementos e estruturas físicas, necessárias à vida e ao bem estar do homem”. Isso evidencia a dependência da sociedade em relação à engenharia e consequentemente, dos engenheiros no processo de evolução tecnológica. O engenheiro tem como função encontrar soluções para problemas técnicos se baseando em conhecimentos das ciências naturais, e da engenharia, levando em conta condicionantes matemáticas, tecnológicas e econômicas, assim como restrições legais, ambientais, etc., de forma que soluções venham a atender os objetivos prefixados (Pahl *et al.*, 2005).

Com isso, o engenheiro é o individuo responsável pela abstração das necessidades impostas pela sociedade e a partir delas, define requisitos para projetos de produtos que venham a atender da melhor forma as exigências impostas pelos consumidores.

Diante disto, a necessidade imposta aos estudantes de engenharia é de que incorporem o espírito criativo e inovador por meio de projetos extracurriculares no período de graduação.

Um dos grandes debates mundiais de hoje é a questão relativa à energia, visto que o seu aproveitamento ainda não atingiu um nível satisfatório, em virtude da maioria esmagadora da energia utilizada no planeta ser de origem não renovável, seja de fonte mineral ou atômica. Em vista disso, apresenta-se este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), como a realização de um estudo e apresentação de um método alternativo utilizado no processo de desenvolvimento de um protótipo de hélice na área de geração de energia eólica.

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo apresentar um método alternativo de desenvolvimento de um protótipo de produto na área de geração de energia eólica.

1.2.1. Objetivos específicos

- Relatar um caso prático de prototipagem de hélices de um gerador eólico desenvolvido dentro de uma universidade pública federal;
- Mapear as etapas e fases utilizadas no desenvolvimento do produto em questão;
- Sistematizar o método de fabricação

1.3. Justificativa do trabalho

Como o tema fontes de energia renováveis está cada vez mais presente na vida da população em geral, o tema energia por meio da geração eólica se tornou mais presente aos brasileiros quando o governo federal injetou incentivos monetários para a implantação dos parques eólicos.

Neste contexto, apresenta-se este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), como a realização de um estudo e apresentação de um método alternativo utilizado no processo de desenvolvimento de um protótipo de hélice de gerador eólico que contribuirá para a literatura da área de estudo.

Esse processo para a concepção das hélices dentro da universidade pública federal com um método alternativo proposto gerará novas discussões em relação à possibilidade de geradores residenciais, abrindo fronteiras para um novo mercado.

2. Revisão Bibliográfica

De modo geral, há uma complexidade relativa envolvida no desenvolvimento de novos produtos devido à multidisciplinaridade necessária, limite de tempo, qualidade dos produtos, custos da produção, fornecedores capacitados, mão-de-obra qualificada, dentre outras. Por isso, deve-se ter um bom planejamento do processo de desenvolvimento de produtos.

2.1. Processo do Desenvolvimento de Produto: Definições

Há alguns textos clássicos de gestão de desenvolvimento de produto que apresentam diferentes modelos de fases e etapas (BAXTER, 2000; CLARK e FUJIMOTO, 1991; PUGH, 1978; ULLMAN, 1997; ULRICH e EPPINGER, 2008; WHEELWRIGHT e CLARK, 1992)

Com o propósito de incorporar melhorias no processo de projeto de desenvolvimento de produto, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos (HOFFMEISTER, 2003; TZORTZOPoulos, 1999; ARAÚJO *et al.*, 2001; FISHER, 2002; ROMANO, F. V., 2003; ROMANO, L. N., 2003; MAFRA, F. N., 2009; BARBALHO, S. C. M., 2006). Os trabalhos desenvolvidos fazem uma análise de processos atualmente praticados na indústria e se estendem até a construção de modelos de referência, que podem ser utilizados para o aprendizado de estudantes e também, para orientação e atualização de profissionais, no quesito de melhoria do processo (ROMANO, L. N., 2003).

Grande parte da literatura é voltada a gestão, cujo aspectos estão relacionados aos processos de desenvolvimento, no qual se tem entradas (horas de engenharia, conhecimentos, normas e padrões, etc.), que são processadas e traz resultados parciais (protótipo) ou finais, como o produto lançado no mercado (ROMEIRO *et al.*, 2010).

Alguns trabalhos visam ao diagnóstico da gestão do processo de desenvolvimento do produto (ZANCUL, E. S., 2009; MORETTI *et al.*, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2006).

Segundo Back *et al.* (2008, p. 4), “o processo de transformação e geração de informações deve ser efetuado por uma equipe multidisciplinar, todas as fases do processo devem ser pensados simultaneamente”.

Na atualidade, uma abordagem que ganha consistência entre as empresas é o conceito da lean product development, que engloba os conceitos já conhecidos de desenvolvimento de produtos, como a engenharia simultânea, times multifuncionais e a participação dos

fornecedores desde as fases iniciais do projeto (KARLSSON e AHLSTRÖM, 1996; ZANCUL *et al.*, 2006).

Uma visão de projeto de desenvolvimento de produto diz que: projetos de desenvolvimento de produto são aqueles empreendimentos cujo objetivo é executar o processo de geração de uma idéia de um bem-material (produto com alto grau de qualidade e inovação tecnológica) ao longo de várias fases, até o lançamento do produto no mercado (ROMANO, L. N., 2013).

Para Valeriano (1998, p.377), “as etapas são compostas de algumas tarefas típicas, cumprindo ao gerente de projeto e sua equipe fazer as adaptações de que necessitarem para obter um roteiro que satisfaça seu projeto”. Agora, apresentar-se-á a macrofase desenvolvimento no processo de desenvolvimento de produto.

2.2 Macrofase Desenvolvimento

Aqui será mostrada a abrangência, ou seja, as etapas do processo de desenvolvimento de produto abordadas durante a realização do trabalho.

2.2.1. Fase Projeto Informacional

O objetivo dessa fase é, a partir das informações levantadas no planejamento, desenvolver um conjunto de informações chamado de especificações-meta do produto que além de orientar a geração de soluções, fornecem a base sobre a qual serão montados os critérios de avaliação e de tomada de decisão utilizados nas etapas posteriores do processo de desenvolvimento. As informações devem refletir as características que o produto deverá ter para atender às necessidades dos clientes (ROZENFELD *et al.*, 2006).

2.2.2. Fase Projeto Conceitual

Na fase de Projeto Conceitual, as atividades da equipe de projeto relacionam-se com a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema de projeto (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Um estudo de caso desenvolvido, nesta fase, para produtos eletroeletrônicos que lista dificuldades encontradas neste estágio de desenvolvimento do produto é encontrado em (PAGAN *et al.*, 2011).

A concepção obtida é uma descrição aproximada das tecnologias, princípios de funcionamento e formas de um produto, geralmente expressa por meio de um esquema ou

modelo tridimensional que, frequentemente, pode ser acompanhado por uma explicação textual. É uma descrição concisa de como o produto satisfará as necessidades dos clientes (ROZENFELD *et al.*, 2006; ULRICH e EPPINGER, 2008).

Conforme Baxter (2000, p. 174) apresenta dois segredos para o sucesso do projeto conceitual que são “Primeiro: fazer o possível para gerar o maior número possível de conceitos. Segundo: selecionar o melhor deles. E vai além expondo que “o projeto conceitual se propõe a desenvolver as linhas básicas da forma e função do produto”.

2.2.3. Fase Projeto Detalhado

O projeto detalhado dá prosseguimento à fase anterior, e tem como objetivo desenvolver e finalizar todas as especificações do produto, para então serem encaminhadas à manufatura e às outras fases do desenvolvimento (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Segundo Baxter (2000, p. 231), “a configuração do projeto começa com o conceito escolhido e termina com o protótipo completamente desenvolvido e testado”. Ainda, segundo o próprio autor “o projeto detalhado compreende quatro fases: geração de idéias, seleção das idéias, análise das possibilidades de falha e seus defeitos e construção e teste do protótipo”.

Dentro da fase de projeto detalhado, temos a avaliação experimental que está dividida em três tarefas subsequentes relacionadas com a execução de testes em protótipos ou modelos, a tarefa de planejar os testes (produto e processos), a tarefa de desenvolver modelos para testes (protótipos), e a tarefa de executar os testes, avaliar os resultados e planejar as ações (ROZENFELD *et al.*, 2006).

2.2.3.1. Prototipagem

A definição de protótipo é dada como a aproximação de um produto em uma ou mais dimensões de interesse (ULRICH e EPPINGER, 2008). Outra definição descreve protótipo como sendo a representação do objeto a ser projetado com todas as características funcionais e dimensionais do produto (BACK *et al.*, 2008). Os protótipos reais cumprem inicialmente o mesmo papel do desenho técnico, que é facilitar a comunicação entre a equipe de projeto, fornecedores e clientes no melhor entendimento do componente e de seu funcionamento do produto (ROMEIRO *et al.*, 2010). Tendo-se alcançado uma solução para a configuração do produto, é necessário verificar se essa solução atende aos objetivos propostos. Para isso, é necessário construir e testar o protótipo do novo produto (BAXTER,

2000). Normalmente, a confecção de protótipos é realizada montando-se componentes com características semelhantes à versão final (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Existem alguns tipos de prototipagem, físicos ou analíticos (ULRICH e EPPINGER, 2008). Os mais conhecidos são o protótipo virtual (maquete eletrônica), mockup (representação tridimensional do produto), maquete (representação tridimensional não funcional muitas vezes em escala reduzida), modelo de apresentação (modelo mais próximo possível da aparência final do produto), protótipo (modelo funcional que apresenta quase todas as características do produto final) e as técnicas de construção de modelos (modelos construídos manualmente por conformação de materiais plásticos) (Romeiro *et al.*, 2010; BAXTER, 2000).

A prototipagem física é utilizada para detectar fenômenos inesperados, pois eles só se apresentam quando as leis da física são aplicadas diretamente no protótipo físico (ULRICH e EPPINGER, 2008).

Um protótipo pode reduzir o risco das iterações dispendiosas, ou seja, o resultado de um teste pode dizer se uma tarefa de desenvolvimento deverá ser repetida. Além disso, pode determinar se a tarefa subsequente será processada mais rapidamente. Também, pode reestruturar a dependência entre as tarefas. (ULRICH e EPPINGER, 2008).

Para não tomar tempo do grupo de trabalho, só construa um protótipo quando você esgotar todas as demais fontes de informação. Além disso, substitua protótipos por esboços ou desenhos de apresentação, sempre que possível. Também, desenvolva protótipo com o mínimo grau de complexidade e sofisticação, o necessário apenas para você obter a resposta do que procura (BAXTER, 2000).

No planejamento para protótipos temos 4 passos para seguir: primeiro, definir o propósito do protótipo, segundo, estabelecer o nível de aproximação do protótipo com o produto final, terceiro, traçar um plano experimental e quarto, criar uma agenda para aquisição de material, construção e testes do produto. Além disso, protótipos bem sucedidos são definidos no plano de projeto de desenvolvimento de produto. O número de quantos protótipos e da qualidade dos testes são os elementos chave para o plano de desenvolvimento global (ULRICH e EPPINGER, 2008).

Foram encontradas duas aplicações de prototipagem em empresas visando o melhoramento do produto final e são encontrados em (JARDINI *et al.*, 2011; FARIA *et al.*, 2008).

3. Abordagem Metodológica

Para realização do trabalho de conclusão de curso propõe-se o desenvolvimento de um método alternativo utilizado no processo de desenvolvimento de um protótipo de hélice na área de geração de energia eólica. O projeto abrange os conhecimentos empregados na macrofase desenvolvimento na área de PDP, não sendo empregados os conhecimentos de preparação para produção do produto e lançamento do produto.

A pesquisa tem natureza do tipo aplicado, visto que os conceitos apresentados para a fabricação das hélices foram todos empregados no desenvolvimento do protótipo. Já os procedimentos técnicos serão um estudo de caso com abordagem qualitativa pois proporciona resultados vistos na prática e possibilita melhor entendimento, por parte do aluno, dos conceitos e das metodologias dos modelos de referência para o processo de desenvolvimento de produto.

O método aplicado será de cunho dedutivo cujo objetivo é o de verificar na prática se o método desenvolvido resulta num protótipo que atenda aos padrões pré-determinados. O planejamento da pesquisa quis buscar a eficiência e definir as atividades desenvolvidas no trabalho e as metas a serem alcançadas.

As necessidades no projeto foram:

- Projeto Informacional: definição dos requisitos técnicos necessários para construção das hélices;
- Projeto Conceitual: definição dos grupos e sub-grupos de montagem da estrutura das hélices;
- Projeto Detalhado: definição do protótipo do produto
- Protótipo: estabelecimento do nível de aproximação do protótipo com o produto final, além de traçar um plano experimental e posteriormente, criar uma agenda para aquisição de material, construção e testes do produto.

O desenvolvimento e aplicação do projeto foram realizados junto ao laboratório de pesquisa NAFA (Núcleo de Automação e Processos de Fabricação), do centro de tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria.

4. Proposta do método de desenvolvimento do produto da área de geração de energia eólica.

Por se tratar de um projeto com processo específico, foi difícil obter dados ao se efetuar uma pesquisa sobre o produto, pois o diferencial está na metodologia empregada no desenvolvimento do produto. Com isso, procurou-se desenvolver o projeto voltado para a escolha das soluções mais adequadas às condições exigidas e que atendam a requisitos pré-estabelecidos e que serão apresentados nesta fase de projeto informacional.

Este projeto apresenta o desenvolvimento das hélices de um aerogerador de baixa potência elétrica para suprir a demanda da necessidade de rede elétrica em regiões onde o custo da instalação de rede elétrica é inviável, como em propriedades rurais.

4.1 Projeto Informacional

Esta fase do projeto levanta algumas informações sobre as características que o produto deve dispor com o intuito de suprir as necessidades básicas do projeto e um detalhamento da tarefa a ser cumprida pelo equipamento.

Em vista disto, buscou-se realizar uma coleta de informações a fim de formular a lista de requisitos de projeto das hélices, identificando os requisitos básicos e técnicos.

4.1.1 Requisitos Básicos

Esta fase é responsável pelo fracasso ou sucesso do produto. Se bem definidas, a chance de fracasso reduz consideravelmente. Por isso, faz-se indispensável esclarecer duvidas em relação ao projeto junto ao cliente.

Assim, pode-se definir como requisitos básicos necessários das hélices do aerogerador:

- Captar a energia do vento de forma satisfatória e transmiti-la ao eixo-árvore.

4.1.2 Requisitos técnicos

As hélices devem ser dimensionadas segundo uma metodologia específica, levando em consideração referência do livro Máquinas e Fluídos (Henn, 2006) e da ‘Teoria de Schmitz’ (Gasch apud Gasparetto, 2007). No presente projeto partir-se-á de alguns valores pré-determinados conforme tabela 1.

Tabela 1 – Valores pré-determinados e o que não será abordado

Valores pré-determinados para a concepção das hélices	Não serão abordados
Número de hélices: 3 hélices	Fixação das hélices
Comprimento nominal das hélices: 6 m	Estrutura das hélices
Diâmetro externo das hélices: 12 m	Dimensionamento do hub de acoplagem das hélices
Perfil utilizado para a hélice: EPPLER 1210, que foi escolhido em catálogo	Curvatura da ogiva que reveste o hub para um melhor aproveitamento aerodinâmico
Fator de celeridade: 4,5	Eixo de sustentação das hélices
Velocidade do vento: 8m/s	Interferência da turbulência e das perdas nas pontas
Diâmetro interno das hélices: 1 m	
Potência atingida: satisfatório entre 10 e 15kVA	

4.2 Projeto Conceitual

Nesta fase é gerada a concepção do produto que atenda satisfatoriamente os requisitos básicos, técnicos e de atratividade descritos anteriormente.

Para o processo de definição da função global e dividi-la em subfunções, identificar-se-á os problemas essenciais que facilitarão a formação da matriz morfológica. Com ela espera-se buscar o atendimento da melhor forma possível o problema global, ou seja, a concepção a ser adotada nas demais fases, evidenciando assim a importância de tal fase no projeto.

4.2.1 Identificação dos problemas essenciais

Ao decorrer do trabalho, surgiram alguns problemas a serem solucionadas na parte de fabricação das hélices. Chamaremos de problemas essenciais, pois devem ser solucionados para que o produto alcance as funções e características desejadas.

Para a fabricação das hélices do aerogerador pode destacar as seguintes funções principais:

- Fabricação dos separadores dos segmentos das hélices;
- Fabricação dos segmentos do conjunto das hélices;
- Sustentar todos os conjuntos constituintes das hélices e a fixação os mesmos;
- Fabricação do suporte de acoplagem no eixo-árvore;
- Processo de cobertura para preparação da forma geométrica das hélices;
- Processo de acabamento das hélices.

4.2.2 Abstração dos principais problemas

Após identificar os principais problemas, faz-se necessário encontrar meios para resolvê-los. Eis algumas possíveis soluções:

- Fabricação dos separadores dos segmentos das hélices: os separadores devem ter um comprimento de 150 mm, fabricados em fibra de vidro sobre uma base montada com duas chapas rígidas de metal, um pedaço da barra de alumínio 30x30 mm de 150 mm e uma barra rosca com 200 mm, e duas porcas para fixação das pontas. A barra de alumínio deve ser coberta com plástico para desmoldar. O separador deve ter resistência suficiente para sustentar os segmentos da hélice que possuem pesos variáveis, proporcionando o correto distanciamento entre cada segmento.
- Fabricação dos segmentos do conjunto das hélices: os segmentos da hélice devem ser feitos em fibra de vidro, com resistência suficiente para suportar a tração que estará sujeita. Cada hélice será fragmentada em 37 segmentos que serão explicitados na fase de projeto detalhado.
- Sustentação de todos os conjuntos constituintes das hélices e a fixação os mesmos: para sustentação dos segmentos e possível ajuste de ângulo dos mesmos, a hélice terá como base de sustentação uma barra quadrada de alumínio 30x30 mm.
- Fabricação do suporte de acoplagem no eixo-árvore: fabricado em fibra de vidro em um molde feito de barro.
- Processo de cobertura para preparação da forma geométrica das hélices: preparação do corpo da hélice em fibra de vidro e o interior revestido com poliuretano injetável, o que proporcionará a forma da hélice. Então se coloca duas camadas de fibra de vidro, uma camada de tela galvanizada de metal e mais duas camadas de fibra de vidro para dar rigidez à estrutura.
- Processo de acabamento das hélices: primeiramente com uma camada de massa plástica para retirada de imperfeições e posteriormente três mãos de tinta impermeabilizante na cor branca ou prata.

4.2.3 Definição da função global e subfunções

Uma função global pode ser desdobrada em subfunções de menor complexidade, onde a interligação das subfunções resulta na estrutura de função, que representa a função global (PAHL *et al*, 2005).

4.2.3.1 Função Global do Produto

A necessidade das hélices no aerogerador é que elas sejam capazes de girar para transformar a energia dos ventos em energia elétrica. Logo, a função global das hélices é captar a energia do vento de forma satisfatória e transmiti-la ao eixo-árvore.

Visto que a metodologia a ser utilizada para o projeto aerodinâmico compreende o desenho completo do perfil das hélices, satisfazendo as condições acima requeridas, a metodologia de busca por princípios de solução não se aplica a esse sistema, ou seja, ela foi adaptada para se buscar a melhor solução possível para a verba disposta para a construção.

4.2.3.2 Subfunções do Produto

A fim de facilitar a busca pela solução mais viável, é interessante desmembrar a função global e subfunções. Após resolver estes problemas de menor complexidade, a função global também estará resolvida. Então, para que as hélices sejam capazes de captar a energia do vento de forma satisfatória e transmiti-la ao eixo-árvore é necessário:

- Angulação dos segmentos: será impresso o molde dos trinta e sete segmentos da hélice com as medidas de modelagem, onde contém a inclinação de cada um dos segmentos em relação a uma linha chamada de corda. O segmento será fabricado colocando-se o molde sob o vidro e, marcando com uma fita adesiva suas limitações, despeja a resina e é colocada fibra de vidro, em três camadas.
- União dos separadores com os segmentos da hélice: como o segmento apresenta angulação variável entre as trinta e sete partes, o separador deve ter um correto posicionamento para posterior fixação entre as partes. Por isso, a pré-fixação é dada com uma cola em forma de massa e posteriormente, unida com fibra de vidro.
- União do conjunto separador mais segmento à base da hélice: Ao acoplar o conjunto a barra de alumínio existe uma folga prevista. Então, para manter a angulação correta para formar a futura espinha dorsal da hélice, fixa-se o conjunto a

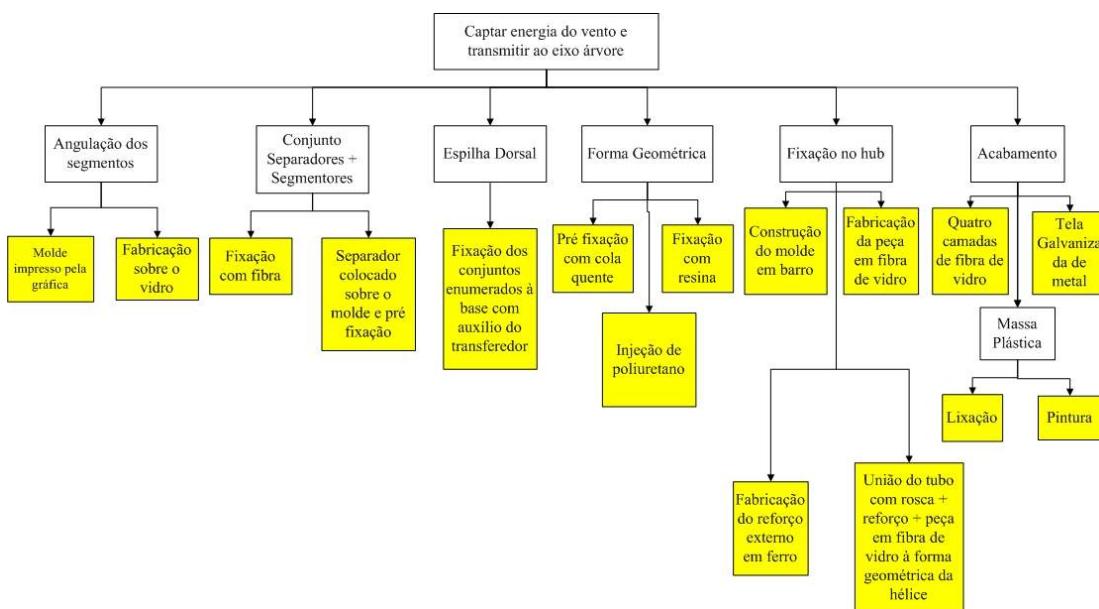
barra com uma cola em forma de massa e a angulação é mantida com um transferidor de ângulo.

- Camada superior com fibra de vidro: A cobertura dessa espinha dorsal é feita em pedaços grandes de fibra de vidro, e sua fixação é dada com a resina espalhada com rolos de pintura. Deve-se deixar uma das pontas descoberta para posterior injeção do poliuretano.
- Preparação da forma geométrica da hélice: Deve-se derramar o poliuretano injetável na proporção 1:1 (Componente A + Componente B) nos vãos deixados em uma das pontas da hélice para que a estrutura ganhe rigidez e forma.
- Acabamento: Devem-se colocar quatro camadas de fibra de vidro, duas em tecido e duas em malha de fibra de vidro, além de uma camada de tela galvanizada de metal para que a hélice ganhe resistência a força e a torção. Posteriormente é colocada uma camada de massa plástica para retirada de imperfeições, lixar e pintar na cor desejada.

4.2.3.3 Árvore de funções

Um organograma para melhor visualização das inter-relações é feita na figura 3 e representa desmembramento da função global em subfunções e as devidas funções elementares de cada hélice marcadas em vermelho.

Figura 3 – Árvore de funções com as funções elementares



O próximo passo para o desenvolvimento do produto seria necessário uma análise pela procura por princípios de solução para as subfunções. Porém, como a metodologia empregada foi adaptada e, o processo ser único e não haver referência em bibliografias, a solução mais adequada é a demonstrada acima, ou seja, as funções elementares da fabricação de cada uma das hélices são as soluções do projeto.

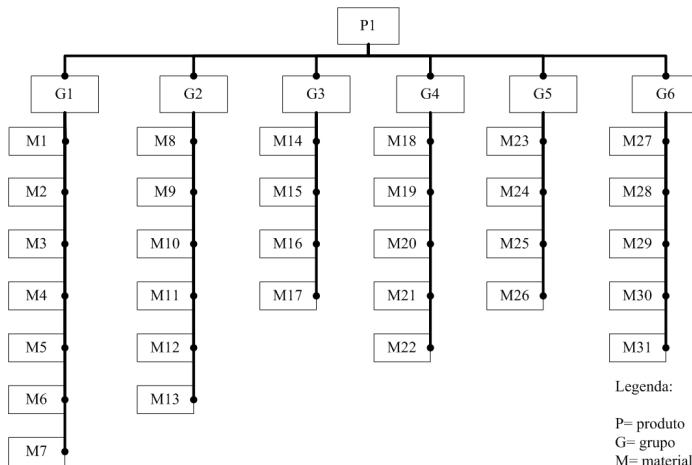
4.3 Projeto preliminar

Conforme exposto nos capítulos anteriores, é nessa fase que é determinada a estrutura de construção do produto a partir da solução encontrada no item anterior, elaborando os desenhos dos conjuntos, subconjuntos e componentes que compõe a hélice. Com isso, será feita uma lista dos materiais e as quantidades necessárias para estimar-se o custo do produto final.

Esta etapa é responsável pela organização da montagem e manutenção do produto. Ela servirá para a padronização, flexibilidade e facilidade de manutenção quando forem detectados defeitos no projeto.

No produto, verificou-se um desmembramento em seis conjuntos. Com isso, na figura 4 obtemos a seguinte árvore genealógica.

Figura 4 – Árvore genealógica do produto



Com a árvore genealógica e a hierarquia estabelecida, explicarei a codificação abaixo através da tabela 2.

Tabela 2 – Codificação

G1: Fabricação dos separadores	G2: Fabricação dos segmentos	G3: Montagem espinha dorsal	G4: Forma Geométrica	G5: Sistema de fixação ao hub	G6: Acabamento
M1: barra de alumínio 30x30 mm, comprimento de 150 mm	M8: molde impresso	M14: barra de alumínio 30x30 mm, comprimento de 6 m	M18: espinha dorsal	M23: molde de barro	M27: quatro camadas de fibra de vidro e resina
M2: placa de metal 100x100 mm	M9: vidro protetor para o molde	M15: separadores numerados	M19: fibra de vidro	M24: fabricação da peça em fibra de vidro	M28: tela galvanizada de metal
M3: barra rosca M10	M10: separador	M16: verificação com transferidor de ângulo	M20: cola quente	M25: fabricação do reforço externo em ferro	M29: massa plástica
M4: porca sextavada M10	M11: cola em massa	M17: cola em massa	M21: resina	M26: união tubo em rosca + reforço + peça em fibra de vidro à forma geométrica	M30: lixação
M5: plástico	M12: resina		M22: poliuretano injetável		M31: pintura
M6: resina	M13: fibra de vidro				
M7: fibra de vidro					

As figuras de cada um dos conjuntos fabricados, do separador até o produto acabado estarão representadas na fase de projeto detalhado em referência a parte de prototipagem. Com isso, concluímos esta fase e nos concentramos na parte de layout final do produto na fase de projeto detalhado.

4.4 Projeto Detalhado

Está quarta e última etapa da macrofase de projetação é voltada para o detalhamento do plano de manufatura, da construção do protótipo e realização de testes de funcionamento. As especificações técnicas estão definidas nos requisitos técnicos feitos no inicio do projeto.

4.4.1 Construção do protótipo

Conforme se percebe no plano de manufatura, a construção do protótipo não requer ferramentas complexas para a fabricação dos componentes, pois os processos necessários são a preparação da fibra de vidro, injeção de poliuretano, moldagem em barro e algumas soldas. Com isso, o produto foi tudo feito por cinco alunos do curso de engenharia de produção, incluso o autor do projeto, utilizando-se, num primeiro momento, da infraestrutura do Núcleo de Automação e de Processos de Fabricação (NAFA) e, num segundo momento por motivos do mau cheiro provocado pela resina da fibra de vidro, em uma ferraria.

4.4.2 Descrição da fabricação

A construção das hélices do aerogerador foi dada pela fabricação de cada componente separadamente, em uma ordem pré-definida, para posterior junção das partes para constituir a hélice inteira. Dessa forma, ao término da fabricação do conjunto G1, partiu-se para a fabricação do conjunto seguinte, e assim sucessivamente até a totalidade do projeto. Lembrando que a fabricação era dada para três hélices. A seguir está o relato da fabricação.

- G1: Fabricação dos separadores

Para a fabricação deste componente foram utilizados os processos de construção do gabarito para a fabricação dos separadores, em seis unidades, devido à necessidade de se produzir cento e onze separadores. Com isso, precisou-se de seis pedaços em 150 mm da barra de metal e doze chatas de metal 100x100 mm. Além disto, Para que a vibra de vidro não grudasse neste gabarito, utilizou-se um pedaço de plástico de 150 mm para cobrir a barra, fita adesiva e uma cobertura de cera para desmoldar.

O procedimento era bastante simples. Após o gabarito estar coberto com o desmoldante, cortasse a fibra de vidro em tiras de aproximadamente 50x100 mm para facilitar na hora de enrolar a fibra no gabarito. Com isso, eu uma bandeja, se depositava a quantidade necessária de resina para a fabricação do separador. A medida utilizada foi de 100 ml de resina para 2 ml de catalisador (acelerador do processo químico que endurece a resina). Então, se mergulhava a fibra de vidro completamente na resina e enrolava, sem deixar furos, para que o separador ficasse bem rígido. O tempo de cura para desmolde era de aproximadamente 15 minutos. Mas o separador só poderia ser utilizado para a fabricação do próximo componente no dia seguinte para secagem completa. Lembrando que ficavam rebarbas no produto final que posteriormente, eram cortadas.

G2: Fabricação dos segmentos

Os segmentos ou perfis, só podiam ser confeccionados após a fabricação dos separadores. Para as três hélices foram fabricados cento e onze segmentos, porém como uma diferença, os segmentos foram numerados de um a trinta e sete para cada hélice, diferenciados em tamanho, angulação em relação a barra e comprimento da corda. Essas informações estavam contidas nos gabaritos que foram impressos em uma gráfica. A tabela 3 mostra como os perfis foram projetados.

Tabela 3 - Medidas para modelagem de uma hélice.

Segmento	Raio na seção média do segmento (m)	Corda (m)	Inclinação (°)	Segmento	Raio na seção média do segmento (m)	Corda (m)	Inclinação (°)	Segmento	Raio na seção média do segmento (m)	Corda (m)	Inclinação (°)	Segmento	Raio na seção média do segmento (m)	Corda (m)	Inclinação (°)
1	0,575	0,897	57	11	2,075	0,813	24	21	3,575	0,565	12	31	5,075	0,414	6
2	0,725	0,962	52	12	2,225	0,779	22	22	3,725	0,548	11	32	5,225	0,404	6
3	0,875	0,996	47	13	2,375	0,747	20	23	3,875	0,531	10	33	5,375	0,395	5
4	1,025	1,007	43	14	2,525	0,718	19	24	4,025	0,514	10	34	5,525	0,386	5
5	1,175	1	40	15	2,675	0,69	17	25	4,175	0,498	9	35	5,675	0,377	5
6	1,325	0,981	36	16	2,825	0,665	16	26	4,325	0,482	9	36	5,825	0,367	4
7	1,475	0,953	33	17	2,975	0,643	15	27	4,475	0,467	8	37	5,95	0,357	4
8	1,625	0,92	30	18	3,125	0,621	15	28	4,625	0,452	8				
9	1,775	0,885	28	19	3,275	0,602	14	29	4,775	0,439	7				
10	1,925	0,849	26	20	3,425	0,583	13	30	4,925	0,426	7				

O processo de fabricação desses segmentos se deu com o auxílio do gabarito colocado sobre a mesa, embaixo de um vidro, onde as margens do gabarito é sobreposto no vidro com uma fita adesiva para a demarcação e posterior corte das rebarbas.

Então, se posiciona o separador sobre o gabarito na posição correta respeitando a inclinação necessária para posterior acoplagem e formação da espilha dorsal da hélice, pré fixa-o com cola em massa, engordura o vidro com cera para desmolda e então, repete o processo coma fibra de vidro e a resina nas mesmas proporções. Em seguida, despeja sobre o vidro a resina e, com os pedaços da fibra, preenche o espaço demarcado com a fita adesiva. Repete-se o procedimento da fibra e da resina por três vezes pois é necessário uma maior rigidez pois os segmentos serão responsáveis pela forma da hélice. O tempo de cura é o mesmo do separador, ou seja, 15 minutos, para cada camada.

Logo após o tempo de cura da terceira camada, faz-se o desmolde, com uma caneta se enumera o segmento e a angulação que deve estar na espinha dorsal e corta-se a rebarba, pois se demorar mais, fica muito difícil de se fazer esse procedimento devido a rigidez do conjunto. E da mesma forma que o separador, o segmento só poderá ser utilizado no próximo passo após um dia para a secagem total da peça.

- G3: Montagem espinha dorsal

Após terminar os segmentos, o próximo passo é a montagem da espinha dorsal da hélice. Para isso é necessário as três barras de alumínio 30x30 mm em seis metros de comprimento nominal.

Com os segmentos numerados e com a angulação descritas, deve-se posicioná-las em ordem de um a trinta e sete na barra. Então, com o auxilio de um transferidor de ângulo,

posiciona-se corretamente o perfil e pré fixa-o com cola em massa. Após secagem dessa cola, o perfil ficará fixo e não perderá a posição determinada.

- G4: Forma Geométrica

Nesse momento é que a hélice começa a tomar sua forma final. Finalizado a espinha dorsal, começa o processo de cobertura da mesma, ou seja, a definição da forma geométrica. Até este momento havia problemas pequenos que foram facilmente contornados. Porém, esse processo era crítico, ou seja, tudo o que tinha sido feito anteriormente deveria se encaixar perfeitamente para não prejudicar esta etapa do processo. Porém, alguns perfis não ficaram suficientemente rígidos na sua parte crítica, ou seja, as pontas ficaram muito maleáveis e, para colar a fibra de vidro nessas partes, tivemos que fazer adaptações. Onde os perfis ficaram mais fracos, cortou-se a ponta fora e colocou-se um pedaço de madeira mais resistente. Nas pontas, passou-se uma linha da fibra de vidro e colou-a com cola quente, pois a fibra deveria moldasse exatamente para dar a forma desejada na hélice.

Com o problema solucionado, passou-se a cobrir a espinha dorsal com a fibra pressa por uma das pontas com cola quente para posteriormente, colá-la com resina e formar a primeira camada da forma geométrica da hélice.

Porém, para poder injetar poliuretano no seu interior, deixou-se para trás um dos lados da hélice para fazer esse trabalho. Após o poliuretano ficar todo expandido, cortou-se as rebarbas do mesmo e preencheu-se a parte que faltava com resina. E com esse processo da injeção tivemos um novo problema que será comentado na etapa final que diz respeito ao acabamento.

- G5: Sistema de fixação ao hub

O primeiro passo foi à fabricação do molde em barro da base da parte superior da hélice. Após a secagem, para que as peças ficassem perfeitas e pudessem ser desmoldadas, foi colocada uma camada de fibra de vidro e uma camada de massa plástica e lixada várias vezes para tirar as imperfeições e para a superfície ficar lisa. Além disso, antes da fabricação das três peças em cada molde, foi passado um desmoldante líquido que forma uma camada plástica para facilitar a remoção das peças.

As peças foram feitas em duas camadas de fibra de vidro, pois elas deveriam ter uma altura menor que a forma geométrica da hélice para posterior união ao conjunto formando a hélice propriamente dita.

Finalizado essa etapa, partiu-se para a fabricação do reforço de metal. Essa parte do projeto foi terceirizada visto que nenhum dos integrantes tinha conhecimentos de soldagem. O produto finalizado está na figura 5, onde mostra que esse reforço ficará escondido sobre a peça feita anteriormente e sobre a última camada de fibra de vidro da hélice.

Figura 5: Reforço da base hélice



- G6: Acabamento

Como foi mencionado na etapa de forma geométrica, algumas partes da fibra de vidro não colaram devidamente na parte lateral do perfil e formaram bolhas que não estavam previstas. A solução encontrada foi lixar essa camada para retirar as imperfeições. Com isso, tivemos que lixar cada uma das camadas posteriores de fibra de vidro para que não tivéssemos grandes imperfeições no final da hélice, para que a massa plástica retirasse as pequenas imperfeições e deixasse o produto final pronto para a pintura.

Então se colocou as quatro camadas de fibra de vidro. A primeira camada foi com a mesma fibra que cobriu a espinha dorsal. A seguinte foi de uma fibra de vidro em malha, visto que essa fibra tinha como característica rigidez a torção, que não é desejável quando se tem rajadas de vento. Então, a próxima camada foi de uma tela galvanizada de metal para mais rigidez da hélice como um todo. Depois disso, uma camada da fibra em malha, união parte de fixação ao hub do gerador eólico e a última camada da fibra de vidro em tecido. Para

finalizar o processo da retirada das imperfeições, uma camada de massa plástica e lixação para dar a forma final do produto.

Na figura 6 ficaram representadas as três hélices, duas com a camada de massa plástica faltando a lixação final e, a de cima, pronta para a pintura. Ao final do trabalho de conclusão de curso as hélices ainda não estavam pintadas.

Figura 6: Três hélices no processo de acabamento

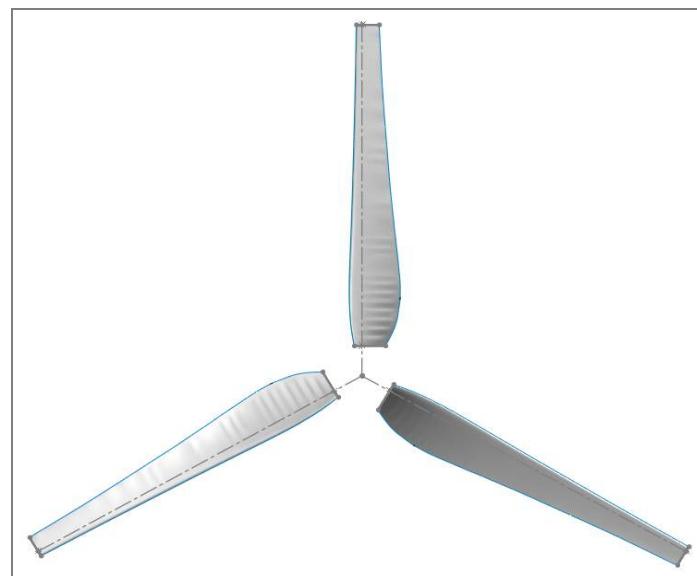


Com isso finalizamos a etapa de prototipagem e, como ao final do trabalho de conclusão de curso as demais partes do gerador eólico não tinham sido concluídas, não foi possível realizar testes nas hélices. Com isso, mostraremos como deve ser a estrutura final do produto.

4.4.3 Estrutura do Produto Final

Um esboço da disposição das três hélices é apresentado nas figuras 8, em plano paralelo.

Figura 8 – Disposição das hélices. Vista em plano paralelo



5. Conclusões

Este trabalho de conclusão de curso permitiu a elaboração e concepção das hélices destinadas à realização de um gerador eólico. O trabalho teve parceria com os cursos de graduação da Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica, pois o projeto final era a união de vários projetos para ter como produto final um gerador eólico. Com isso tivemos valores reais da escala que necessitavam para a construção do protótipo.

E isso caracterizou bem o papel da engenharia, pois foi necessário que essas áreas se unissem para discutir os projetos individuais com o intuito que todas as peças se encaixassem num produto final. Isso trouxe muita experiência para os participantes do projeto no que diz respeito a conhecimentos adquiridos e também possibilidade de discussões em prol da melhoria contínua e a melhor qualidade possível na constituição do produto. Considerando o ambiente fabril, o trabalho também serviu como meio de testar as práticas de relacionamento, comunicação, apontadas como inerentes para o engenheiro, pois possibilitou uma vivência de dia a dia com outras pessoas e pensamentos que não deixam de ser o que acontece numa empresa em geral.

No entanto, tivemos algumas dificuldades, pois não havia informações sobre a metodologia empregada para esse fim, somente para fabricação de asas para aviação dos anos 50. Porém, em relação a desenvolvimento de produto, as bibliografias encontradas contribuíram significativamente na definição dos requisitos e tomada de decisões, visto que foram eles que deram o norte para obtenção de sucesso ao final da atividade de projeto de produtos.

Recomenda-se que sejam feitos novos estudos para que se tenha resultado dos testes de geração de energia eólica quando o produto estiver definitivamente acabado e também, na descoberta de novos materiais para a fabricação das hélices, pensamento em processos menos agressivos ao meio ambiente.

Como já foi comentado, não foi possível realizar testes, pois os demais projetos do gerador eólico não tinham sido finalizados até a conclusão deste trabalho. Com isso, não sabemos se as hélices foram capazes de gerar entre 10 e 15 kVA que estava previsto no projeto geral, e fica como sugestão para próximos trabalhos.

Como lição aprendida através do desenvolvimento do trabalho, pode-se citar a integração de diferentes áreas na elaboração do projeto para a obtenção de um produto final que

atendesse as expectativas dos usuários. Além disso, a busca incessante e a aplicação dos conhecimentos, bem como a seriedade que demandou este projeto, desde o planejamento até a execução da fabricação, necessitando do comprometimento de todos os envolvidos. Também, a possibilidade e a responsabilidade de liderar o projeto, superar dificuldades de comunicação necessária para o bom andamento das tarefas diárias, proporcionando um crescimento pessoal e profissional, possibilitando experiência para projetos futuros na área de desenvolvimento de produto. Levando em consideração o exposto acima, dá-se como satisfatório o trabalho aqui concluído.

6. Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, C. de.; ANDRADE, L. M. de.; AMARAL, D. C. Diagnóstico da gestão do processo de desenvolvimento de produtos – um estudo de caso no setor de equipamentos e próteses médicas. XIII SIMPEP, Bauru – SP, 2006.
- ARAÚJO, C. S.; MENDES, L. A. G.; TOLEDO, L. B. Modelagem do desenvolvimento de produtos: caso Embraer – experiência e lições aprendidas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO 3., 2001, Florianópolis. Anais... Florianópolis: NeDIP-CTC/UFSC, 2001. CD-ROM: il.
- BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. da. Projeto Integrado de Produtos – Planejamento, Concepção e Modelagem. 1^a ed. Barueri – SP, Manole, 2008.
- BARBALHO, S. C. M. Modelo de referência para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos – proposta e aplicações. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.
- BAXTER, M. Projeto de Produto – Guia prático para o design de novos produtos. 2^a ed. Revisada. São Paulo. Edgard Blücher, 2000.
- BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. V. Introdução à Engenharia. 4^a ed. revisada – Florianópolis, Editora da UFSC, 1996.
- CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. Product development performance – strategy, organization and management in the world auto industry. Boston, Mass., Harvard Business School Press, 1991.
- FARIA, H.; VEDA, V. S.; ALVES, J. L. Incorporação de novas tecnologias de desenvolvimento de produto no sector tradicional dos estanhos. Dia Mundial dos Materiais, Porto - Portugal, 2008.
- FISCHER, A. Sistematização do processo de padronização de detalhes construtivos em projeto. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- GASPARETTO, V. Gerador eólico para sistemas interligados. 2007. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- HENN, E. A. L. Máquinas de Fluido. 2^a. ed. Santa Maria – RS, Editora UFSM., 2006.
- HOFFMEISTER, A. D. Sistematização do processo de planejamento de projetos: definição e sequenciamento das atividades para o desenvolvimento de produtos industriais. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- JARDINI, A. L.; BINELI, A. R. R.; ULRICH, C. B.; BERNARDES, L. F.; FILHO, R. M. Integração de prototipagem rápida e engenharia reversa no desenvolvimento rápido do produto. VI COBEF, Caxias do Sul – RS, 2011.
- KARLSSON, C.; AHLSTRÖM, P. The difficult path to lean product development. The Journal of Product Innovation Management, New York, US, v.13, n.4, p.283-295, July 1996.
- MAFRA, F. N. Proposta de um modelo de referência para preparação de produção de peças plásticas. 2009. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2009.
- MORETTI, I. C.; CULCHESK, A. S.; JUNIOR, A. B. Diagnóstico da gestão do processo de desenvolvimento de produto – um estudo de caso na indústria de confecção do vestuário. Produto & Produção, v.13, n. 3, p.37-38, 2012.

PAGAN, R. P.; SILVA, C. E. S. da.; MELLO, C. H. P. Projeto Conceitual no processo de desenvolvimento de produtos eletroeletrônicos – estudos de caso em empresas incubadas. XXXI ENEGEP, Belo Horizonte – MG, 2011.

PAHL, G. et al. Projeto de Engenharia - Fundamentos do Desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações. São Paulo, Edgard Blücher, 2005.

PUGH, S. Total design – integrated methods for successful product engineering. Reading, HA, Addison, 1978.

ROMANO, F. V. Repensando o Ensino da Engenharia Civil – Ênfase na Atividade Projetual e na Formação Humanística. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

ROMANO, F. V. Modelo de referência para o gerenciamento do processo de projeto integrado de edificações. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ROMANO, L. N. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ROMANO, L. N. Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas – Planejamento, Projeto e Produção. 1ª ed. São Paulo, Blucher, 2013.

ROMEIRO, E. F.; FERREIRA, C. V.; CAUCHICK, P. A. M.; GOUVINHAS, R. P.; NAVIERO, R. M. Projeto do Produto. Abepro. São Paulo, Elsevier, 2010.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C. de.; SILVA, S. L. da; ALLIPRANDINI, D. H. e SCALISE, R. K. Gestão de Desenvolvimento de Produtos – Uma referência para a melhoria do processo. 1ª ed. São Paulo, Saraiva, 2006.

TZORTZOPoulos, P. Contribuições para o desenvolvimento de um modelo do processo de projeto de edificações em empresas construtoras incorporadoras de pequeno porte. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

ULLMAN, D.G. The mechanical design process. New York, Mc Graw – Hill International Editions, 1997.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S.D. Product Design and Development. 4ª ed. Asia, McGraw-Hill international edition, 2008.

VALERIANO, D. L. Gerência em Projetos – Pesquisa, Desenvolvimento e Engenharia. São Paulo. Makron Books do Brasil, 1998.

WHEELWRIGHT, S. C.; CLARK, K. B. Revolutionizing Product Development – quantum leaps in speed, efficiency and quality. New York, The Free Press, 1992.

ZANCUL, E. S Gestão do ciclo de vida de produtos – seleção de sistemas PLM com base em modelos de referência. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2009.

ZANCUL, E. S.; MARX, R.; METZKER, A. Organização do trabalho no processo de desenvolvimento de produtos – a aplicação da engenharia simultânea em duas montadoras de veículos. Gestão e Produção, São Carlos, v.13, n.1, p.15-29, jan./abr. 2006.