

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO CONCEITUAL DE UM INSTRUMENTO PARA
AVALIAR O ESTADO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

MAURICIO MERINO PÉREZ

ORIENTADORA: ANDREA CRISTINA DOS SANTOS, Dr(a)
Eng.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM. DM – 97/16

BRASÍLIA / DF: ABRIL – 2016

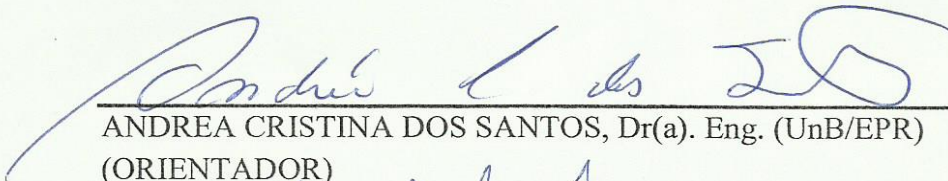
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO CONCEITUAL DE UM INSTRUMENTO PARA AVALIAR O ESTADO
DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

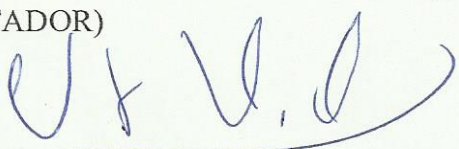
MAURICIO MERINO PÉREZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSARIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS.

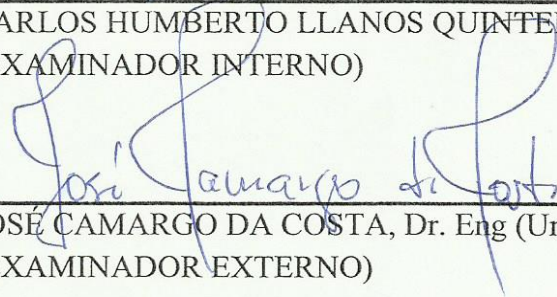
APROVADA POR:



ANDREA CRISTINA DOS SANTOS, Dr(a). Eng. (UnB/EPR)
(ORIENTADOR)



CARLOS HUMBERTO LLANOS QUINTERO, Dr. Eng. (UnB/ENM)
(EXAMINADOR INTERNO)



JOSÉ CAMARGO DA COSTA, Dr. Eng (UnB/ENE)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, ABRIL 26 DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

MERINO, MAURICIO PÉREZ.

Projeto conceitual de um instrumento para avaliar o estado de compactação do solo.
[Distrito Federal] 2016

xv, 161 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2016)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Projeto de Produto Mecatrônico

2. Modelagem Conceitual

3. Umidade

4. Penetrômetro

5. Compactação do solo

I. ENM/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MERINO, M. P. (2016). Projeto conceitual de um instrumento para avaliar o estado de compactação do solo. Publicação ENM.DM-97/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Mauricio Merino Pérez

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Projeto conceitual de um instrumento para avaliar o estado de compactação do solo.

GRAU: Mestre

ANO: 2016.

É concedida a Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma cópia para esta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Mauricio Merino Pérez.

Mauricio Merino Pérez.

CLN 413 Bloco C apto 105, Asa Norte

CEP: 70876-530 – Brasília/DF – BRASIL

e-mail: merinoperez.mauricio@gmail.com

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”
Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

Ao meu grande Orientador e amigo celestial, DEUS, pela paz e força proporcionada para a culminação do meu mestrado.

Aos meus pais DORALBA PÉREZ e MARTIN ROBERTO MERINO pelo apoio e animo incondicional para continuar no meu caminho.

Aos meus irmãos JUAN FERNANDO e ESTEBAN por me darem as ferramentas e concelhos para continuar no dia a dia.

À professora Andrea Cristina dos Santos, minha orientadora, pela sua paciência, disposição, tempo e pelo conhecimento transmitido.

Aos pesquisadores da Embrapa Cerrados: Marcos Aurélio Carolino de Sá e Claudio Alberto Bento Franz, pela valiosa contribuição para a qualidade do trabalho.

Aos amigos, colegas e companheiros os mais sinceros agradecimentos pelos conselhos e conhecimentos adquiridos.

Aos meus grandes amigos LUIZ EDUARDO DE OLIVEIRA e GISELLE LEITE pela força, paciência e colaboração na minha formatura de mestrado. Levo no meu coração aqueles momentos compartilhados e sorrisos vividos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos pelo apoio oferecido no curso. Agradeço também à Universidade de Brasília, a Embrapa Cerrados e a CNPq, pelo apoio logístico e financeiro prestado.

RESUMO

A verificação do estado de compactação é parte fundamental no desenvolvimento e crescimento da produtividade no plantio. O método mais utilizado é a determinação da resistência à penetração por meio do uso de um penetrômetro de impacto. O penetrômetro de impacto é um instrumento de medida dinâmica que tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste através de uma força que provém do impacto de um peso que compõe o equipamento e cai de uma altura constante. A medida realizada torna-se indireta, porque os dados obtidos na medição são levados para uma equação, para assim poder determinar o grau de compactação, isso pode causar incertezas e inexatidão nos dados obtidos. O objetivo desta pesquisa foi a concepção de um novo instrumento de medição de Umidade e Resistência à penetração do solo. Para tanto, utiliza-se um método sistemático para o projeto de produto mecatrônico que emprega o modelo de Integração de Requisitos e a Abordagem *ex-ante* na fase do Projeto Informacional. A concepção ocorreu a partir das análises das necessidades e restrições dos clientes. Durante a aplicação dos métodos sistemáticos na fase de projeto conceitual, foram utilizadas ferramentas como a DSM para determinar a arquitetura do produto por modularização quando possível. O resultado obtido tem ênfase em componentes e dispositivos necessários para o funcionamento do instrumento e o baixo custo dos mesmos. Constatou-se a eficácia das metodologias adotadas para o desenvolvimento da concepção do instrumento. Os testes funcionais foram determinantes na verificação e avaliação dos módulos que apresentam maior risco para o sucesso da concepção do produto.

Palavras chaves: Projeto de Produto Mecatrônico, modelagem conceitual, umidade, penetrômetro, Compactação do solo.

ABSTRAC

The verification of the state of compaction is fundamental in the development and productivity growth in the plantation. The most widely used method is the impact penetrometer developed to determine penetration resistance. The impact penetrometer is a dynamic measuring instrument that operates through the insertion of a rod into the ground. This insertion happens thanks to a resultant force from the impact of a weight in an anvil. This weight is elevated to a certain height and it is dropped freely until it hits the anvil. The measurement made becomes indirectly, because the data obtained in the measurement is taken to an equation, and thus, to determine the state of compaction which can cause uncertainties and inaccuracies in the data obtained. The aim of this research was the conception of a new instrument for measuring moisture and penetration resistance of the soil. For this, it required a systematic approach for Mechatronics product design that uses the model of integration of requirements and the ex-ante approach in the informational phase of the project. The concept of this work came up from the analysis of the needs and restrictions of customers. During the application of systematic methods in the conceptual phase of the project, there were used tools like DSM to determine product architecture by modulation when it was possible. The result obtained has emphasis on components and devices necessary for operation of the instrument and the lower prices of themselves. The effectiveness of the methodologies adopted were proved, for the development of the design of the instrument. Functional tests were decisive in the verification and evaluation of the modules that showed a higher risk for successful product conception.

Key words: Mechatronics Product Project, conceptual modeling, moisture, penetrometer, soil compaction.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O PROBLEMA QUE ENFRENTA O PENETRÔMETRO DE IMPACTO	2
1.2 OBJETIVOS	6
1.3 JUSTIFICATIVA	6
1.4 METODOLOGIA.....	7
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	8
CAPÍTULO 2 – DIFERENTES MÉTODOS E TÉCNICAS PARA A DETERMINAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	9
2.1 POROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO.....	9
2.2 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO	10
2.2.1 Penetrômetro Dinâmico.....	11
2.2.2 Penetrômetro estático	11
2.2.3 Penetrógrafo	12
2.2.4 Penetrômetro de bolso.....	12
2.3 UMIDADE.....	12
2.3.1 Tensiômetro.....	13
2.3.2 Sonda de nêutrons.	14
2.3.3 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).....	14
2.4 MÉTODO ALTERNATIVO OU EXAME DE TRINCHEIRAS.....	15
2.5 CURVA DE COMPACTAÇÃO.....	15
2.6 PRODUTOS CONCORRENTES E SIMILARES: MEDIDORES DE UMIDADE E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO PARA AVALIAR A COMPACTAÇÃO DO SOLO	16
2.6.1 Produtos de referência.....	16
2.6.2 Projetos de instrumentos medidores de umidade e resistência à penetração para avaliar a compactação do solo.....	20
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	24
CAPÍTULO 3 – O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO MECATRÔNICO.....	26
3.1 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.....	27
3.1.1 Modelo de PDP segundo Pahl & Beitz (2005).....	28
3.1.2 Modelo de Desenvolvimento Integrado de Produtos segundo Back, <i>et al.</i> (2008) (PRODIP).....	29

3.2	MODELOS DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS MECATRÔNICOS.....	31
3.2.1	Modelo V.....	32
3.2.2	Modelo de 3-Ciclos.....	33
3.2.3	Modelo Hierárquico.....	35
3.3	DIFERENÇAS ENTRE AS METODOLOGIAS E MÉTODOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA FASE DE PROJETO CONCEITUAL.....	38
3.3.1	Preposição de Métodos e Técnicas para o Projeto Conceitual.....	47
3.4	PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O PROJETO DE PRODUTO MECATRÔNICO.....	48
3.4.1	Projeto Informacional.....	50
3.4.2	Projeto Conceitual.....	54
3.4.3	Projeto Detalhado.....	59
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
CAPÍTULO 4 – PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL.....		61
4.1	PROJETO INFORMACIONAL.....	61
4.1.1	Elaboração das especificações-meta do produto mecatrônico.....	62
4.2	PROJETO CONCEITUAL.....	75
4.2.1	Estrutura funcional do produto.....	75
4.2.2	Estruturas funcionais alternativas.....	76
4.2.3	Seleção da Estrutura Funcional que Melhor Atende ao Problema de Projeto de Produto Mecatrônico.....	81
4.2.4	Busca dos Princípios de Solução e Geração de Alternativas de Concepção.....	83
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
CAPÍTULO 5 – PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS TESTES FUNCIONAIS.....		112
5.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA CONCEPÇÃO DO PRODUTO.....	112
5.2	TESTES FUNCIONAIS.....	114
5.2.1	Planejamento dos testes.....	115
5.2.2	Procedimento de testes.....	118
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	135
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....		137
6.1	ANÁLISE DOS OBJETIVOS E RESULTADOS.....	137
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....		141

ANEXOS.....	147
ANEXO I - LEVANTAMENTO DAS NECESSIDADES DO CLIENTE ATRAVÉS DE UMA ENTREVISTA.	148
ANEXO II - FLUXOGRAMA DE PROJETO POR ENCOMENDA PARA EMBRAPA.	153
ANEXO III - MATRIZ DE APOIO AO LEVANTAMENTO DOS ATRIBUTOS E REQUISITES DO PROJETO	155
ANEXO IV – CASA DA QUALIDADE.....	158
ANEXO V – PROGRAMAS UTILIZADOS NOS TESTES FUNCIONAIS	160

Lista de figuras

Figura 1: Medida da profundidade na própria haste de penetração.....	3
Figura 2: Penetrômetro cônico de impacto e seu tripé.	4
Figura 3: Medição da profundidade com a régua, as posições (a) e (b) são pontos de ajuste de zero.	4
Figura 4:Exemplo de Medição de medição da compactação do solo.....	5
Figura 5: minitomógrafo.....	17
Figura 6: Minirhizotron.	18
Figura 7: Tomógrafo de campo.	18
Figura 8: PenetroLOG PLG1020.....	19
Figura 9: SoloStar - PLG5500.....	20
Figura 10: Sonda de umidade acoplada no penetrômetro de impacto.....	21
Figura 11: Penetrógrafo eletrônico.....	22
Figura 12: Penetrômetro automatizado.	23
Figura 13: Sistema de fusão de triplo-sensor para medição da compactação do solo.....	24
Figura 14: definição detalhada da mecatrônica para o design de produto multidisciplinar.....	26
Figura 15: fluxograma do modelo de PDP.....	29
Figura 16: Princípio de trabalho da mecatrônica.....	31
Figura 17: princípio básico do modelo V para o projeto de produto mecatrônico.....	33
Figura 18: modelo de 3-Ciclos “3 – Cycle-Model” de engenharia de produto.....	34
Figura 19: Projeto Conceitual Integrativo do sistema de produção e produto. (Modelo de procedimento genérico).....	35
Figura 20: atividades de design Mecatrônica.	36
Figura 21: Modulo Mecatrônico.....	37
Figura 22: proposta de metodologia para o projeto de produto mecatrônico.	49
Figura 23: Diagrama de mude.	51
Figura 24: Matriz da Casa da Qualidade.	52
Figura 25: Abordagem <i>ex-ante</i>	53
Figura 26: Desdobramento da função global em funções parciais e elementares.	56
Figura 27: Matriz Morfológica e a combinação de princípios de solução.	57
Figura 28: Diagrama de Pugh.....	58
Figura 29: Exemplo esquemático da aplicação da MIM.	58
Figura 30: Sistema de atividade para avaliação da compactação do solo.	63
Figura 31: Ciclo de vida do produto.....	64
Figura 32: Ciclo de vida do projeto por encomenda.	65
Figura 33: Identificação, Classificação e Nível de Influência dos <i>stakeholders</i> no projeto.....	66
Figura 34: Diagrama de Mudge.....	70
Figura 35: Função global do sistema.....	76
Figura 36: Funções Parciais do sistema.....	77
Figura 37: Funções Elementares do sistema 1.....	78
Figura 38: Funções Elementares do sistema 2.....	79
Figura 39: Funções Elementares do sistema 3.....	80
Figura 40: Estrutura de sustentação Mecânica.	87

Figura 41: Sistema de acionamento para movimentação.	88
Figura 42: Arquitetura elétrica do sistema Eletro-Hidráulico.	89
Figura 43: Arquitetura básica Hidráulica do sistema Eletro-Hidráulico.	89
Figura 44: Arquitetura de um sistema de aquisição de dados.	90
Figura 45: Princípio de funcionamento do Arduino.	93
Figura 46:Arquitetura de desenvolvimento de um projeto Arduino.....	93
Figura 47:Esquema de quantificação das diretrizes.	95
Figura 48: Exemplo da análise e avaliação das diretrizes entre dois componentes.	95
Figura 49: Primeira Matriz DSM baseada em componentes.....	96
Figura 50: Agrupamento dos componentes na primeira matriz DSM.....	97
Figura 51: Alternativa de solução A – arquitetura de produto.....	98
Figura 52: Quantificação das interações na segunda matriz DSM.....	99
Figura 53: Agrupamento dos componentes na segunda matriz DSM.	100
Figura 54: Alternativa de solução B – arquitetura de produto.	101
Figura 55: Terceira matriz DSM baseada em componentes.....	102
Figura 56: Agrupamento do domino dos componentes na terceira matriz DSM.....	103
Figura 57: Alternativa de solução C – arquitetura de produto.	104
Figura 58: Quantificação de interações na quarta matriz DSM.....	105
Figura 59: Agrupamento dos componentes na quarta matriz DSM.	106
Figura 60: Alternativa de solução D – arquitetura de produto.	107
Figura 61: Software de modelagem e simulação <i>Proteus</i>	113
Figura 62: esquematização do planejamento dos testes.	116
Figura 63: Representação esquemática dos tipos de testes usados ao longo das fases de desenvolvimento de um produto.	117
Figura 64: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo RQ.....	123
Figura 65: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo LVam.	124
Figura 66: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo LVa.	124
Figura 67: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo LVma.	125
Figura 68: Testes funcionais do módulo de umidade com amostras saturadas (A), amostras equilibradas a 6,00 kPa, amostras equilibradas a 33,00 kPa, amostras equilibradas a 100 kPa e amostras secas em estufa a 40°C (equivalente a 1500 kPa).....	128
Figura 69: Método de calibração do módulo de distância.....	131
Figura 70: Erro sistemático do módulo de distância.	131

Lista de Tabelas

Tabela 1: Matriz de apoio ao levantamento dos atributos e requisitos do projeto.	67
Tabela 2: Matriz de apoio ao levantamento dos atributos e requisitos do projeto.	68
Tabela 3: Requisitos dos clientes.	69
Tabela 4: Especificações de projeto.	71
Tabela 5: Matriz Pugh para seleção de alternativas de concepção do produto.	109
Tabela 6: Granulometria, Condições de umidade ¹ , densidade e teores de água médios.	122
Tabela 7: Método de regressão linear para 50 amostras.	132

Lista de Quadros

Quadro 1: Atividades Projeto conceitual (Back, <i>et al</i> , 2008.).....	38
Quadro 2: Atividades do Projeto Conceitual do Sistema Modular.	40
Quadro 3: Fase de Projeto Conceitual do modelo de Rozenfeld, <i>et al.</i> (2006).	42
Quadro 4: Modelo de solução de <i>feedback</i> cíclico para o projeto conceitual de um sistema mecatrônico.	43
Quadro 5: Abordagem para o Projeto Conceitual de Modularização avançada de sistemas mecatrônicos.....	44
Quadro 6: Métodos e técnicas para orientar na Concepção do Produto Mecatrônico.....	47
Quadro 7: Matriz de seleção de alternativa da estrutura funcional.	82
Quadro 8: Matriz Morfológica.	84
Quadro 9: esquematização do procedimento de teste do modulo de umidade.....	119
Quadro 10: Esquematização do procedimento de teste do modulo de distância.....	129
Quadro 11: Esquematização do procedimento de teste do modulo leitor de Cartão SD....	133
Quadro 12: Avaliação dos testes em relação à especificações do projeto.....	135

Lista de símbolos e abreviações

AD	projeto axiomático
CAD	Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)
CTQs	Critérios de Qualidades
DFMA	Design For Manufacturing and Assembly (Desenho para Manufatura e Montagem)
DPs	Parâmetros de projeto
DSM	Design Structure Matrix (Estrutura da Matriz de Design)
GPS	SiGlobal Positioning System (sistema de posicionamento global)
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LVa	Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa
LVAm	Latossolo Vermelho Amarelo ácrico textura média
LVma	Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa
MAV	Métodos do Anel Volumétrico
MCDA-C	Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão-Construtiva
MIM	Matriz Indicadora de Módulos
MSN	Método de Sondas de superfície Nêutron-gama
MTC	Método da Tomografia Computacional
MTP	Método do Torrão Parafinado
OSHW	Open Source Hardware (Hardware Livre)
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PRODIP	Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
PVC	Cloreto de Polivinila
QFD	Quality Function Deployment (Desenvolvimento da Função Qualidade)
RP	Resistência à Penetração
RQ	Neossolo quartzarênico distrófico
RSM	Reconfiguration Structure Matrix (Reconfiguração da Estrutura da Matriz)
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo
TRIZ	Teoria da solução inventiva de problemas
UnB	Universidade de Brasília
VBA	Visual Basic Application (Aplicativos do Visual Basic)

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A Compactação do Solo é um processo resultante da manipulação intensiva do solo, quando o mesmo modifica suas características, como a porosidade devido à saturação das partículas. A compactação do solo é desejada no projeto de edificações e altamente prejudicial em atividades agrícolas.

A compactação do solo é danosa para o desenvolvimento da produção agrícola, pois influencia o crescimento de raízes de forma negativa, fazendo com que o plantio tenha problemas em seu desenvolvimento normal. Os sistemas de preparo do solo devem oferecer condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. No entanto, dependendo do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, eles podem promover a degradação da qualidade física do solo (TORMENTA *et al.*, 2002). A compactação também pode criar uma camada muito densa de solo onde a água não se infiltra, provocando erosão.

As regiões compactadas são áreas que necessitam de recuperação já que a compactação interfere na absorção de nutrientes e de água, na aeração das raízes e consequentemente no crescimento e rendimento das culturas, sendo um processo típico de áreas intensamente mecanizadas como é o caso do cultivo da cana-de-açúcar (MANIERI, 2005). Isso ocorre devido ao uso de equipamentos para o manejo da cultura e transporte da colheita, pois exercem pressão sobre o solo, reduzindo o espaço poroso e aumentando a densidade do solo, causando acúmulo de água na superfície, condições anaeróbicas, aumento de erosão, redução da infiltração de água, redução do crescimento de raízes e decréscimo da produção (MANIERI, 2005).

Existem diferentes métodos e técnicas de medir a compactação do solo. Em sua maioria envolvem análises de laboratório utilizando diversos parâmetros físicos como um tipo de indicativo indireto para determinar a compactação, como a densidade, porosidade, a resistência à penetração.

Segundo Cerqueira Silveira *et al.* (2010), a resistência à penetração é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação e, consequentemente, a

facilidade de penetração das raízes. No entanto, a resistência medida por penetrômetros está correlacionada com a densidade e é função também do teor de umidade. Por isso, é necessário que sejam feitas medidas da umidade do solo quando da determinação da resistência (MANIERI, 2005).

O penetrômetro é um instrumento que permite calcular o grau de compactação. É muito utilizado por diferentes áreas de conhecimento como a agronomia, porque facilita as operações de campo por tratar-se de um instrumento de porte pequeno comparado com outros instrumentos utilizados na medição da resistência e o cálculo da compactação.

Com o uso do penetrômetro há a possibilidade de classificar os solos para realizar diversas aplicações como: mapeamento da resistência, sedimentos em áreas ripárias, conhecer os indicadores de qualidade, avaliar a compactação e controle de tráfego, variabilidade nas propriedades e recuperação de áreas degradadas. Este tipo de aplicações serve como testes para medir a precisão, confiabilidade, o manuseio e o fácil transporte do instrumento. O que levou à melhoria do penetrômetro para atingir de forma temporal aquelas necessidades.

1.1 O PROBLEMA QUE ENFRENTA O PENETRÔMETRO DE IMPACTO

A verificação do estado de compactação é parte fundamental no desenvolvimento e crescimento da produtividade no plantio. O método mais prático para conseguir o objetivo, é a determinação da resistência à penetração por meio do uso de um penetrômetro de impacto. Dessa forma, o monitoramento periódico do estado de compactação por meio da resistência à penetração é uma forma prática de avaliação dos efeitos dos diferentes sistemas de manejo na estrutura do solo e no crescimento radicular das diferentes culturas, permitindo assim pesquisas e avaliações na propriedade rural (TAVARES FILHO; RIBON, 2008).

O penetrômetro de impacto é um instrumento de medida dinâmica, que mede a resistência do solo, de acordo com o número de impactos (Figura 1). A medida realizada torna-se indireta, porque os dados obtidos na medição são levados para uma equação, para assim poder determinar o grau de resistência que tem o solo, isso pode causar incertezas,

inexatidão nos dados obtidos. O penetrômetro de impacto tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste através de uma força que provém do impacto de um peso que compõe o equipamento e cai de uma altura fixa. Como diz Stolf (1991), conta-se o número de impactos para que o aparelho penetre a espessura de determinada camada. Para coleta dos dados, devem-se utilizar anotações da profundidade de penetração da haste para cada impacto ocasionado (CARBONERA, 2007).

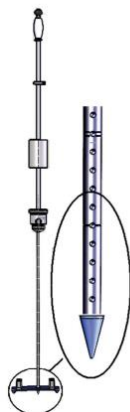


Figura 1: Medida da profundidade na própria haste de penetração.

Fonte: Stolf, *et al.*, (2012).

Autores como Ferreira e Franz (2007) descreveram e testaram um minipenetrômetro dinâmico para a determinação da resistência do solo à penetração, em amostras indeformadas. Melhorando a confiabilidade e a precisão conservando a relação de baixo custo; Rodriguez, Y. B., *et al.* (2009) que apresentaram um modelo matemático para ajustar as leituras de impactos aos valores de resistência; Vásquez García (2010) que desenvolveu e validou um penetrômetro cônico dinâmico para medir a resistência mecânica dos solos de floresta melhorando sua praticidade e portabilidade (Figura 2); Stolf *et al.* (2012) que adotaram o modelo tubular de régua, para permitir maior ângulo de visão da escala de leitura (Figura 3), melhorando o tempo de leitura de penetração e o conforto do operário evitando a posição agachada; Stolf *et al.* (2014) expuseram um programa computacional desenvolvido em linguagem de programação *Visual Basic Application (VBA)* como ferramenta rápida, facilitadora na inserção de dados de resistência do solo, para o penetrômetro dinâmico, resultando tabelas e gráficos já no formato científico. Eles fizeram avanços significativos que são aporte de futuras pesquisas, evidenciando que os

desenvolvimentos feitos não atingem de forma total as necessidades presentes no penetrômetro.



Figura 2: Penetrômetro cônico de impacto e seu tripé.

Fonte: Vásquez García (2010).

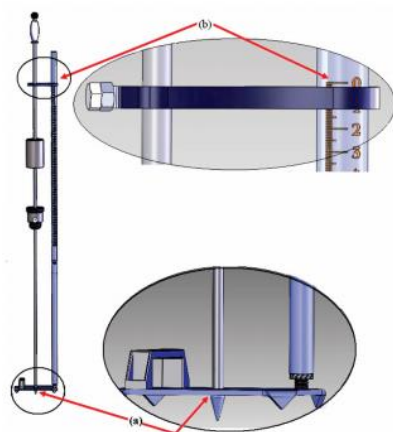


Figura 3: Medição da profundidade com a régua, as posições (a) e (b) são pontos de ajuste de zero.

Fonte: Stolf, *et al.* (2012).

Apesar da grande diversidade de objetivos e metodologias empregadas pelos autores citados, uma necessidade e motivação comum nestes estudos é a determinação do grau de compactação, e auxiliar a partir dessas informações a tomada de decisão.

Neste contexto, a medição da compactação do solo torna-se um processo longo além da determinação da resistência como é mostrado na Figura 4. Na figura para a coleta de dados é utilizado o penetrômetro, com este instrumento o operário deve utilizar anotações da profundidade de penetração para um determinado numero de impactos. Depois da coleta, os dados obtidos são inseridos no programa computacional desenvolvido por Stolf *et al.* (2014) que permite calcular a resistência à penetração. Os dados de umidade

e densidade que são determinados por análises de laboratório, são levados em conjunto com os dados de resistência e com a ajuda da curva de compactação o operário pode determinar o grau de compactação que tem o solo.

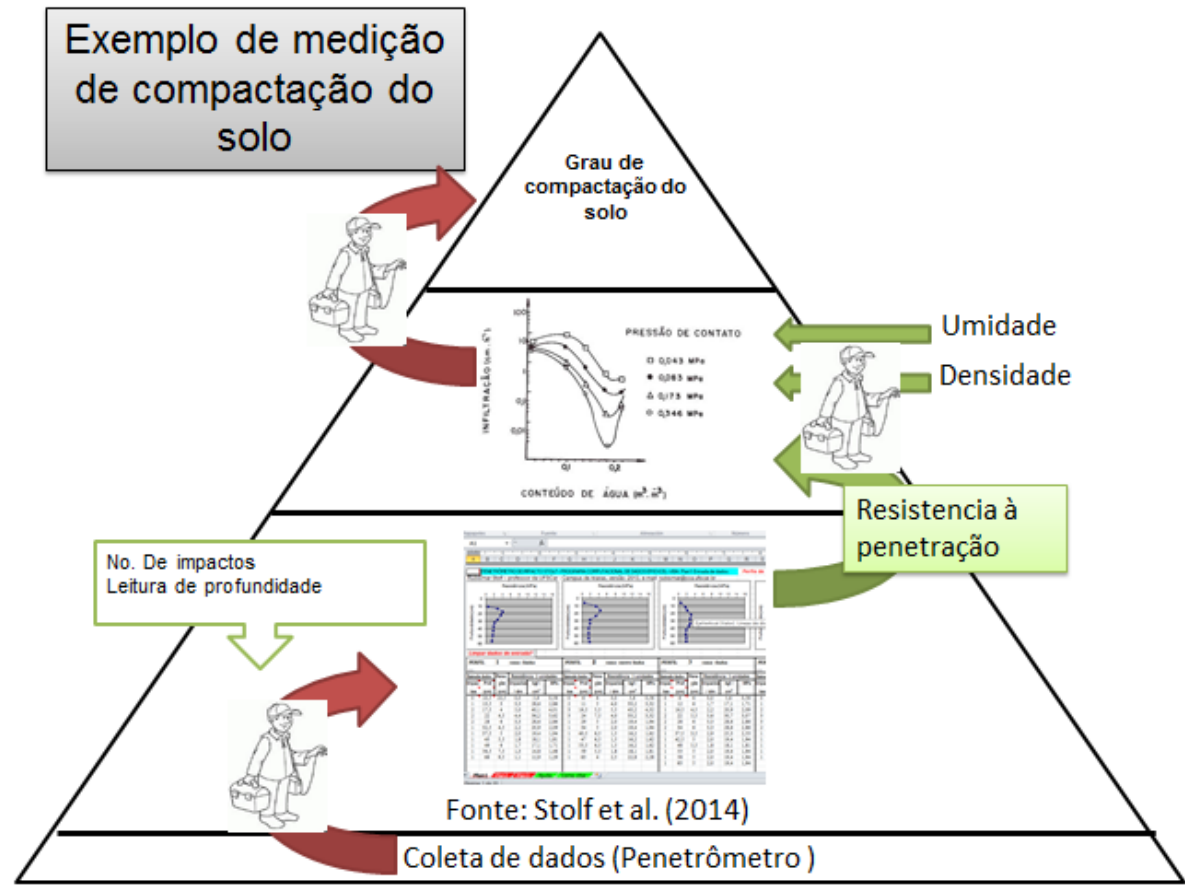


Figura 4:Exemplo de Medição de medição da compactação do solo.

A estimativa final da compactação significa prever o estado final do solo a partir de condições iniciais que o mesmo fornece. A condição final reflete o estado de degradação e o nível de compactação. Nessa conjuntura, pode-se afirmar que é preciso desenvolver um instrumento de medição da umidade e a resistência do solo que possibilita avaliar de forma simples o estado de compactação, baseado no princípio de funcionamento do penetrômetro, utilizando um Modelo de Desenvolvimento de Produto Mecatrônico que permita abarcar todas as necessidades do instrumento em cada uma das etapas do modelo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é conceber um instrumento de medição da umidade e a resistência à penetração do solo possibilitando avaliar o estado de compactação do solo.

Os objetivos específicos a trabalhar serão:

1. Identificar os diferentes métodos e técnicas para o desenvolvimento de um novo instrumento de medição Umidade e Resistência à Penetração do solo.
2. Aplicar os diferentes métodos e técnicas, a serem empregados para integração do sistema, durante o projeto de desenvolvimento do instrumento de medição.
3. Desenvolver a concepção funcional do instrumento de medição.

1.3 JUSTIFICATIVA

O penetrômetro de impacto, apesar de ser uma ferramenta de medição muito útil na determinação da compactação do solo de forma indireta e de pratico uso, apresenta inconformismos no âmbito laboral especialmente no setor agrícola onde é mais frequente o uso do penetrômetro para garantir plantios de ótimas condições, aqueles inconformismos são olhados na confiabilidade da leitura da medição. Desde a década dos 80 muitos intentos de melhorar o instrumento foram feitos com grandes avances, mas ainda não se tem uma solução que integre diferentes aspectos da instrumentação para permitir melhorar as características de leitura, confiabilidade do instrumento conservando as condições iniciais de baixo custo e fácil transporte.

Para a concepção do instrumento, espera-se contribuir com a solução do problema, com a aplicação da metodologia do produto mecatrônico, utilizando os diferentes métodos e técnicas que permitiram abarcar e solucionar as necessidades do penetrômetro assim como preencher brechas de conhecimentos em relação à utilização de novas abordagens de integração de sistemas complexos em um projeto.

Com a realização deste projeto busca-se o favorecimento do setor agrícola em relação às medições da umidade, resistência à penetração e compactação do solo, e o

beneficiamento da mecatrônica com o melhoramento do instrumento em relação a os parâmetros de medição e a desenvolvimento de produtos mecatrônicos.

1.4 METODOLOGIA

A pesquisa inicia-se com a fundamentação teórica desenvolvida a partir de uma revisão bibliográfica dos principais áreas envolvidas na definição do problema de projeto apresentando no início do capítulo 1. A revisão bibliográfica é integrada por:

- Compactação do solo: onde se procurou a definição do escopo deste projeto, destacando o instrumento de medição alvo de estudo (Penetrômetro).
- Métodos e técnicas de determinação da compactação do solo: com a definição anterior do escopo de trabalho, buscou-se uma revisão dos métodos e técnicas de referência para determinar o grau de compactação do solo.
- O processo de desenvolvimento de produto mecatrônico: buscou-se uma revisão das metodologias de PDP e os modelos de referência que mais se adequassem ao desenvolvimento de produtos mecatrônicos.

A partir dessa revisão bibliográfica de metodologias para o produto mecatrônico, é proposta uma metodologia para o projeto de produto mecatrônico que traz a contribuição dos modelos de ((MONTELISCIANI, *et al.*, 2014) e (THOMPSON 2013)) na fase do Projeto Informacional e os métodos de modularização, DSM e arquitetura de produto na fase do Projeto Conceitual.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta, apresenta-se a definição das especificações-meta do produto e a solução conceitual do novo Instrumento de medição de umidade e Resistência à penetração.

Finalmente, determinou-se um planejamento para a realização dos testes funcionais da concepção do produto, tomando como referente: restrições de projeto e limitações de pesquisa.

A limitação da pesquisa refere-se ao fato da modelagem conceitual do Produto e a recursos do projeto. Ou seja, a fabricação do protótipo do instrumento não é o escopo desta dissertação, devido primeiramente aos recursos obtidos para o desenvolvimento do projeto

e à avaliação de requisitos de projeto que precisam de um trabalho contínuo do protótipo para serem medidos em condições reais de operação em relação a um período prolongado que extrapola o tempo de desenvolvimento desta dissertação. No entanto, isso não foi um fator determinante para evitar analisar e testar as principais funções da modelagem conceitual através da Fase de Projeto Preliminar.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

CAPITULO 1 – Traz a contextualização introdutória do problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos, além da justificativa do mesmo.

CAPITULO 2 – **“Diferentes métodos e técnicas de leitura de compactação do solo”**, apresenta a revisão da literatura de documentos técnicos, artigos científicos, etc. sobre as diferentes técnicas e métodos utilizados para a leitura da compactação do solo, tipos de penetrômetro, produtos similares e patentes.

CAPITULO 3 – **“O processo de desenvolvimento de produto mecatrônico”**, apresenta a fundamentação teórica sobre diferentes metodologias de desenvolvimento de produto, e os modelos para o processo de desenvolvimento de sistemas mecatrônicos, O objetivo alcançar é identificar entre os modelos, qual é a melhor metodologia para a concepção do instrumento de medição.

CAPITULO 4 – **“Projeto Informacional e Projeto Conceitual”**, apresenta o desenvolvimento do Projeto Informacional onde o objetivo principal é a definição das especificações-meta do produto, e o Projeto Conceitual que tem como finalidade a concepção do produto.

CAPITULO 5 – **“Planejamento e execução dos testes funcionais”**, apresenta os resultados do projeto preliminar, onde foram definidas as ferramentas para obter as interfaces de integração entre o instrumento de medição, o processador e a programação a ser utilizada. Além disso, são desenvolvidos os testes funcionais do produto.

CAPITULO 6 – **“Conclusões e recomendações para trabalhos futuros”**, apresenta as considerações e conclusões finais do projeto desenvolvido e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – DIFERENTES MÉTODOS E TÉCNICAS PARA A DETERMINAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO.

Existem diferentes métodos e técnicas de medir a compactação do solo. Em sua maioria envolvem análises de laboratório utilizando diversos parâmetros físicos do solo como um tipo de indicativo para determinar a compactação do solo, como a densidade, porosidade, a resistência à penetração que pode ser medida em campo com instrumentos como os penetrômetros. O capítulo apresenta os modelos e técnicas mais utilizados na determinação da compactação do solo.

2.1 POROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO

A densidade é considerada a medida mais importante para determinar a compactação do solo. Segundo Camargo e Allenoi (2006) Pode-se dizer, com certa restrição, que a densidade é a medida quantitativa mais direta da compactação. A densidade do solo (d_s) tem sido usada como medida da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros atributos, como porosidade, umidade do solo, condutividade hidráulica etc. (PIRES *et al.*, 2011; COSTA *et al.*, 2007). Dentre os métodos de determinação da densidade do solo, o de maior utilização e considerado padrão, é o do anel volumétrico (MAV), o qual consiste na amostragem de solo com estrutura indeformada num anel (cilindro metálico) de volume conhecido (PIRES *et al.*, 2011). O anel é introduzido no perfil ou no próprio solo, por pancadas ou por pressão, sendo retirado, posteriormente, com excesso de terra. Este excesso é depois removido, a fim de que o volume ocupado pelo solo seja exatamente o volume do anel. Em seguida, transfere-se a terra para um recipiente, no próprio campo, deixando o anel disponível para realização de outras coletas. Após secagem, em estufa da terra coletada, obtém-se a massa de terra seca e, com o volume conhecido, obtém-se a densidade do solo, através de uma equação (CAMARGO; ALLENOI, 2006). Na remoção do anel volumétrico, deve-se tomar o maior cuidado para evitar compactar a amostra.

Existem além do método do anel, outras técnicas e métodos na procura de melhores resultados para determinar a compactação do solo, como o método do torrão parafinado (MTP), segundo Pires *et al.* (2011) o método consiste na coleta de torrões de

volume variável, secos ao ar, e impermeabilizados com parafina líquida. A técnica da Tomografia Computacional (MTC) que é um tipo de técnica nuclear, utilizada na agricultura mais de uma década atrás e que utiliza raios gama na validação da compactação do solo. O MTC permite a determinação dos valores médios de parâmetros físicos do solo e a identificação e localização exata da ocorrência de heterogeneidade (gradiente de densidade ou de umidade) (PIRES *et al.*, 2011). Segundo Camargo e Allenoi (2006), a Tomografia Computadorizada pode ser utilizada com sucesso, pois foi sensível, precisa, não destrutiva e possibilitou a medida da densidade e da umidade do solo em amostras indeformadas. Além disso, mostrou-se superior ao penetrômetro de impacto, tanto na resolução, quanto no tipo de informações geradas.

Outro método de determinação baseado em técnicas nucleares é a utilização de sondas de superfície nêutron-gama (MSN), as quais são empregadas para medidas da densidade de solo para camadas de até no máximo, 0,30 m de profundidade. O uso de sondas no campo permite repetir as medidas tanto quanto desejado, sem destruição das amostras, facilitando seu uso em solos cultivados (PIRES *et al.*, 2011).

2.2 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

Inúmeros autores sugerem que a compactação do solo seja identificada por meio de atributos do solo, como a densidade do solo, distribuição de poros por tamanho, estabilidade de agregados em água e pela resistência mecânica do solo à penetração (com a finalidade de verificar a existência de camadas de maior resistência e o potencial para o desenvolvimento das raízes). Estes tradicionais atributos apenas identificam as camadas compactadas sem, entretanto, quantificar a capacidade de suporte de carga dos solos (MIRANDA, 2006).

A resistência do solo à penetração é um índice integrado da compactação do solo, umidade, textura e tipo de conteúdo de argila. É uma determinação que implica a consistência e a estrutura do solo (TORRES & SARAIVA, 1999).

Através dos penetrômetros pode-se quantificar e monitorar a compactação para um manejo adequado dos solos. No entanto, a resistência dos solos medida por penetrômetros está correlacionada com a densidade do solo e é função também do teor de umidade. Por

isso, é necessário que sejam feitas medidas da umidade do solo quando da determinação da resistência (MANIERI, 2005). Este tipo de medições é considerado um método secundário para determinar a compactação do solo, como dizem Camargo e Allenoi (2006), a resistência do solo à inserção de um penetrômetro é, assim como a infiltração da água, um método secundário na avaliação da compactação.

Existem diferentes tipos de penetrômetros que são utilizados para determinar as propriedades físicas do solo como: penetrômetro dinâmico, estático, o penetrógrafo e o penetrômetro de bolso.

2.2.1 Penetrômetro Dinâmico

Apresentam princípio de penetração no solo diferente dos estáticos, pois a penetração é proporcionada por impactos de um corpo metálico que cai de altura constante em queda livre. Nesse caso, o número de impactos necessário para que a haste atravessasse determinada camada de solo varia em função da resistência oferecida pelo mesmo, razão do nome “dinâmico”. Tais equipamentos independem da força física do operador e dispensam aparatos eletrônicos sofisticados (CAROLINO; GOMES, 2007). Os penetrômetros Dinâmicos segundo Vaz, *et al.* (2002), tem sido bem menos utilizados, de um modo geral, no mundo, em estudos agrônômicos, sendo mais aplicados em avaliações de solos para fins de construção de estradas e geotécnica. O incremento de sua utilização para estudos de solos agrícolas foi impulsada por Stolf com o desenvolvimento de um penetrômetro de impacto. O penetrômetro de impacto foi lançado no mercado em 1982 tornou-se de importância para o setor agrícola por publicações técnicas que abordavam aspectos práticos em relação a uso do penetrômetro (STOLF *et al.*, 2014).

2.2.2 Penetrômetro estático

O fundamento é igual ao penetrômetro dinâmico, mas a penetração do solo é feita de forma contínua e normalizada. Segundo Vaz, *et al.* (2002) quando a penetração é realizada com velocidade constante, com um sistema hidráulico ou elétrico-eletrônico ou mesmo manual (neste caso o usuário tenta imprimir uma penetração no solo com velocidade constante, o que na maioria das vezes é difícil de obter). Em relação do estudo do solo e agronomia, são os equipamentos mais utilizados. Segundo Vaz, *et al.* (2002), os penetrômetros estáticos são os mais utilizados em ciência do solo e agronomia e são equipamentos caros e sofisticados quando em versões automáticas e no caso das versões manuais tem-se a dificuldade da inserção com velocidade constante.

2.2.3 Penetrógrafo

É uma ferramenta para medir a força de penetração do solo e é particularmente adequado para engenharia civil e para aplicações. A profundidade operacional depende do comprimento da haste e as condições do solo; No entanto, podem-se explorar profundidades de até 80 cm. Ao longo dessa profundidade se tem medições contínuas, registrando a força encontrada nas diferentes camadas do solo. Tem a capacidade de armazenar informações em formato digital e gerar gráficos no andamento das operações, tornando-se um trabalho de campo mais rápido e preciso (VÁSQUES, 2010).

2.2.4 Penetrômetro de bolso

É um tipo de instrumento utilizado para determinar a compactação do solo em níveis de compactação superficial, é um tipo de instrumento ideal para trabalhos de compactação cuja profundidade seja pelo menos até 5 mm, para determinar o perfil físico do solo.

O princípio do penetrômetro é baseado na resistência do solo à penetração de uma haste, após recebimento de um impacto provocado pelo deslocamento vertical de um bloco de ferro colocado na parte superior da haste, por uma distância conhecida, normalmente 40 cm (CAMARGO; ALLENOI, 2006).

Como a prática dos penetrômetros é cada dia mais frequente para o estudo da compactação de solos agrícolas, é importante tomar certos cuidados, como dizem Camargo e Alleno (2006) devem ser tomados certos cuidados para evitar invalidez nas medições feitas com este tipo de instrumentos, como por exemplo, a resistência ao penetrômetro é influenciada pela textura do solo, penetrômetros diferentes, em solos iguais, dão medidas diferentes da resistência do solo.

2.3 UMIDADE

O teor de umidade do solo é a relação entre a massa das partículas e massa de água acumulada, o que poder ser expressa em termos de percentagem em relação à massa ou o volume de solo (VÁSQUEZ, 2010). O nível hídrico do solo pode ser expresso por:

- **Unidade de massa no solo ou Umidade gravimétrica (W).** É a relação entre a massa de água (Ma) e a massa de atrito sólido (Ms).

$$W=Ma/Ms.$$

- **Unidade de volume no solo ou Umidade volumétrica (θ_V).** Relação entre o volume de água (Va) e o volume de amostra (Vs).

$$\theta_V= Va/Vs.$$

Um dos problemas associados à compactação do solo é a redução da condutividade hidráulica. A taxa de infiltração de água no solo, que serve como indicação de sua condutividade hidráulica, é influenciada por outros fatores do solo, tais como a formação de crostas na superfície que provocam sensível diminuição na quantidade de água que penetra no perfil. A condutividade hidráulica serve, então, como medida comparativa para avaliação da compactação, usando o mesmo solo e a mesma quantidade de água (CAMARGO; ALLENOI, 2006).

Quando o solo encontra-se seco; a pressão de contato de máquinas ou de implementos afeta muito pouco a taxa de infiltração. Entretanto, como o teor de água vai aumentando, a infiltração vai diminuindo até um valor mínimo, a partir do qual passa novamente a subir, devido ao efeito da água no volume do solo, de maneira semelhante ao exposto para a curva de compactação do solo (CAMARGO; ALLENOI, 2006).

Existem métodos alternativos para medir o teor de água e a condutividade hidráulica no solo, como o tensiômetro, a sonda de nêutrons e as TDR.

2.3.1 Tensiômetro.

De todas as técnicas e métodos utilizados para conhecer o potencial de água no solo, o tensiômetro é o mais utilizado. Empregado para medir a tensão com que a água está retida pelas partículas do solo, também conhecido por potencial matricial. Dispondo-se da relação entre o conteúdo de água no solo e a tensão em que ela se encontra pode-se estabelecer, indiretamente, o teor de água no solo a partir das leituras desse aparelho (DE AZEVEDO; DA SILVA, 1999).

2.3.2 Sonda de nêutrons.

A técnica de moderação de nêutrons aplicada à determinação da umidade do solo já vem sendo usada há mais de três décadas (LARAIA, 2009). É uma técnica muito utilizada por ser considerada pouco destrutiva no estudo da umidade e balanço hidráulico no sector agrícola, além, é considerada perigosa por utilizar uma fonte nuclear. Seu princípio é bastante simples, estando baseado na perda de energia dos nêutrons rápidos através de choques com os núcleos leves no sistema solo-água-ar. Este princípio de perda de energia do nêutron é chamado de moderação de nêutrons. Em geral, utiliza-se uma relação empírica entre a contagem de nêutrons térmicos ou moderados e a umidade do solo (LARAIA, 2009).

A determinação da umidade envolvendo a moderação de nêutrons foi descrita por Laraia (2009) e consiste em uma fonte de nêutrons rápidos introduzida em uma massa de material (por exemplo, o solo). Os nêutrons formados se chocam com as partículas constituintes desse material sofrendo espalhamento por colisões inelásticas com os núcleos mais leves como o hidrogênio da água presente no meio, ocorrendo a perda de energia até que esta seja comparável com a energia do movimento térmico dos núcleos desses constituintes. A energia dos nêutrons resultantes é menor que 0,1 MeV (nêutrons térmicos). Os movimentos dos nêutrons rápidos formam uma "nuvem" no interior do material, de formato relativamente esférico, mas com dimensões incertas, porém, sabe-se que o raio dessa esfera está relacionado com a quantidade de água presente no solo. Essa nuvem é denominada "esfera de influência" (LARAIA, 2009, p. 34).

2.3.3 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).

A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido mundialmente utilizada para a determinação da umidade e condutividade elétrica dos solos, em substituição às técnicas de moderação de nêutrons e gravimétricas. As principais vantagens da TDR são a não utilização de radiação ionizante, a possibilidade de automação das análises, a multiplexação de diversas sondas num único equipamento e a pouca influência da textura e da densidade do solo na determinação da umidade (VAZ, CARLOS MANOEL, *et al* , 2004).

A determinação do conteúdo de água do solo é obtida a partir da estimativa da constante dielétrica calculada, usando-se a técnica da reflectometria no domínio do tempo; este valor é baseado no tempo de emissão/reflexão de um pulso eletromagnético, emitido por um gerador de pulsos, em hastes metálicas paralelas ou não, que servem como guia de ondas. A constante dielétrica determinada será a do material entre as hastes metálicas, i.e. a do solo. A configuração da sonda com suas hastes assemelham-se à construção de um capacitor, em que o material dielétrico é próprio solo (PEREIRA, SIDNEY, *et al.*, 2006).

2.4 MÉTODO ALTERNATIVO OU EXAME DE TRINCHEIRAS.

A maneira mais simples de se identificar camadas compactadas no campo é a abertura de trincheiras e a observação superficial ou pé-de-grade. Nesse caso quando a compactação limita o crescimento radicular, é possível observar grande concentração de raízes na camada superficial, pois elas não conseguem ultrapassar a camada compactada, o que predispõe a cultura a veranicos ao se cutucar a parede da trincheira como uma faca ou canivete é possível constatar maior resistência do solo na camada compactada (SÁ, SANTOS JÚNIOR, 2005).

Segundo Camargo e Allenoi (2006), o método pode ser utilizado para diagnosticar o perfil de um solo após o cultivo com determinadas culturas, principalmente as perenes e semi-perenes, como citros, café e cana de açúcar.

Esse método apresenta limitações uma vez que possibilita apenas identificar uma camada compactada sem, contudo, caracteriza-la. Ou seja, não é possível definir qual o grau de compactação e quanto este estaria afetando o crescimento e a produtividade da cultura, bem como decidir com segurança sobre a necessidade de alguma operação motomecanizada para descompactação do solo. (SÁ; SANTOS JÚNIOR, 2005).

2.5 CURVA DE COMPACTAÇÃO.

A curva de compactação, esta relacionada diretamente com a determinação da umidade. Contribuindo altamente na determinação da compactação do solo. A curva de compactação do solo é determinada pelo ensaio de Proctor, normal ou modificado, amplamente empregado na engenharia civil; entretanto, seu uso agrônômico apresenta

limitações já que a configuração da curva parte do reuso de uma única amostra, desconsiderando a estrutura original do solo (RAMOS, FABRICIO T., *et al*, 2013).

O ensaio de proctor (normal ou modificado) é uma das muitas técnicas laboratoristas, usada para refletir as condições da compactação do solo. Segundo Marcolin e Klein (2011), o ensaio de Proctor normal é uma metodologia facilmente executável, de baixo custo e conceitualmente fácil de ser entendida.

Com a equação da curva de compactação do ensaio de Proctor normal é possível obter matematicamente a densidade do solo máxima ($D_{smáx}$), bem como, a umidade ótima para compactação com aquele nível de energia aplicada. Como ponto negativo, esse ensaio é muito trabalhoso e necessita de grande quantidade de solo para determinação da curva de compactação, o que dificulta sua realização (MARCOLIN; KLEIN, 2011).

2.6 PRODUTOS CONCORRENTES E SIMILARES: MEDIDORES DE UMIDADE E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO PARA AVALIAR A COMPACTAÇÃO DO SOLO

A aquisição de informações em relação ao projeto está orientada sob: Procura de patentes sobre o projeto que se pretende projetar; procura de métodos e tecnologias disponíveis para a fabricação do produto e procura de informações sobre produtos similares.

Esta procura é apoiada pela internet em “sites” de empresas produtoras de todo o tipo de produtos. Além da internet, é importante a procura de patentes diretamente nos escritórios especializados ou Institutos de Patentes (INPI ou equivalentes) no país onde o produto vai ser produzido e/ou comercializado. No tocante sobre os produtos similares, devem-se procurar ofertas e catálogos dos concorrentes, assim como a maior quantidade de informação possível do produto que pretendesse projetar.

2.6.1 Produtos de referência

Existem diferentes instrumentos no mercado para avaliar o estado de compactação do solo medindo a umidade e resistência à penetração, esses instrumentos são usados em

ambientes laboratoriais e de campo exigindo necessidade de pessoas treinadas para manuseá-los, como exemplos.

- **Minitomógrafo (Embrapa Instrumentação).**

O sistema computadorizado de raios x ou gama permite análises não destrutivas de forma não invasiva, tanto no modo bidimensional como tridimensional (Figura 5). O instrumento analisa a umidade e a densidade de amostras de solo, madeira, a difusão de água no solo ou meios porosos correlatos, faz estudos de compactação de solos, por meio natural ou por máquinas agrícolas, com a possibilidade da fonte e do detector ficar do mesmo lado da amostra.



Figura 5: minitomógrafo.

Fonte: <http://portal.cnpdia.embrapa.br/tecnologias-e-produtos>

- **Minirhizotron (Embrapa Instrumentação).**

É um sistema que permite filmar dentro do solo através de uma microcâmera. É muito utilizado para análise de raízes. É muito utilizado no exterior para o estudo do desenvolvimento de plantas, através do monitoramento do sistema radicular (Figura 6).



Figura 6: Minirhizotron.

Fonte: Fonte: <http://portal.cnpdia.embrapa.br/tecnologias-e-produtos>

- **Tomógrafo de Campo.**

A Embrapa desenvolveu o Tomógrafo Computadorizado Portátil campo (Figura 7), para Estudos de Solos e Plantas. O equipamento permite a análise detalhada de solos – compactação, umidade e raízes. A técnica tomográfica, além de não destruir a amostra, permite a visualização no próprio local.



Figura 7: Tomógrafo de campo.

Fonte: Fonte: <http://portal.cnpdia.embrapa.br/tecnologias-e-produtos>

As imagens ainda possibilitam, em qualquer localização do campo experimental, estudar a distribuição de densidades, estrutura do solo, visualização não destrutiva das raízes, seleção de matrizes de árvores, ataques de cupins e formigas no interior de árvores, identificação, medição dos materiais componentes.

O Tomógrafo Portátil leva a técnica de Tomografia Computadorizada, já consagrada na medicina e com excelentes resultados de laboratório em Ciência do Solo, ao campo experimental da agricultura.

- **Medidor Eletrônico de Compactação do Solo (PenetroLOG PLG1020; FALKER).**

É uma ferramenta que permite detecção rápida e precisa de camadas compactadas, com operação manual, destina-se a trabalhos de pontos específicos.

O equipamento PLG1020 (Figura 8) permite a detecção de áreas de solo compactado através da medição eletrônica da força de resistência à penetração (Índice de Cone) juntamente com a medição de profundidade. Um receptor GPS pode ser conectado ao equipamento para o registro da localização geográfica de cada medição, incluindo informações de latitude, longitude e altitude. Os dados podem ser transferidos para um computador via interface serial, para visualização e análise.



Figura 8: PenetroLOG PLG1020.

Fonte: <http://www.falker.com.br/produto-penetrolog-medidor-compactacao.php>

O medidor segue as recomendações da norma internacional ASAE S.313.3, que especifica as regras e procedimentos para a medição de compactação do solo. É composto de um módulo eletrônico acoplado a uma haste dividida em duas partes, com um cone na ponta inferior. Há três tipos diferentes de cone, para serem usados de acordo com a condição do solo.

- **SoloStar (PLG5500 – Sistema Automatizado para Medição de Compactação; FALKER).**

Permite a realização de medições de compactação em grandes áreas de forma rápida e automatizada. O sistema automático foi projetado para que possa ser instalado em uma grande variedade de veículos que são utilizados em campo (Figura 9). O equipamento permite a detecção de áreas de solo compactado através da medição eletrônica da resistência à penetração (Índice de Cone) juntamente com a medição de profundidade. Os dados podem ser transferidos para um computador, para visualização e análise.

A medição tem início quando a ponta do cone toca o solo e é encerrada quando alcançados 60, 40 ou 20 cm de profundidade (de acordo com a configuração), sendo os dados salvos na memória de modo automático e retornando à posição inicial automaticamente. O equipamento possui proteção contra excesso de força.



Figura 9: SoloStar - PLG5500

Fonte: <http://www.falker.com.br/produto-solostar-sistema-compactacao.php>

2.6.2 Projetos de instrumentos medidores de umidade e resistência à penetração para avaliar a compactação do solo

Através de pesquisas realizadas em revistas como Soil and Tillage Research, Soil Science Society of America Journal, Computers and electronics in agriculture, Base de Dados da Capes e ScienceDirect (Elsevier), foram selecionados alguns artigos que tratam de instrumentos de medição de umidade e resistência à penetração, usando o penetrômetro como foco principal, desenvolvidos através de instituições de ensino e pesquisa. Assim, os artigos mais relevantes à pesquisa foram:

- **Medição simultânea da resistência à penetração de solo e teor de água com uma sonda de umidade – TDR combinada com o penetrômetro.**

Foi desenvolvida uma sonda de umidade, que utiliza a técnica de reflectometria do domínio de tempo (TDR) para determinar o teor de água e sua influência na resistência à penetração do solo. A sonda TDR enrolada na haste do penetrômetro consiste de dois fios de cobre paralelos, cada 0,8 mm de diâmetro e 30 cm de comprimento, enrolado em torno de um núcleo de 5 cm de comprimento de cloreto de polivinila (PVC) com uma separação de 3mm entre os fios (Figura 10).

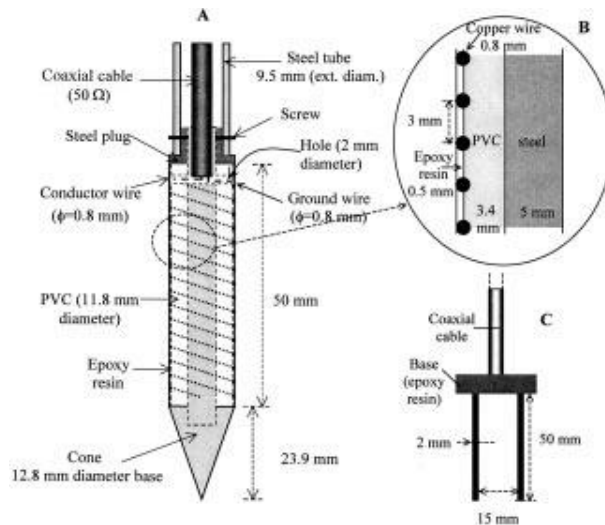


Figura 10: Sonda de umidade acoplada no penetrômetro de impacto.

Fonte: Vaz & Hopmans (2001)

As curvas de calibração relacionando a constante dielétrica aparente do solo medida pela sonda enrolada para o conteúdo de água foram obtidas em laboratório. Subsequentemente, testes de campo foram realizados para medir simultaneamente a resistência à penetração (RP) e o teor de água ao longo de um perfil do solo. Os resultados mostraram um perfil de teor de água detalhada com excelente correlação com o método gravimétrico, ao passo que a distribuição da profundidade de PR foi semelhante ao de densidade a granel de sólidos determinado a partir de amostras de solo.

- **Penetrógrafo eletrônico automático.**

Construído para operar de forma automática. Ele possui incorporado, um sistema dedicado de aquisição de dados, que pode armazenar até 187 ensaios e uma interface de comunicação, dispensando a conexão ao microcomputador ou “datalogger” (Figura 11).

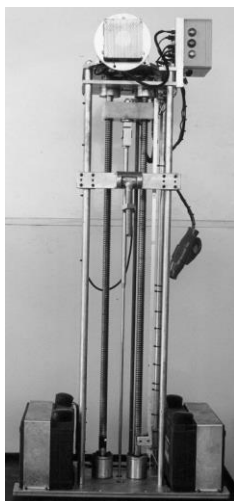


Figura 11: Penetrógrafo eletrônico.

Fonte: Bianchini, *et al.* (2002)

Segundo Bianchini et al. (2002, p.333) o princípio do penetrógrafo:

Consiste na utilização de dois parafusos de potência, com 1,00 m de comprimento, que se encarregam de deslocar um cabeçote ao qual está presa a haste do cone. Entre o cabeçote e a haste foi colocada uma célula de carga tipo S, com capacidade de 2.000 N (a célula apresentou, na calibração, um erro total combinado para compressão de 0,14 %). Como fonte de potência foi utilizada um motor de 12 Vcc, 300 W a 3.000 rotações min. Um sistema de transmissão tipo parafuso sem-fim foi colocado entre o motor e os parafusos de potência, com a finalidade de reduzir a rotação e permitir o deslocamento do cabeçote a uma velocidade de 30 mm s⁻¹. No sistema de transmissão colocou-se um transdutor indutivo modelo SL-22 G1 1PA, que emite um pulso a cada 2,5 mm do deslocamento do cone de penetração.

- **Penetrômetro dinâmico automatizado - versão eletrônica.**

O objetivo da Embrapa Instrumentação Agropecuária foi desenvolver um instrumento que reúne qualidades desejáveis tanto para aplicações em pesquisa como ferramenta de diagnóstico para o manejo sítio-específico. Assim, foi desenvolvido um

penetrômetro automático combinado com sensor de umidade capacitivo para a medida simultânea da umidade e a resistência à penetração, apontando ao uso mais eficiente e adequado do instrumento para avaliação da compactação do solo. O equipamento está desenvolvido sobre um carro de rodas (Figura 12) que pode ser tracionado por trator ou quadriciclo. A estrutura é articulada com um motor elétrico; uma embreagem eletromagnética; duas baterias automotivas 12 V – 36 A.h.; uma caixa do sistema eletrônico (e) e um sensor ultrassônico que mede o deslocamento da haste a partir de uma referência fixa.



Figura 12: Penetrômetro automatizado.

Fonte: Naime, *et al.* (2006)

Segundo Naime et al. (2006), a configuração básica do instrumento é composta de um penetrômetro de impacto e um sensor de umidade instalado logo acima do cone da haste do penetrômetro. A penetração da haste é proporcionada pelo impacto de uma massa de 6,5 Kg em queda livre da altura constante. A cada impacto são registrados os valores de deslocamento, os quais são convertidos em resistência à penetração (MPa) utilizando a equação de Stolf.

- **Utilização de um Sistema de fusão de triplo-sensor para medição da compactação do solo.**

Neste estudo, um novo sistema de fusão de sensores é proposto que combina um penetrômetro horizontal com sonda única, um sensor dielétrico de umidade do solo e um

sensor de raios-g para a medição simultânea da resistência à penetração, umidade volumétrica e o teor de argila, respectivamente (Figura 13).

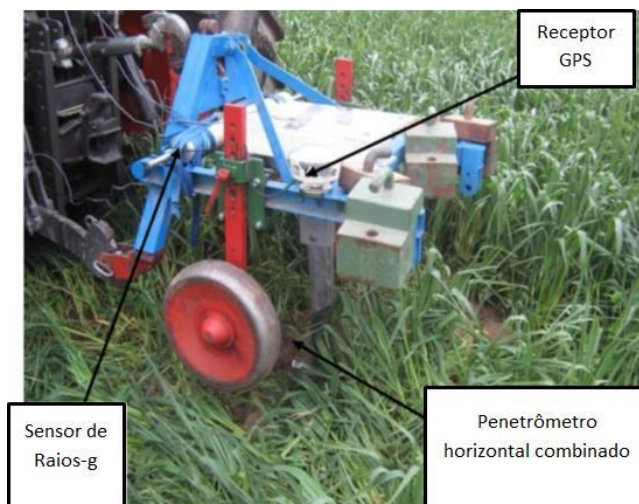


Figura 13: Sistema de fusão de triplo-sensor para medição da compactação do solo.

Fonte: Naderi-Boldaji, *et al.* (2013).

A Figura mostra o penetrômetro horizontal combinado e o Mole em um único frame. O sensor da toupeira (raios-g) foi colocado em frente do penetrômetro horizontal tal que a sua altura de trabalho foi aproximadamente 0,5 m quando o penetrômetro trabalhou em uma profundidade de 0,25 m. Duas rodas de calibre metálicos na armação manteve a profundidade desejada do instrumento durante as medições de trabalho. Um receptor de GPS (AgGPS 124, Trimble, precisão de posicionamento <0,5 m) foi colocado sobre a moldura para fornecer sinais de posicionamento do penetrômetro e do sensor situado na toupeira. Uma fonte de alimentação de 12 V de eletricidade foi fornecida para o sistema de sensores da tomada no trator (NADERI-BOLDAJI, *et al.*, 2013).

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do estudo de pesquisa realizado neste capítulo, podem-se observar os vários métodos e técnicas de contexto laboratorial e de campo, empregados para a medição da compactação do solo, assim, como resistência e umidade. Notando que para realiza-los tem a necessidade de uma gama de equipamentos, máquinas e pessoas especializadas para realizar a tarefa.

Em síntese, o método de medição de compactação do solo que apresenta maior precisão, maior confiabilidade na obtenção dos dados e menor tempo de resposta são do tipo Nuclear. Contudo, este método envolve altos custos. Além disso, enfrenta dificuldade cultural e legal nas pesquisas de campo realizadas no Brasil. Como por exemplo, o equipamento tipo nuclear costuma ficar retido em aeroportos brasileiros, devido a legislação vigente. Produtores de produtos agroecológicos rejeitam este método de medição por questões culturais.

Logo, a partir da revisão dos métodos para medir a compactação do solo é necessário integrar duas medições a resistência a penetração e a leitura de umidade num mesmo sistema técnico.

Consideraram-se como produtos concorrentes os diversos equipamentos de pequeno porte utilizados hoje para realizar as atividades de laboratório e de campo. Mesmo que os equipamentos definidos como concorrentes não satisfaçam a todas as atividades do campo isoladamente e também possuam uma estrutura rígida, é necessário utilizar alguns modelos que estão disponíveis hoje no mercado para aproveitar toda a riqueza de informação e conhecimento utilizado na confecção das mesmas. Estes equipamentos serão tomados como padrão de comparação, para determinar algumas das características funcionais do novo produto.

CAPITULO 3 – O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO MECATRÔNICO.

O termo mecatrônica tem um significado amplo, usado para descrever e justificar a integração coordenada e simultânea existente entre diferentes ramas do conhecimento. Hehenberger e Zeman (2007) definem a mecatrônica como um campo interdisciplinar, o que caracteriza as interconexões entre engenharia mecânica, engenharia elétrica e ciência da computação de tal forma que estas interconexões são a base para a concepção de produtos e processos (Figura 14). A mecatrônica favorece a abordagem do sistema pela chamada Fusão Tecnológica, que inter-relaciona tecnologias provenientes da mecânica, instrumentação, o controle de processo, eletrônica ou processamento de dados. A interação resulta num produto novo dedicado a uma determinada aplicação.

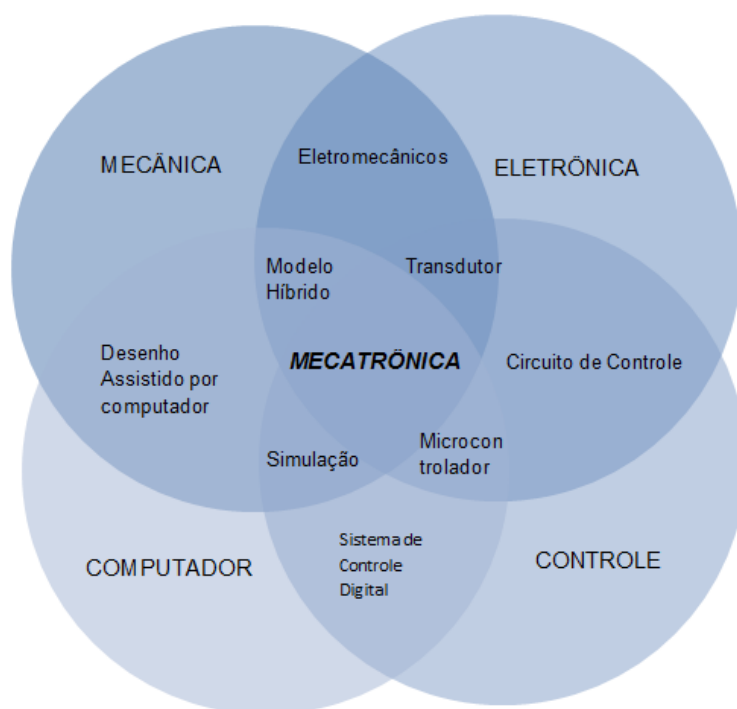


Figura 14: definição detalhada da mecatrônica para o design de produto multidisciplinar.

Fonte: Vasić e Lazarević (2008).

“Um sistema mecatrônico não se resume a apenas um casamento de sistemas elétricos e mecânicos, e é mais do que um sistema de controle: ele é uma integração

completa de todos estes sistemas na qual há uma abordagem simultânea destes no projeto.” (BOLTON, 2010, p. 11).

“À mecatrônica estão associadas áreas tecnológicas que envolvem sensores e sistemas de medidas, acionamentos e sistemas atuadores, e sistemas microprocessados, juntamente com a análise do comportamento dos sistemas e dos sistemas de controle.” (BOLTON, 2010, p. 12). Portanto, Pode-se dizer que a Instrumentação é a ciência estudada pela mecatrônica além dos Sistemas de Controle, que aplica e desenvolve técnicas para medições e controles em equipamentos e processos industriais.

A instrumentação visa a otimização e eficiência dos sistemas para a obtenção de um produto de melhor qualidade a um custo mais baixo e em menor tempo. A instrumentação é indispensável para: Incrementar e controlar a qualidade do equipamento; aumentar a produção e o rendimento do mesmo; a execução de funções de inspeção e ensaios, com maior rapidez e confiabilidade; Simplificar projetos de pesquisa, desenvolvimento e sistemas de obtenção de dados e; Fornecer sistemas de segurança para os operários, as fábricas e os processos. De acordo com isso o projeto de desenvolvimento de instrumentação pode ser executado por os modelos de desenvolvimento de produto mecatrônico.

Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre as principais metodologias de projeto de produto mecatrônico, e o estado da arte de modelos e pressupostos de integração de sistemas mecatrônicos, tal como abordagens vinculadas ao desenvolvimento de Projeto Conceitual. Por fim, é apresentada a metodologia a ser aplicada para o desenvolvimento do instrumento de medição de umidade e resistência à penetração.

3.1 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.

As principais referências para o processo de projeto de produto, com apresentação dos métodos e técnicas de apoio focam-se no projeto de sistemas mecânicos. Entre elas destacam Pahl e Beitz (2005) e Back, *et al.* (2008), as quais são apresentadas nas seguintes seções.

3.1.1 Modelo de PDP segundo Pahl & Beitz (2005).

A metodologia proposta por Pahl e Beitz (2005) descreve que é necessário um procedimento para o desenvolvimento com adequadas soluções, que seja flexível e de fácil planejar para ter como resultado um bom desenvolvimento de produto que desperte o interesse no mercado.

O modelo foi desenvolvido para a área da engenharia mecânica utilizando como diretrizes os modelos VDI 2221 e 2222, os fundamentos da engenharia de sistemas, o processo geral de solução e procedimento sistemático. O modelo sincroniza as etapas de decisão e trabalho com os requisitos do projeto.

A atividade crucial no desenvolvimento de um produto e na solução de tarefas consiste num processo de análise e um subseqüente processo de síntese que passa por etapas de trabalho e de decisão (PAHL; BEITZ, 2005).

Segundo os autores citados, o modelo divide o processo de desenvolvimento e projeto em as seguintes fases (ver Figura 15):

- 1- Definição da tarefa:** O objetivo em este estudo é esclarecer os requisitos funcionais do projeto, as grandezas de entrada e saída e os possíveis riscos ou perturbações ao problema. Parte do estudo de um problema e termina com a elaboração da lista de requisitos.
- 2- Conceber:** É definida como uma solução preliminar. É desenvolvido após da fixação e esclarecimento da tarefa, permitindo determinar uma função baseada no tipo de material, sinal e fluxo de energia. Expressa o relacionamento de entradas e saídas sem tomar em conta a solução.
- 3- Projetar:** Parte da solução preliminar, estruturando a fabricação de um produto partindo do critério técnico e econômico obtendo assim um nível mais elevado de informação. Para continuar com a fase seguinte é necessário definir os requisitos em função a custos onde precisam comportasse como variáveis.

- 4- Detalhar:** Estabelece os critérios definitivos do projeto, completando a estrutura técnica de fabricação de um produto. O resultado final desta fase é a definição da tecnologia de produção da solução.



Figura 15: fluxograma do modelo de PDP.

Fonte: (PAHL; BEITZ, 2005).

3.1.2 Modelo de Desenvolvimento Integrado de Produtos segundo Back, *et al.* (2008) (PRODIP).

Back, *et al.* (2008) propõe o modelo de Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP) também chamado de modelo de referência, procura explicar o conhecimento sobre o processo de desenvolvimento de produtos, de modo a auxiliar no entendimento e na prática do processo. Para uma maior compreensão, o modelo é descomposto em três macro fases: Planejamento do projeto, Elaboração do projeto de produto e implementação do lote piloto.

- 1- **Fase 1- Planejamento do projeto:** Abarca a elaboração do plano de projeto do produto como principal resultado desta fase.
- 2- **Fase 2- Elaboração do projeto do produto:** Descomposta em quatro fases que são:

Projeto informacional. Utiliza-se para a definição das especificas de projeto do produto, nela acontece a primeira reunião da equipe de desenvolvimento, para a apresentação do plano de projeto (BACK, *et al.*, 2008).

Projeto conceitual. Destina-se ao desenvolvimento da concepção do produto. Essa fase do projeto do produto é iniciada com a orientação da equipe de desenvolvimento a respeito das atualizações do plano do projeto (BACK, *et al.*, 2008).

Projeto preliminar. Destina-se ao estabelecimento do leiaute final do produto e à determinação da viabilidade técnica e econômica. Nesta fase da elaboração do projeto do produto, o trabalho é iniciado com a orientação da equipe de desenvolvimento a respeito das atualizações do plano do projeto (BACK, *et al.*, 2008).

Projeto detalhado. A fase está destinada a vários propósitos: (a) aprovação do protótipo; (b) finalização das especificações dos componentes; (c) detalhamento do plano de manufatura; (d) preparação da solicitação de investimento. Após a orientação da equipe a respeito das atualizações e demais, o protótipo é construído finalizando com os testes de laboratório e de campo, de acordo com especificações emitidas na fase anterior. Segundo Back, *et al.* (2008) durante a realização dos testes, são aplicadas diversas análises, como a de segurança do protótipo e/ ou componentes do produto.

3- Fase 3- Implementação do lote piloto: Fase decomposta em preparação da produção, lançamento e validação do produto. Tem como resultados principais respectivamente, a liberação do produto, a liberação do lote piloto e a validação do produto.

Preparação da produção. Fase em que se tem início a macro fase da implementação do lote inicial.

Lançamento do produto. Esta fase permite efetuar o lançamento do produto no mercado. Sendo esta a segunda fase de implementação do lote piloto, é nela que é realizada a produção do lote inicial (BACK, *et al.*, 2008).

Validação do produto. Esta fase trata da validação do produto junto aos usuários e à auditoria e da validação do projeto junto ao cliente direto. É nesta fase que o projeto é encerrado (BACK, *et al.*, 2008).

3.2 MODELOS DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS MECATRÔNICOS.

Independentemente do tipo de sistema mecatrônico, há uma necessidade de compreender os princípios fundamentais de trabalho de sistemas mecatrônicos antes de se aproximar o processo de design de um produto mecatrônico (VASIĆ; LAZAREVIĆ, 2008). A (Figura 16) permite compreender de maneira clara o princípio fundamental de trabalho de um sistema mecatrônico. Onde a base de trabalho é a parte mecânica, que transmite ou converte o processo mecânico. A informação sobre o estado do processo mecânico é obtida a través da medição (sensores). Junto com as variáveis de referência, as variáveis medidas são as entradas do fluxo de informação, o que o processo de informação converte em variáveis manipuladas para os atuadores ou em variáveis monitoradas para o controle do sistema.

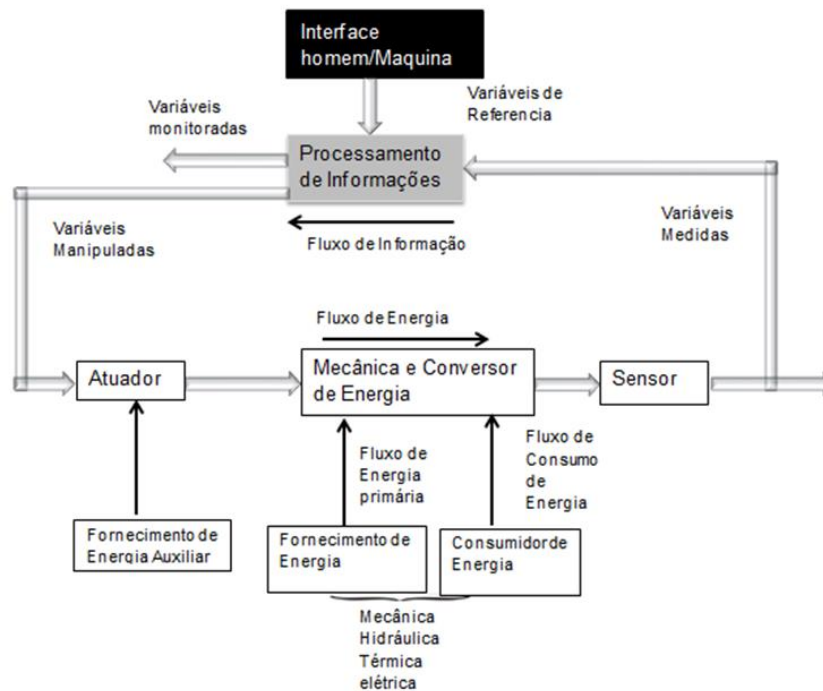


Figura 16: Princípio de trabalho da mecatrônica.

Fonte: Isermann (2008).

“Os sistemas mecatrônicos são resultado da integração das varias áreas temáticas que envolvem a automação industrial em especial, com concentração na pesquisa e desenvolvimento de projetos mecânicos e eletrônicos integrados pela informática.” (SANTANA, *et al.* 2011).

No projeto de sistemas mecatrônicos, uma das etapas é a integração de um modelo de desenvolvimento de forma que previsões possam ser feitas e antecipadas em relação ao seu comportamento.

3.2.1 Modelo V.

O processo industrial VDI-2206, é uma proposta de solução industrial para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos, orientada particularmente à Metodologia de Projeto para Sistemas Mecatrônicos, normalmente apresentado como “modelo- V” (Figura 17). Segundo Vasić e Lazarević (2008) o modelo V está composto de três partes principais: microciclo, macrociclo e módulo de processo, porém o produto mecatrônico complexo não é produzido somente em um macrociclo e sim em vários macrociclos, assim o termo “produto final” não significa apenas produto acabado, como também a concretização da maturidade do produto.

O modelo V é desenvolvido da seguinte forma: depois de analisar todos os requisitos de sistema total, as subfunções e subsistemas são definidos (ramo esquerdo do modelo V). São desenvolvidas simultaneamente pelas equipes cooperativas de desenvolvimento. Após verificam-se as subfunções e testando os subsistemas são integrados passo a passo (braço direito do modelo V). Em seguida, o desempenho do sistema integrado é verificado. Se tiver que ser melhorada, a fase de operação inicial será repetida (processo iterativo) (HEHENBERGER, *et al.*, 2010).

O objetivo é situar um conceito de solução que descreva as principais características físicas e operacionais do futuro produto.

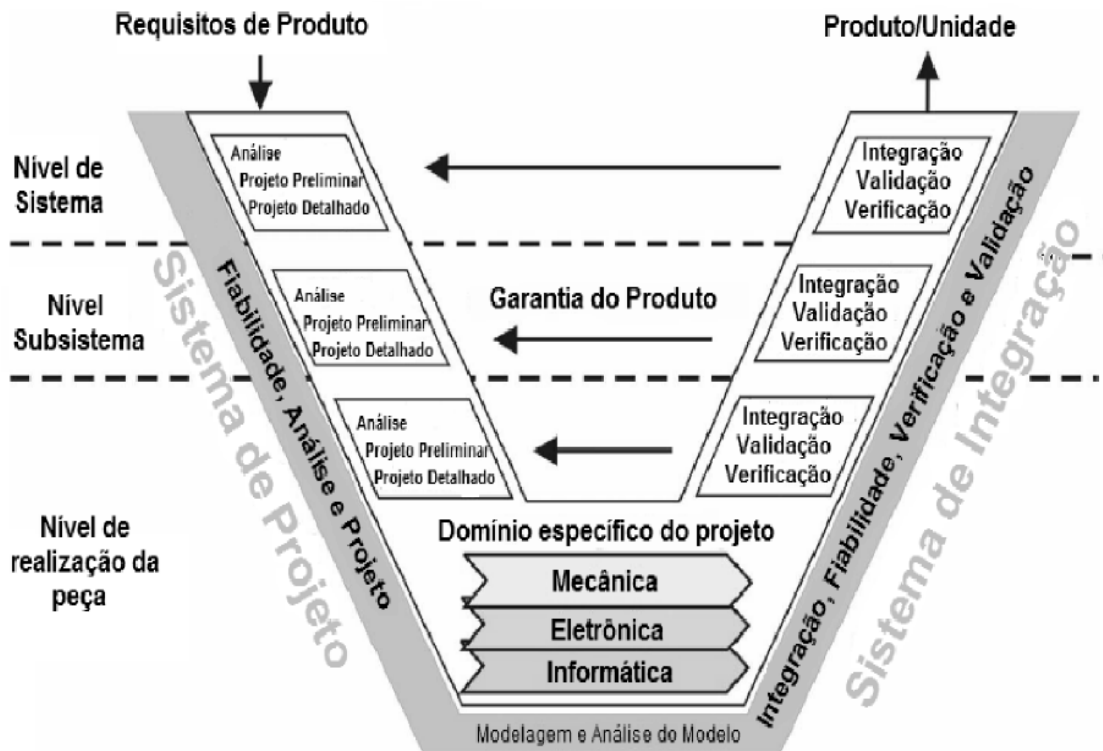


Figura 17: princípio básico do modelo V para o projeto de produto mecatrônico.

Fonte: Vasić e Lazarević (2008).

3.2.2 Modelo de 3-Ciclos.

O modelo de 3-Ciclos é um modelo proposto por Gausemeier, *et al.* (2011), (Figura 18) que consiste em três tarefas principais que são: Planejamento Estratégico do Produto; Desenvolvimento de Produto e Sistemas de Desenvolvimento de Produção. Para Gausemeier, *et al.* (2011) de acordo com suas experiências e desconsideração da metodologia de engenharia simultânea/concorrente, estas tarefas não podem ser consideradas como uma sequência rigorosa de fases e etapas. É mais uma interação entre atividades que podem ser subdivididas em três ciclos.

Primeiro Ciclo: caracteriza os passos de encontrar as potencialidades de sucesso do futuro para criar um design de produto promissor, normalmente chamado pelo autor de princípio de solução. O ciclo tem quatro tarefas principais: *foresight*, descobrir produto, projeto conceitual do produto e planejamento de negócios que utilizam como ajuda os métodos de solução, as técnicas de cenário, o método de Delphi ou análise de tendência, técnicas de criatividade e TRIZ para cumprir com as tarefas já mencionadas.

Segundo Ciclo: também chamado de “Produto Virtual”. Abarca três fases de domínio: projeto conceitual do produto, concretização do domínio-específico e integração dos sistemas. O desenho conceitual compreende o primer e segundo ciclo. Na face final os resultados são integrados em uma solução global o que leva a prototipagem virtual.

Terceiro Ciclo: chamado de “Produção Virtual/ Digital Factory”. O ponto de partida é o projeto conceitual do sistema de produção. O resultado desta fase é a solução de princípio do sistema de produção. Constitui o ponto de partida para o planejamento do processo, planejamento do local de trabalho, o planejamento de logística de produção e planejamento do dispositivo de trabalho dentro da fase de concretização. A fase de integração de sistemas de produção funde os resultados de planejamento de domínio específico para uma solução dos sistemas de produção.

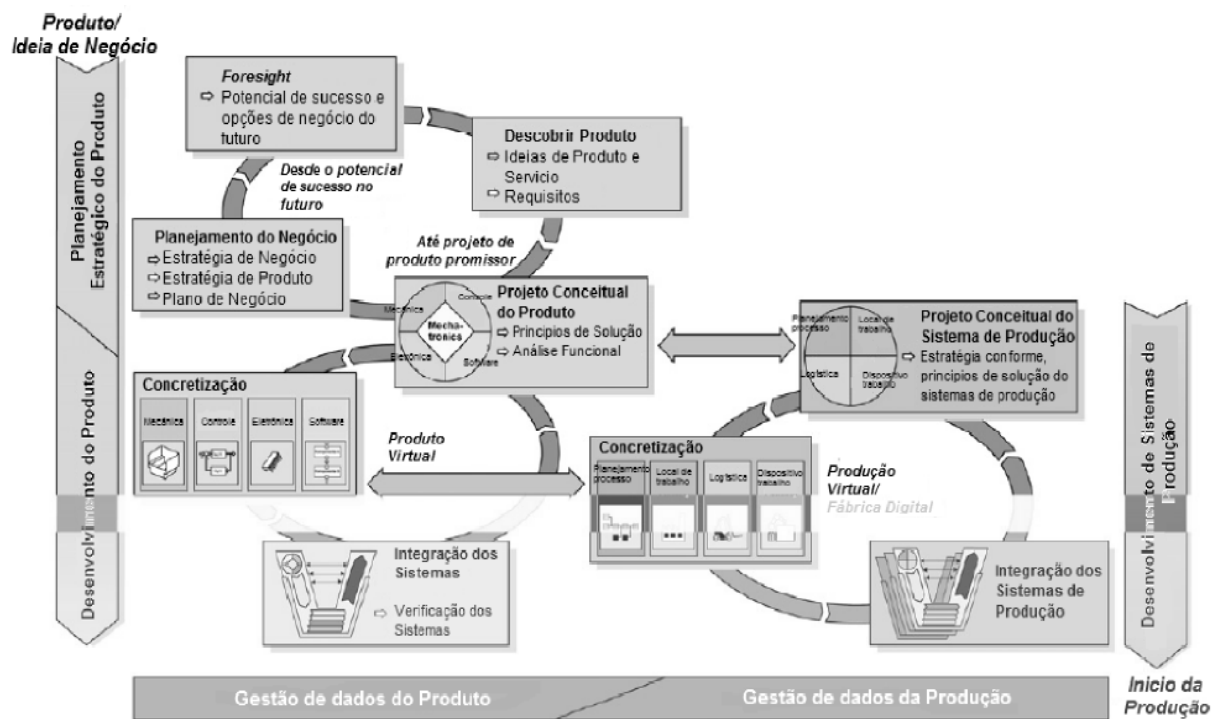


Figura 18: modelo de 3-Ciclos “3 – Cycle-Model” de engenharia de produto.

Fonte: Gausemeier, *et al.* (2011).

O autor citado desenvolve um modelo detalhado partindo do modelo de 3-Ciclos para um projeto conceitual do produto e do sistema de produção de sistemas mecatrônicos

(Figura 19). O modelo combina e sincroniza as principais fases do projeto do produto e do projeto conceitual dos sistemas de produção.

A integração das tarefas como foco central no projeto conceitual representa uma vantagem em relação como outros modelos que não apresentam esta característica em seu desenvolvimento, a qual ao momento da concepção do produto a tomada de decisão será baseada em restrições ou aspectos importantes do processo de fabricação do produto.

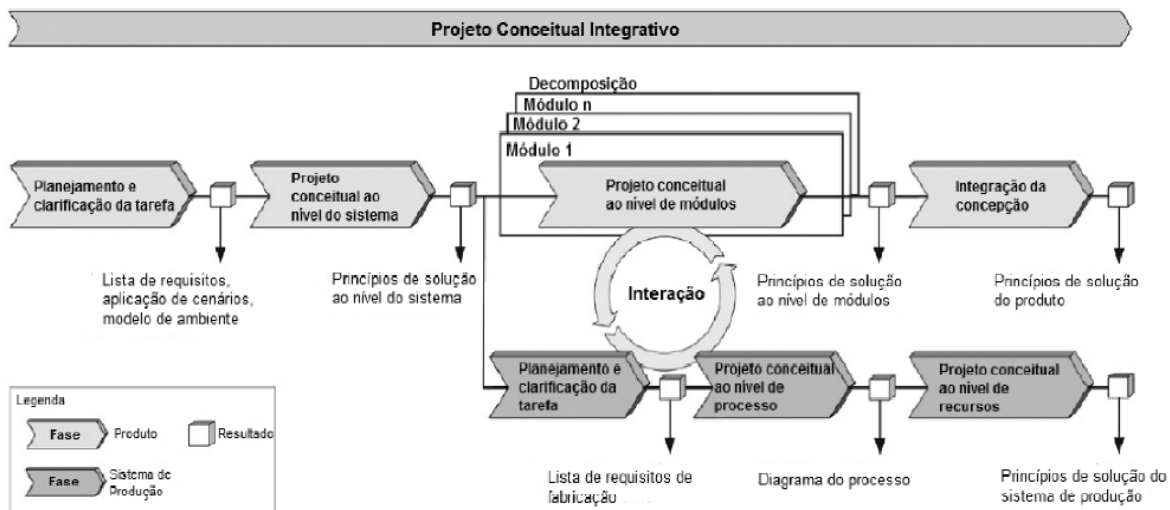


Figura 19: Projeto Conceitual Integrativo do sistema de produção e produto. (Modelo de procedimento genérico).

Fonte: Gausemeier, *et al.* (2011).

3.2.3 Modelo Hierárquico.

De acordo com Hehenberger, *et al.* (2010), um sistema Mecatrônico é definido como uma “caixa”, que compreende várias entradas e saídas de design para os diferentes requisitos de projeto. Como regra geral, os sistemas mecatrônicos são considerados complexos e devem incluir varias uniões internas entre os diferentes domínios contendo aspectos mecânicos, elétricos, de controle e outros componentes típicos dos sistemas mecatrônicos.

Uma das questões-chave no desenvolvimento de sistemas mecatrônicos moderno é a integração rigorosa de mecânica, controle, elétrica, aspectos eletrônicos e de software

(Figura 20) desde o início das primeiras fases de concepção (HEHENBERGER, *et al.*, 2010).

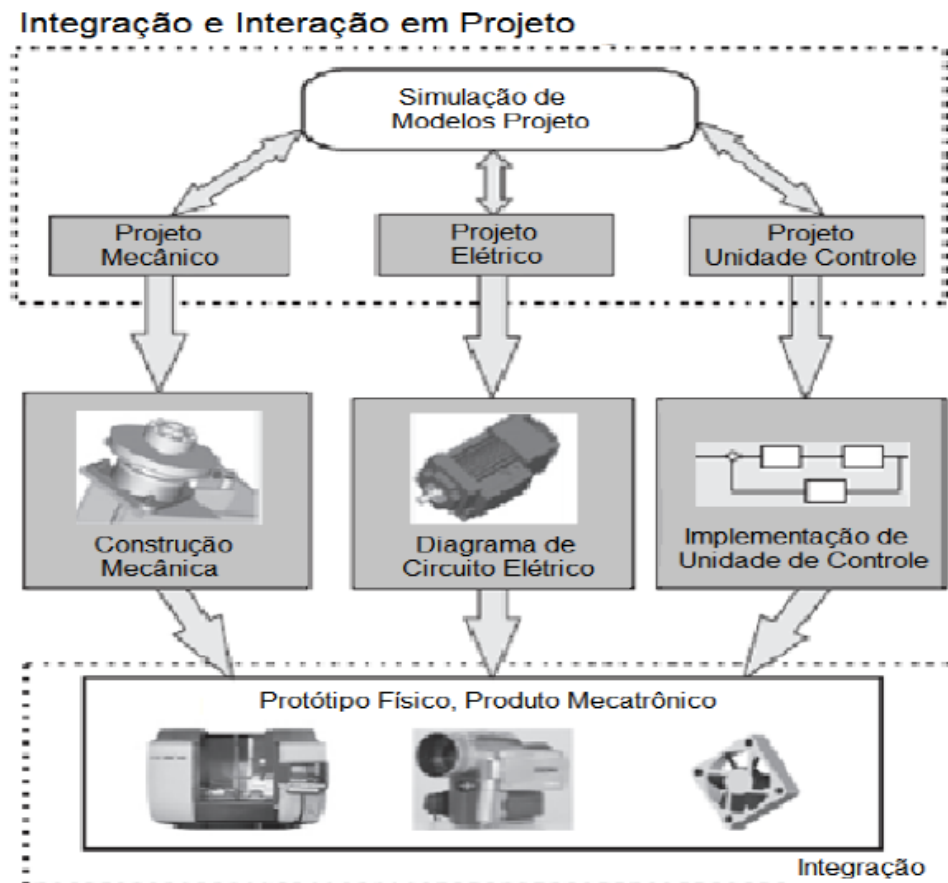


Figura 20: atividades de design Mecatrônica.

Fonte: Hehenberger, *et al.* (2010).

Por conseguinte o autor citado propõe um modelo Hierárquico para o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos o qual consiste em:

- 1. Módulo mecatrônico** (Figura 21): o sistema mecatrônico pode ser descomposto em módulos de acordo a seus domínios (mecânico, elétrico, controle, *software*). O pilar de cada módulo caracteriza um subdomínio específico que está estruturado em vários níveis hierárquicos correspondendo ao grau de detalhamento do processo.
- 2. Modelo Hierárquico para projeto conceitual:** permite considerar cada modelo como único e que tem um propósito específico. O objetivo do modelo hierárquico para projeto conceitual é servir como ferramenta para encontrar uma resposta do

projeto em questão. Os modelos consistem em um conjunto de parâmetros, bem como um conjunto de lógica e quantificação nas relações entre eles. Os modelos são importantes componentes de teorias científicas. A modelagem é o processo de estabelecimento de um modelo, que é um grande desafio e exige trabalho criativo.

- 3. Projeto Hierárquico de parâmetros:** A hierarquia dos parâmetros de projeto é investigada separadamente para cada domínio, permitindo assim que a fase de concepção seja feita através de vários estágios do projeto intermediário, o qual tem como resultado de saída a documentação completa do produto. O projeto de parâmetros pode ser classificado em duas categorias. 1- Subconjunto de parâmetros externos que representam os parâmetros de exigência para o próximo nível. 2- Parâmetros de projeto interno para o dimensionamento do componente do nível.

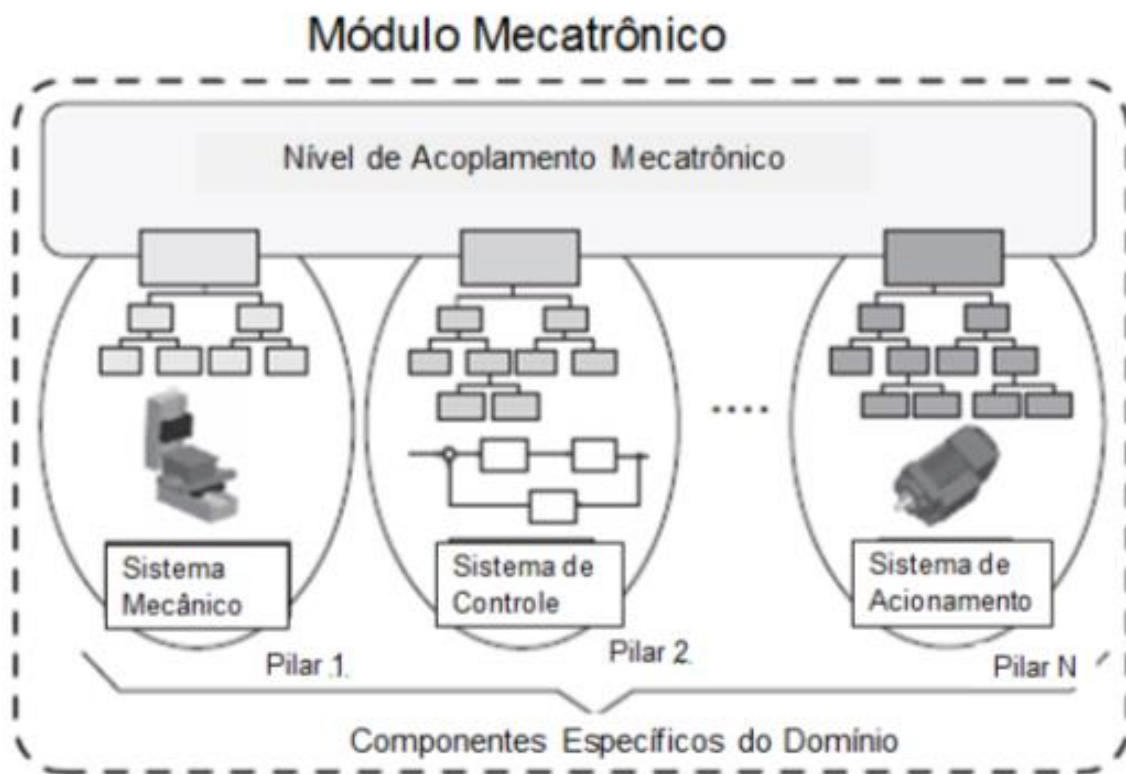


Figura 21: Módulo Mecatrônico.

Fonte: Hehenberger, *et al.* (2010).

3.3 DIFERENÇAS ENTRE AS METODOLOGIAS E MÉTODOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA FASE DE PROJETO CONCEITUAL.

Com base na revisão da literatura foram encontradas 5 (cinco) autores que abordam a fase de projeto conceitual: Back, *et al* (2008); Scalice (2003); Rozenfeld, *et al* (2008); Xu, Zou & Li (2006); Gausemeier, *et al* (2009).

A abordagem apresentada por Back, *et al* (2008) esta baseada na experiência da equipe de projeto na concepção de protótipos, inspirada em outros autores da área de Engenharia Mecânica entre eles destaca-se Ullman (1992), Pahl & Beitz (2005) e Otto & Wood (2001).

Segundo Back, *et al* (2008) recomendam quatro etapas para o desenvolvimento da fase de projeto conceitual ilustradas no Quadro 1.

Quadro 1: Atividades Projeto conceitual (Back, *et al*, 2008.).

Atividades Projeto conceitual (Back et al, 2008)	Tarefas	Métodos e técnicas
Estabelecer a estrutura funcional do produto	Definir a função global e subfunções do produto; estabelecer as estruturas funcionais alternativas; identificar, selecionar e envolver fornecedores para o desenvolvimento de princípios de solução de subfunções; analisar e selecionar estrutura funcional; adicionar informações ao sistema de documentação.	Abstração orientada; diretrizes de desenvolvimento de estrutura funcional; análise de especialista; documentos para coleta de preços, solicitação de cotação e proposta; matriz de decisão para seleção; sistema de documentação.

Continuação do Quadro 1- Atividades Projeto conceitual (Back, *et al*, 2008.).

<p>Desenvolver as concepções alternativas do produto.</p>	<p>Desenvolver princípios de solução para as subfunções; combinar princípios de solução para formar a função global; monitorar o desenvolvimento das concepções em relação às especificações de projeto; selecionar concepções mais adequadas; elaborar modelos das concepções; estimar custos das concepções.</p>	<p>Métodos Intuitivos (brainstorming, analogias, sintético, etc.); Métodos sistemáticos (Matriz Morfológica, síntese funcional, Triz, etc); engenharia reversa; critérios de combinação de princípios de solução; análise de especialista; análise de viabilidade; Métodos de seleção de soluções; estimativas de custo; sistema de documentação.</p>
<p>Selecionar a concepção para identificar processos de fabricação internos ou externos, existentes ou novos.</p>	<p>Avaliar comparativamente as concepções alternativas em relação às especificações de projeto; conduzir avaliação de riscos e oportunidades de cada concepção em relação ao projeto de produto e ao plano de manufatura; descrever as características da concepção selecionada.</p> <p>Verificar se o processo de manufatura atende às especificações de projeto; identificar os problemas ou restrições de fabricação que afetam o desenvolvimento da concepção.</p>	<p>Reunião da equipe de desenvolvimento do produto; métodos de seleção da concepção; análise de especialistas; sistema de documentação do produto.</p>
<p>Avaliar a concepção de produto.</p>	<p>Verificar se a concepção atende ao escopo do projeto e emitir parecer sobre a concepção.</p>	<p>Avaliação da concepção; análise de especialista; sistema de documentação.</p>

Fonte: adaptado de Back, *et al*, (2008).

Outro trabalho do mesmo grupo de pesquisa, também com enfoque no projeto de produtos mecânicos, Scalice (2003) apresenta a fase de projeto conceitual com ênfase no projeto de produtos modulares. O Quadro 2 apresenta as atividades, tarefas, métodos e técnicas para o desenvolvimento da fase de projeto conceitual proposta por Scalice (2003).

Quadro 2: Atividades do Projeto Conceitual do Sistema Modular.

Atividades Projeto conceitual do Sistema Modular (Scalice, 2003)	Tarefas	Métodos e técnicas
Estabelecer as estruturas funcionais modulares.	Sintetizar estruturas funcionais para cada uma das operações pertencentes ao portfólio de produto a serem desenvolvidos e procurar funções elementares em comum de forma a serem estabelecidos agrupamentos de funções a serem compartilhados entre os produtos.	Síntese funcional Modular: Síntese funcional individual; Procura por funções comuns; Matriz para determinação dos núcleos funcionais
Pesquisar por princípios de solução.	Localizar (e, se possível, gerar) princípios de solução que atendam a cada uma das funções elementares definidas na etapa anterior.	Consultas às principais fontes de obtenção de princípios de solução (Fontes internas, externas, métodos intuitivos e discursivos); Matriz Morfológica.
Gerar e selecionar alternativas de projeto.	Propor alternativas de projeto para os produtos em desenvolvimento. Na sequência, selecionar dentre as alternativas propostas aquelas que melhor atendam aos objetivos do projeto modular.	Matriz de Pugh; Julgamento da validade, disponibilidade imediata de tecnologia, exame passa/não passa.

Continuação do Quadro 2- Atividades do Projeto Conceitual do Sistema Modular.

Gerar os módulos.	Determinar a modularidade existente entre as funções elementares que compõem os núcleos funcionais e entre as demais funções elementares de cada estrutura funcional.	MIM
-------------------	---	-----

Fonte: adaptado de Scalice (2003, p. 65).

Outra abordagem para a fase de projeto conceitual para o projeto de máquinas de bens de capital é apresentada por Rozenfeld et al (2006). A diferença em relação às abordagens de Back et al (2008) e Scalice et al (2003) é o escopo das atividades de projeto conceitual e projeto detalhado. Para estes autores existe uma fase intermediária entre o projeto conceitual e o projeto detalhado, denominada de projeto preliminar. A justificativa é a necessidade de uma noção mais completa concreta da primeira especificação para então decidir pelo detalhamento.

Segundo Rozenfeld et al (2006, p. 298) não há necessidade desta fase, uma vez que na fase de projeto conceitual, já se trabalha com o modelo geométrico tridimensional do produto, criando-se inclusive o *mock-up digital*. Logo com isso, pode se obter uma maior precisão de produto na fase de projeto conceitual. Contudo os autores ressaltam que se o produto for inovador ou se a concepção não oferece segurança técnica funcional, deve-se implementar o primeiro ciclo de detalhamento e otimização na fase de projeto detalhado e se realizar uma avaliação técnica.

O Quadro 3 ilustra a fase de projeto conceitual do modelo de Rozenfeld et al (2006).

Quadro 3: Fase de Projeto Conceitual do modelo de Rozenfeld, *et al.* (2006).

Atividades projeto conceitual Rozenfeld et al. (2006)	Tarefas	Métodos e técnicas
Modelar funcionalmente o produto.	Analisar as especificações-meta do produto; Identificar as funções do produto; Estabelecer a função global; Estabelecer estruturas funcionais alternativas; Selecionar a estrutura funcional.	Abstração orientada; Modelagem funcional; Matriz de decisão.
Desenvolver princípios e alternativas de soluções para as funções do produto	Definir efeitos físicos; Definir portadores de efeitos; combinar os princípios de solução individuais para formar os princípios de solução totais para o produto.	Abstração orientada; Catálogo de solução; Matriz morfológica;
Definir Arquitetura para as alternativas de projeto.	Identificar Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSCs); Definir integração entre SSCs das alternativas de projeto.	Catálogo de solução; Métodos de criatividade; Matriz Indicadora de Módulos (MIM); Matriz de interfaces.
Analisar os SSCs.	Identificar e analisar aspectos críticos do produto; Definir parâmetros principais (forma, matérias, dimensões e capacidades)	Abstração orientada; Modelagem funcional; Matriz de decisão.
Selecionar a concepção do produto.	Analisar as concepções alternativas; Valorar as concepções alternativas; Selecionar a concepção mais adequada.	Especificações-meta; Necessidades dos clientes Matriz de decisão.

Fonte: adaptado de Rozenfeld et al (2006, p. 236, 238, 245, 258, 264 e 281).

Com foco no projeto de produtos mecatrônicos, Xu, Zou & Li (2006) apresentam a fase de projeto conceitual com ênfase na correspondência de interfaces de componentes de sistemas mecatrônicos. Segundo os autores a essência da correspondência de interface entre

os componentes mecatrônicos é descrever as relações de variáveis da interface, que retratam características de entrada e saída, estados de material, energia, e fluxo de informação. O Quadro 4 apresenta o modelo de solução de *feedback* cíclico para o projeto conceitual de um sistema mecatrônico que inclui três padrões de mapeamento, que correspondem a três processos filhos da função solução do sistema mecatrônico proposto por Xu, Zou & Li (2006).

Quadro 4: Modelo de solução de *feedback* cíclico para o projeto conceitual de um sistema mecatrônico.

Atividades do projeto conceitual Xu, Zou & Li (2006).	Tarefas	Métodos e técnicas
Processo de solução de funções simples de um sistema mecatrônico.	Ponderar os efeitos que pode realizar uma determinada função; determinar os princípios de trabalho que pode realizar certo efeito; determinar uma estrutura que possa realizar um princípio de funcionamento.	Abstração orientada; Matriz Morfológica; arquitetura de produto.
Processo de solução da função-sistema do sistema mecatrônico.	Estabelecer a função global; Estabelecer estruturas funcionais alternativas.	Síntese funcional.
Modelo de solução de <i>feedback</i> cíclico para o projeto conceitual de um sistema mecatrônico.	Resolver o modelo de solução de <i>feedback</i> cíclico que inclui três padrões de mapeamento, correspondentes a três processos filhos da solução funcional do sistema mecatrônico.	Método de decomposição; Síntese estrutural; Mapeamento <i>feedback</i> .

Fonte: adaptado de Xu, Zou & Li (2006).

Uma abordagem para o Projeto Conceitual de modularização avançada de sistemas mecatrônicos é apresentada por Gausemeier, *et al.* (2009), o objetivo é a identificação de uma estrutura orientada para o desenvolvimento de produtos que inclui módulos, que

podem ser realizados em paralelo. A diferença em relação à abordagem de Xu, Zou & Li (2006) é o enfoque holístico para o projeto conceitual de abrangência do domínio dos sistemas mecatrônicos e auto-otimização (sistemas mecatrônicos com inteligência parcial inerente), especialmente tendo em conta a estruturação do produto.

A abordagem de Gausemeier, *et al.* (2009) é composta por uma técnica de especificação de abrangência de domínio, para a descrição do princípio de solução de sistemas mecatrônicos e auto-otimização, para se obter um modelo de procedimento detalhado para o projeto conceitual e uma metodologia para a estruturação de tais sistemas. Com base na análise da tarefa de desenvolvimento, um tipo de estrutura do produto é escolhido e as regras de *design* para a sua realização são atribuídos. Para a aplicação das regras de *design* métodos conhecidos como DSM, MIM e seus derivados “Matriz de Estrutura de Reconfiguração” e “Agregação-DSM” são implementados.

O Quadro 5 ilustra o modelo de procedimento para o projeto conceitual por Gausemeier, *et al.* (2009).

Quadro 5: Abordagem para o Projeto Conceitual de Modularização avançada de sistemas mecatrônicos

Atividades do projeto conceitual Gausemeier et al (2009).	Tarefas	Métodos e técnicas
<p>Planejamento e esclarecimento da tarefa.</p> <p>Análise da tarefa de desenvolvimento.</p>	<p>Identificar a tarefa de <i>design</i> e as exigências resultantes do sistema; identificar perturbações (objetivos externos); gerar as combinações consistentes de influências (chamados situações); identificar um tipo de estrutura de produto adequado para as regras do sistema e <i>design</i>.</p>	<p>Análise do esquema da estrutura</p>

Continuação do Quadro 5 - Abordagem para o Projeto Conceitual de Modularização avançada de sistemas mecatrônicos

<p>Projeto conceitual no nível do sistema.</p> <p>Investigação sobre o conceito de produto atual.</p>	<p>Desenvolver as variantes de soluções para cada cenário de aplicação; definir uma hierarquia nas funções; procurar padrões de solução, estabelecer a melhor solução.</p>	<p>Síntese funcional; Matriz Morfológica; Arquitetura funcional.</p>
<p>Projeto conceitual no nível de módulo.</p> <p>Estruturação de produto — Criação de pontos de vista extrema.</p>	<p>Decompor o sistema em módulos; desenvolver uma solução para cada módulo; determinar os pontos de vista extremos; ponderar os pontos de vista extremos um contra outro.</p>	<p><i>Design Structure Matrix (DSM)</i>. Método de estruturação do produto; <i>Agregação-DSM</i>; Reconfiguração da Estrutura da Matrix (RSM).</p>
<p>Integração do conceito.</p> <p>Estruturação de produto — Refinamento e integração de informações.</p> <p>Avaliação</p>	<p>Integrar os princípios de soluções dos módulos em uma solução detalhada do sistema; analisar e procurar contradições dentro das soluções verificando se essas contradições podem ser resolvidas através de auto-otimização; avaliar a solução de forma técnico-econômica.</p>	<p>MIM.</p>

Fonte: adaptado de Gausemeier, *et al.* (2009).

Entre estes trabalhos mencionados, o que apresenta um nível de abstração maior para o desenvolvimento de produtos e sistemas modulares no âmbito mecatrônico é de Gausemeier et al. (2009), que argumenta que a estruturação de um produto é um passo importante no processo de desenvolvimento de sistemas mecatrônicos e auto otimização de sistemas, o que ajuda a reduzir a complexidade e aumentar a confiabilidade de um sistema mas também exige esforço adicional. Em função da metodologia utilizam uma ferramenta típica para desenvolver concepções de produtos e sistemas modulares denominada “Matriz Indicadora de Módulos (MIM)”.

Por outro lado, pesquisando Gausemeier et al. (2009), percebe-se que o nível de abstração visto em Xu, Zou & Li (2006) se torna menor em função do desenvolvimento de produto e sistemas modulares, mas em relação de simplicidade e esforço apresenta um nível maior para identificação rápida de soluções múltiplas para o projeto conceitual de sistemas mecâtrônicos. Em função da metodologia Xu, Zou & Li (2006), não demonstrou devidamente as ferramentas de apoio a serem utilizadas no processo de transformação de informações, para a obtenção de sistemas modulares.

Por sua vez, a metodologia apresentada por Back et al (2008) é mais bem detalhado para o fim especial de desenvolver produtos e sistemas técnicos focados na engenharia mecânica. No entanto, mesmo assim, é possível observar métodos e ferramentas como a “matriz de Pugh” que é utilizada também para a seleção da concepção de sistemas complexos.

Fica evidente que as fases críticas para a modularização na fase conceitual são: a decomposição e a integração. Todas as metodologias expostas passam pelo processo de decomposição e integração, porém, utilizando-se de estratégias e ferramentas diferentes para desenvolvê-los.

- **Fase de decomposição (desdobramento da modelagem funcional).**

A abordagem encontrada em todas as metodologias expostas é a decomposição funcional, que é o processo de desdobramento da função global do produto em funções menores, e em subfunções mais fáceis de resolver (STONE; WOOD; CRAWFORD, 2000). Estas subfunções descrevem detalhadamente o que o produto deve fazer. Um aspecto muito importante percebido nestas abordagens é a existência de diferentes níveis de decomposição.

O DSM, a agregação-DSM e o RSM fazem a decomposição e a integração com relação a componentes (decomposição estrutural do produto). Quanto maior o nível de decomposição maior facilidade para encontrar as relações de um-para-um entre partes físicas e funções, mas também maior dificuldade para integrar essas partes, devido a uma elevada quantidade de elementos a serem analisados e avaliados.

- **Fase de Integração.**

Nesta fase, os elementos e componentes identificados na decomposição precisam ser agrupados para formar os módulos do sistema. a forma mais recorrente exposta nas metodologias são as matrizes que representam as relações entre os diferentes componentes. Existem diferentes métodos que podem ser utilizados para agrupar os diferentes elementos.

O método de Pugh recomendado por Back, *et al.* (2008), é um método que compara os diferentes conceitos de produto com que se pretende trabalhar com um conceito de referência (especificações do produto), permitindo a escolha de um conceito que se sobressaia chamado de conceito “vencedor” a ser adotado para o produto. Por outro lado, no modelo de procedimento para o projeto conceitual proposto por Gausemeier, *et al.* (2009), a modularização é feita na matriz MIM, na qual indica quais funções que apresentam uma maior tendência a formar módulos e quais devem ser agrupadas para formar um módulo.

3.3.1 Preposição de Métodos e Técnicas para o Projeto Conceitual.

Através da revisão da literatura das abordagens para o desenvolvimento da fase de Projeto Conceitual, foi elaborada uma preposição de um roteiro de métodos e técnicas para orientar na Concepção do Produto Mecatrônico, conforme é ilustrado do Quadro 6.

Quadro 6: Métodos e técnicas para orientar na Concepção do Produto Mecatrônico.

	Atividades	Tarefas	Métodos e Técnicas
Projeto Conceitual	Estabelecer a estrutura funcional do produto	Analisar as especificações-meta do produto; Identificar as funções do produto; Estabelecer a função global; Estabelecer estruturas funcionais alternativas; Selecionar a estrutura funcional.	Abstração orientada; Modelagem funcional; Matriz de decisão.
	Buscar por princípios de solução e geração de alternativas de concepção	Localizar e gerar princípios de solução que atendam a cada uma das funções alternativas definidas na etapa anterior	Métodos de criatividade; Análise de síntese funcional, Matriz Morfológica.

Continuação do Quadro 6 – Métodos e técnicas para orientar na Concepção do Produto Mecatrônico.

	Atividades	Tarefas	Métodos e Técnicas
Projeto Conceitual	Gerar e selecionar alternativas de projeto	Propor alternativas de projeto para os produtos em desenvolvimento. Na sequência, selecionar dentre as alternativas propostas aquelas que melhor atendam aos objetivos do projeto.	Arquitetura Funcional; Matriz de Pugh.
	Selecionar a concepção do produto.	Analisar as concepções alternativas; Valorar as concepções alternativas; Selecionar a concepção mais adequada.	Matriz de decisão.

3.4 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O PROJETO DE PRODUTO MECATRÔNICO.

Através da revisão da literatura das principais Metodologias e modelos de Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos, foi elaborado um plano de trabalho visando à organização do projeto, conforme é ilustrado na Figura 22.

O projeto deve cumprir as seguintes características:

1. Seja capaz de atingir os objetivos propostos.
2. As tarefas estabelecidas no plano de trabalho sejam cumpridas.
3. Obter as saídas estabelecidas em cada fase do PDP Mecatrônico enfatizando as contribuições dos modelos analisados para o cumprimento das atividades de cada ciclo do projeto.
4. Ter o plano de trabalho como uma referência para atividades de pesquisa no âmbito do PDP Mecatrônico.

A estrutura do projeto para o PDP do instrumento de medição de umidade e resistência à penetração foi elaborada para melhor atender as necessidades do projeto de forma clara e concisa, a cada etapa do projeto existe uma saída que mostra o resultado

desejado para a atividade proposta, assim como os métodos, técnicas e ferramentas utilizadas para ter os resultados esperados.

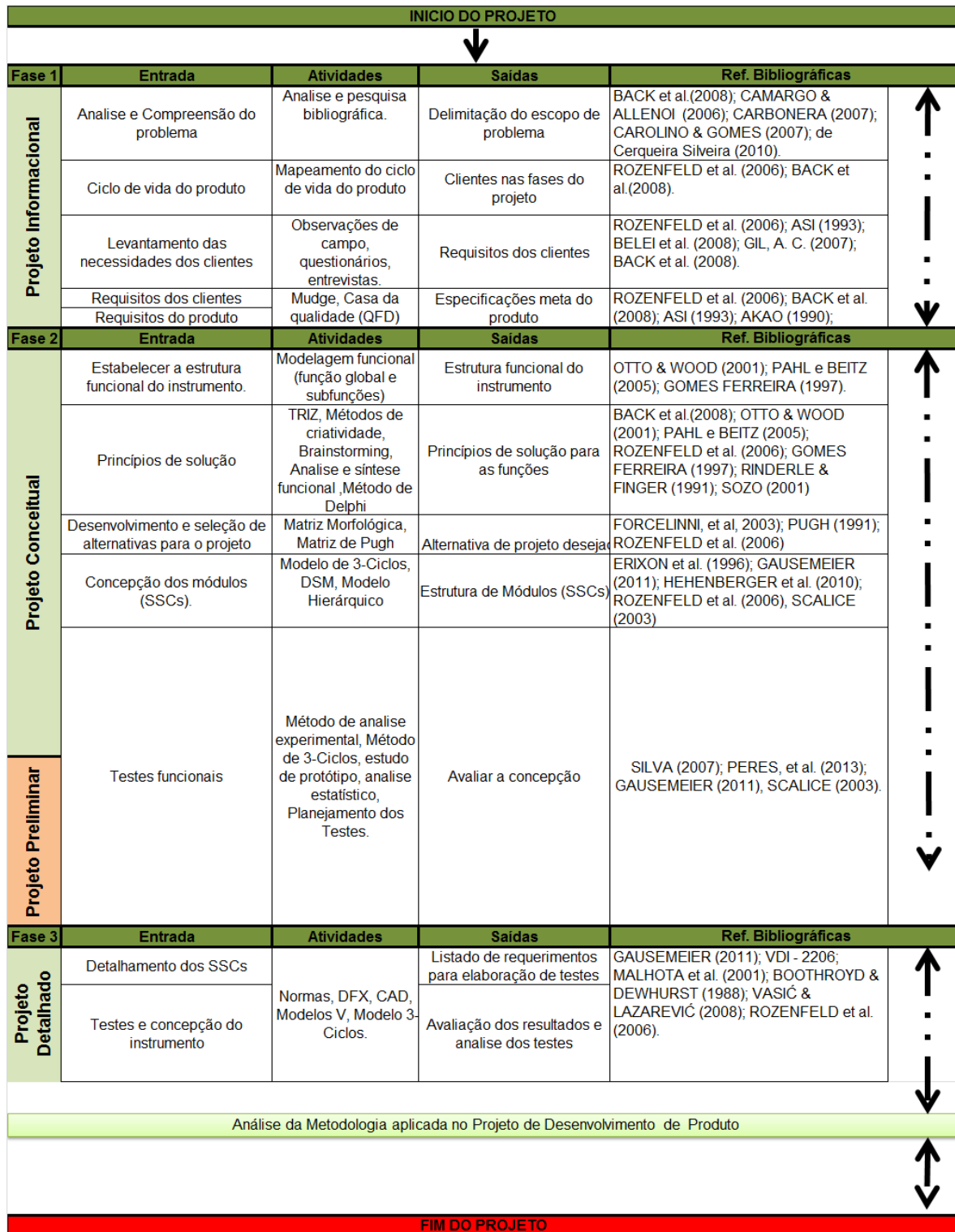


Figura 22: proposta de metodologia para o projeto de produto mecânico.

Nas seguintes seções serão apresentados e descritos os métodos, técnicas e ferramentas a serem utilizadas em cada fase do projeto.

3.4.1 Projeto Informativo

A tarefa principal para iniciar o desenvolvimento de qualquer projeto mecatrônico é a apresentação e análise detalhada do problema, o que resulta em um entendimento sobre as diferentes circunstâncias que o projeto está exposto, tais como barreiras de ordem: socioeconômica, tecnologia, mercadológicas e em termos de viabilidade financeira.

Para realizar a análise detalhada do problema, usam-se os seguintes métodos:

Pesquisa Bibliográfica: este método permite recolher e analisar informações conhecimentos prévios sobre uma determinada ocorrência, assunto, dado, ideia ou problema para o qual se procura uma resposta satisfatória ou uma hipótese que se quer testar.

Método de Entrevista (Ver ANEXO I): é uma técnica de pesquisa que propende obter informações de interesse dentro de uma investigação, guiada por a formulação de questões, com um objetivo definido, permitindo a interação social com o respondente. “Para a elaboração e adequação do roteiro de entrevista considera-se a vivência do pesquisador, a literatura sobre o tema em estudo, as pessoas envolvidas na pesquisa e as informações obtidas no pré-teste” (BELEI, *et al.*, 2012).

Assim com o esclarecimento e análise do problema pode-se seguir em direção de outras etapas que tem como objetivo principal a Determinação das Especificações do Produto, ao qual são utilizados os seguintes métodos e abordagens:

O método de Mudge: é um método numérico que propende avaliar a hierarquia entre requisitos. A avaliação é obtida através da comparação direta entre dois requisitos, de modo a determinar qual é mais importante. Schuster, *et al.* (2014), Rocco e Silveira (2007) expressam que o diagrama de Mudge é uma ferramenta que permite a comparação de função de duas em duas, com o objetivo de ordena-las por relevância. Esta comparação resultara em quatro respostas de acordo como o seguinte critério: O requisito que é considerado muito mais importante do que outro (valor = 5); um requisito considerado mais

importante que outro (valor = 3); um requisito é considerado pouco mais importante que outro (valor = 1); os requisitos que são considerados de igual importância (valor = 0). No Diagrama de Mudge Figura 23, a integração de número/letra nos campos centrais da matriz representa qual requisito é predominante e sua importância. Nas duas últimas colunas, obtêm-se os pesos dos requisitos das partes interessadas, ou seja, seus respectivos graus de importância. Segundo Nickel, *et al.* (2010.) estes graus de importância passam a ser entendidos como ‘taxas de substituição’ na medida em que se obtêm os valores percentuais.

Eficiência		2	3	4	5	Soma	%	
A	5	1	1B	1A	1A	1B	18	56
B	4		2	2D	2D	5C	4	13
C	3			3	4D	3C	3	9
D	2				4	5D	2	6
E	1					5	5	16
						Total	32	100

Figura 23: Diagrama de mude.

Fonte: Nickel, *et al.* (2008).

Método de QFD (*Quality Function Deployment*): é utilizada para estabelecer relacionamentos entre os requisitos de clientes e requisitos de projetos (Figura 24), hierarquizando os últimos de acordo com seu valor. Segundo Rozenfeld, *et al.* (2006) a implementação do QFD traz benefícios, tais como: redução do número de mudanças de projeto; diminuição do ciclo de projeto; redução dos custos de início de operação; redução de reclamos de garantia; planejamento da garantia de qualidade mais estável; favorece a comunicação entre os diferentes agentes que atuam no desenvolvimento do produto; traduz os desejos dos clientes que são vagas e não mensuráveis em características mensuráveis; identifica as características que mais contribuem para os atributos de qualidade; possibilita a percepção de quais características que deverão receber maior atenção.

O propósito geral do QFD é: tornar efetivo o uso de métodos sistemáticos para o desenvolvimento de produtos; proporcionar a solução de problemas pela atividade em

grupo; tornar a atividade em grupo eficiente; e capacitar o grupo com ferramentas simples e práticas (BACK, *et al.*, 2008).

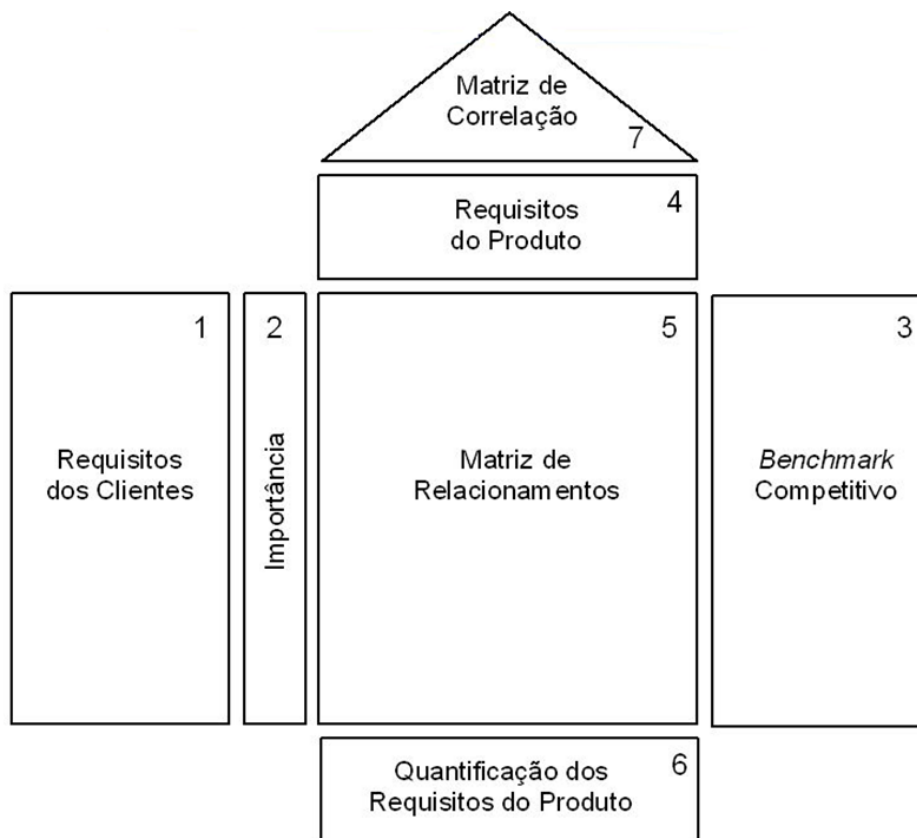


Figura 24: Matriz da Casa da Qualidade.

Fonte: Rozenfeld, *et al.* (2006).

A abordagem *ex-ante*: inspirada no projeto axiomático (AD), proposta por Montelisciani, *et al.* (2014). É um passo-a-passo destinado a orientar a tradução correta das necessidades dos clientes em requisitos do produto. A abordagem proposta é descrita na Figura 25. O modelo descrito na figura é constituído de três passos diferentes que são: análise das necessidades dos clientes, análise dos Critérios de Qualidades (CTQs) e análise dos Parâmetros de projeto (DPs). O procedimento consiste em uma elaboração iterativa e reorganizada da informação relacionada com a inovação radical de produtos complexos. Segundo Montelisciani, *et al.* (2014), os métodos para o desenvolvimento deste modelo podem ser: Brainstorming; Análise antropológica; narrações; Observação do usuário; pesquisas; Questionários; Entrevistas; A Netnografia; Grupos de foco; o método de Kano; o Diagrama de Afinidade; a pirâmide de Maslows; o método de Cascini; o método de

Thompson e o QFD. Esta nova abordagem proposta pelos autores é adequada para a melhoria de projetos de produtos complexos, tais como dispositivos de automóveis onde o método foi testado, ou biomédico, que prosseguem com altos padrões de qualidade.

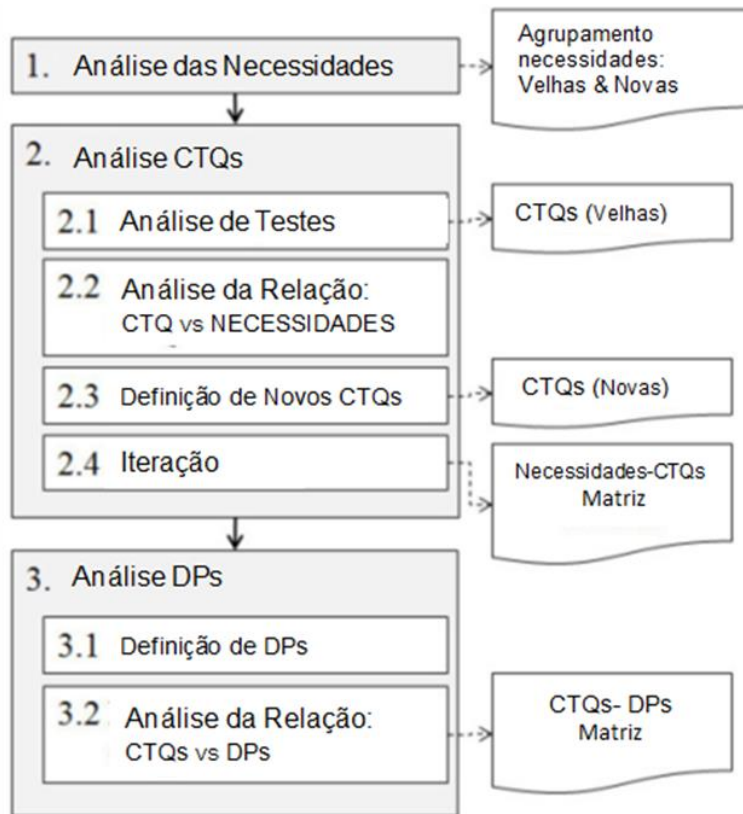


Figura 25: Abordagem *ex-ante*.

Fonte: Montelisciani, *et al.* (2014).

Método de Integração de Requisitos: Thompson (2013) Apresenta um modelo para integrar o tradicional processo de requerimentos em uma teoria axiomática de projeto e propõe um método de concepção. O método inclui um sistema de classificação de requisitos para garantir que todos os requisitos de informação possam ser incluídos no processo de projeto axiomático, um sistema de classificação das partes interessadas para reduzir as chances de excluir uma ou mais partes interessadas e uma tabela para visualizar o mapeamento entre as partes interessadas e seus requisitos.

Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão: O modelo proposto por Nickel, *et al.* (2010), é constituído por três fases que são: identificar os requisitos dos clientes do

produto, identificar os requisitos de projeto do produto e definir especificações-meta do produto. Cada fase é cumprida pelo desdobramento de diversas atividades que utilizam abordagens/ métodos como: grupo de foco; diagrama de Mudge; mapas mentais com cadeias de meios e fins; árvore de valor; brainstormings e determinação da equação do modelo.

Ensslin, *et al.* (2011) corroboram que a Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão-Construtiva (MCDA-C) serve como um instrumento que permite avaliar de forma mais concisa para transformar as necessidades dos clientes em requisitos de projeto de produto.

Segundo Ensslin, *et al.* (2011) a MCDA-C utiliza instrumentos de estruturação de informações capazes de explicar as consequências de decisões nos aspectos que os responsáveis pelas decisões julgam relevantes. O principal propósito da MCDA-C, é ampliar o conhecimento na tomada de decisões em relação a contextos complexos, conflituosos e incertos que se apresentam na etapa inicial do projeto.

3.4.2 Projeto Conceitual

O projeto conceitual é realizado a partir da análise do problema com a intenção de desenvolver a seleção e concepção do produto, para isso, é concebida a estrutura funcional do produto onde a mesma é desdobrada conforme a necessidade do projeto, a fim de cumprir os requisitos dos clientes. Esse processo analisa a arquitetura do produto surgindo oportunidades de modularização.

A estratégia de modularização tem como objetivo desenvolver arquiteturas de produto que contenham unidades fisicamente destacáveis, denominados módulos, de forma a permitir que estas unidades sejam utilizadas em variações de produtos (SONEGO, 2013).

A arquitetura de produto é o esquema pelo qual a função de um produto é atribuída aos componentes físicos (ULRICH, 1995). Dependendo da interdependência e compartilhamento entre as interfaces, ela pode ser classificada em dois tipos: integral e modular. Arquitetura integral é definida como estrutura física onde os elementos funcionais são ligados a um único, ou a um pequeno número, de elementos físicos. Enquanto que arquiteturas modulares possuem subestruturas que tem correspondência de um-para-um

com um subconjunto de um modelo funcional de produto (STONE, WOOD, & CRAWFORD, 2000).

Nesse sentido, Van Beek, Erden, & Tomiyama (2010) argumentam que a modularidade proporciona características desejáveis para a concepção e desenvolvimento de sistemas complexos. Por isso, o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos se beneficiaria do projeto modular. Boucher & Houlihan (2008) argumentam que o projeto de produtos mecatrônicos se favorece do desdobramento do sistema em sistemas específicos, subsistemas, montagens e componentes e da alocação de requisitos para os subsistemas e os componentes individuais.

Assim, esta fase é considerada a fase mais importante no processo de projeto de produto, uma vez que, as decisões tomadas apresentam grande influência nos resultados das fases seguintes.

Os métodos utilizados nesta fase são:

Síntese Funcional: é um dos métodos de geração de concepções mais referenciados na literatura. É o mais apropriado ao desenvolvimento de sistemas técnicos que: são uma integração complexa de elementos e que serve para um propósito determinado; o propósito é declarado a partir da formulação da função global do sistema; a função global é desdobrada, sucessivamente, em funções elementares ou parciais (Figura 26); são considerados como processos de transformação de estado e das propriedades de grandezas do tipo de energia, material, e sinal (BACK, *et al*, 2008).

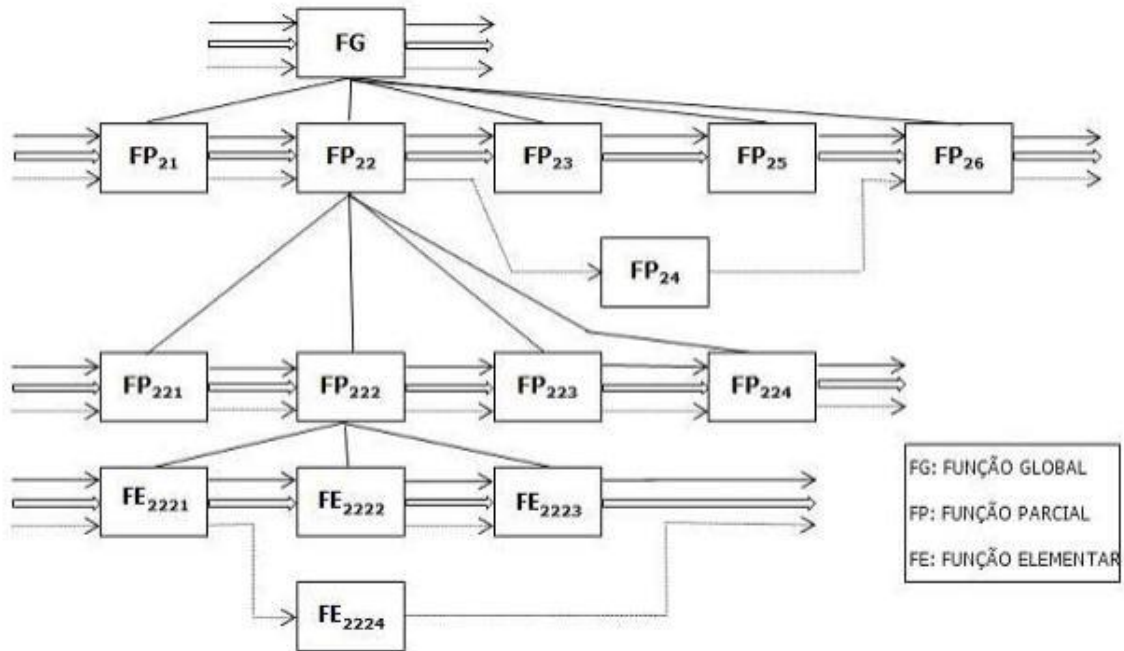


Figura 26: Desdobramento da função global em funções parciais e elementares.

Fonte: Back, *et al.* (2008).

Matriz Morfológica: Tem por objetivo encontrar uma nova solução do problema partindo de uma pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos ou parâmetros. As combinações desses elementos servirão de inspiração para novas ideias.

O método de matriz morfológica proporciona a visualização dos conceitos e princípios de solução encontrados facilitando o processo de associação e combinação de princípios (Figura 27).

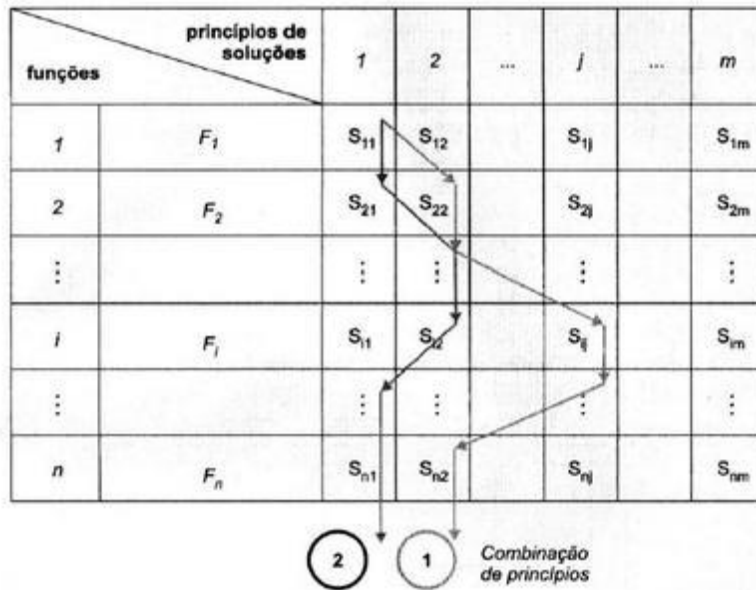


Figura 27: Matriz Morfológica e a combinação de princípios de solução.

Fonte: Rozenfeld, *et al.* (2006).

Análise ou Diagrama de Pugh: fornece uma maneira de medir a capacidade de cada conceito de atender as necessidades dos clientes. É um método que compara os diferentes conceitos de produto com que se pretende trabalhar com um conceito de referência (especificações do produto) permitindo a escolha de um conceito que se sobressaia, chamado de conceito “vencedor”, a ser adotado para o produto.

A essência deste método consiste na comparação entre concepções em forma de uma matriz, relacionando-as com as necessidades dos clientes e o valor do consumidor. A equipe de projeto através de análise e discussão atribui valor de comparação entre uma concepção de referência e as demais concepções. No diagrama de Pugh usa-se a simbologia (+, -, i) para indicar quais conceitos que apresentam vantagens (+), desvantagens (-) ou equivalência (i) com o conceito de referência (Figura 28). Como resultado obtém-se uma pontuação para todas as concepções e através do maior valor deste determina-se a concepção mais adequada às necessidades dos clientes (MORONI & ARANTES, 2013).





Critérios	Conceitos			 Conceito de Referência (Datum)
				
A	+	I	-	
B	++	--	+	
C	i	+	+	

Figura 28: Diagrama de Pugh.

Fonte: Faria (2009).

Matriz Indicadora de Módulos (MIM): indica quais funções que apresentam uma maior tendência a formar módulos e quais devem ser agrupadas para formar um módulo. Segundo Rozenfeld, *et al.* (2006) “está ferramenta baseia-se em 12 diretrizes relacionadas às razões pelas quais um produto deveria ser modularizado”, na qual essas diretrizes são confrontadas com as funções do produto, atribuindo-lhe valores a cada relacionamento (Figura 29).

Diretrizes de Modularização		Relação		Funções				
		Fraca Relação (1 ponto)	Média Relação (3 pontos)	Função 1	Função 2	Função 3	Função 4	Função 5
Desenvolvimento de Produtos	Multi-aplicativo (<i>Carry-over</i>)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					●
	Evolução Tecnológica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			●		
	Alteração de Projeto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				●	
Variação	Especificação Técnica	●	○	●	●			
	Estilo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
Fabricação	Unidade Comum	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
	Processo e Organização	○	○					
Qualidade	Testes em separado	○	○		○			
Aquisição	Compra de Produtos Prontos	○	○				○	
	Manutenção e Manutenibilidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			●	○	
Após estar no mercado	Atualização	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				●	
	Reciclagem	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
	Σ			12	3	18	14	5
Classificação				3	5	1	2	4

Integrar num mesmo módulo?

Possíveis módulos

Figura 29: Exemplo esquemático da aplicação da MIM.

Fonte: Rozenfeld, *et al.* (2006).

Estudo de protótipo: pode ser entendido como modelos funcionais desenvolvidos a partir de especificações preliminares para simular a aparência e a funcionalidade do produto a ser projetado, ainda que de forma incompleta. Por meio do análise e estudo de um protótipo, os futuros clientes do produto, bem como aqueles que irão desenvolvê-lo, poderão interagir, testar, avaliar, alterar e aprovar as características mais definidas da funcionalidade do produto.

Estatística e análise experimental: Um experimento básico ou científico tem propósito eminentemente cognitivo; apontando ao melhor entendimento da realidade. É uma pesquisa básica, que visa novo conhecimento, não necessariamente com objetivo de sua aplicação. No entanto, um experimento tecnológico visa à geração de conhecimento útil com tendências a sua aplicação prática, em busca do aumento do domínio sobre a realidade (PERES, *et al.*, 2013).

3.4.3 Projeto Detalhado

Esta fase tem como objetivo obter o detalhamento dos módulos do sistema resultantes da fase anterior, através da análise sob critérios técnicos e econômicos. É nesta fase que são feitos cálculos preliminares, escolha de matérias, análise de formas geométricas, interfaces de módulos, construção de modelos em escalas adequadas e testes funcionais do sistema.

Os métodos, técnicas e ferramentas utilizadas nesta fase são:

CAD (Computer Aided Design - Desenho assistido por computador): é uma ferramenta muito conhecida que combina hardware e software para o modelamento de produtos. O software CAD substitui de modo eficaz e econômico a forma manual de trabalhar com desenhos e projetos. O CAD é projetado para criar e manipular desenhos técnicos e projetos (D'AVILA & D'AVILA, 2006).

DFMA (*Design For Manufacturing and Assembly*): é um método utilizado para avaliar a capacidade de fabricação de projeto de peças e projeto de montagem. Este método permite identificar as partes desnecessárias da montagem do projeto, e determinar o tempo de fabricação e custos de montagem (TODIĆ, *et al.*, 2012).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado neste capítulo teve como objetivo principal realizar o levantamento bibliográfico e estado da arte das metodologias existentes para o projeto do produto mecatrônico, a fim de desenvolver um instrumento de medição da umidade e resistência à penetração que possibilita avaliar de forma simples o estado de compactação do solo, e compreender os princípios fundamentais do funcionamento dos sistemas mecatrônicos, considerados como complexos.

O estudo das metodologias e modelos demonstrou a importância da necessidade de interação e integração para o desenvolvimento de sistema mecatrônico. Além disso, destaca-se a possibilidade de realizar uma abordagem metodológica por meio da combinação de técnicas e métodos sugeridos na literatura para o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos, mostrando como os sistemas podem ser desenvolvidos.

Segundo Santana (2005) a fase de projeto conceitual é de extrema importância para se chegar a uma concepção, partindo-se da lista de especificações do projeto. A determinação da função global e seu desdobramento em funções parciais e elementares são essenciais para entender bem o problema. Os métodos de criatividade são fundamentais para se chegar a uma solução inovadora, buscando-se princípios de solução em diversas áreas de conhecimento para atender às funções do produto.

A metodologia de PDP de Back et al. (2008) tem sido muito utilizada com sucesso para o desenvolvimento de protótipos e equipamentos mecânicos para diferentes propósitos, contendo princípios de solução e métodos que podem ser empregados para o desenvolvimento de um produto com um sistema mecatrônico como o projeto do instrumento de medição da umidade e resistência à penetração que possibilita avaliar o estado de compactação do solo, tendo como um dos objetivos a organização do trabalho através da metodologia proposta para o projeto do instrumento, sendo desenvolvidos nos próximos capítulos deste trabalho.

CAPÍTULO 4 – PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL

Neste capítulo serão apresentadas o desenvolvimento do Projeto Informacional onde o objetivo principal é a definição das especificações de produto, e o Projeto Conceitual que tem como finalidade a concepção do produto.

Na seguinte seção será apresentado o desenvolvimento do Projeto Informacional seguido do Projeto Conceitual.

4.1 PROJETO INFORMACIONAL

Dentro do processo de desenvolvimento de um instrumento de medição da umidade e resistência à penetração, destaca-se a fase de projeto informacional (PI) (BACK, *et al.*, 2008), também chamada de ‘projeto hierárquico de parâmetros’ (HEHENBERGER, *et al.*, 2010), ou ‘Planejamento e esclarecimento da tarefa’ (GAUSEMEIER, *et al.*, 2011). Esta fase tem por objetivo a geração das especificações técnicas de projeto, como resultado da transformação de informações. Para isso, necessita-se entender qual é problema do projeto, quem são os clientes, quais e como é possível atender suas necessidades e quais são as restrições para desenvolver o produto.

A maioria dos modelos de desenvolvimento de produtos divide o processo de projeto em fases, etapas e atividades que se complementam de maneira direta ou indireta. Na fase do Projeto Informacional, Back, *et al.* (2008) propõem as seguintes etapas principais: apresentar o problema de projeto, identificar as necessidades dos usuários, estabelecer os requisitos dos usuários, transformar os requisitos dos usuários em requisitos de projeto e obter as especificações-meta do projeto. No entanto, no intervalo de cada etapa é preciso utilizar uma série de métodos e ferramentas para o levantamento das especificações de projeto, tais como: modelo de otimização e avaliação do consumidor (CORE), metodologia de organização e especificações em engenharia (MOOSE), FQFD (*fuzzy-QFD*), FFMEA (*Fuzzy Failure Mode and Effects Analysis*).

Um dos métodos mais usados e citados na literatura para a geração das especificações é Desdobramento da Função Qualidade (QFD). Lee, *et al.* (2008)

argumentam que é um conceito global que fornece meios de traduzir necessidades do cliente em requisitos técnicos adequados para cada estágio de desenvolvimento de produto e produção. Wagner & Hansen (2004), corroboram com este conceito ao afirmar que tradicionalmente o QFD é aplicado para comparar as necessidades do cliente com parâmetros de design de produtos. Assim, a Voz do Cliente é traduzida para a Voz do Engenheiro através de uma matriz, que é chamada Casa da Qualidade – HOQ.

A utilização do QFD é muito empregada no desenvolvimento de projetos mecânicos, eletromecânicos e sistemas mecatrônicos na atualidade. Um sistema mecatrônico é definido como uma “caixa”, compreendendo varias entradas e saídas do projeto para os diferentes requisitos do projeto. Como regra, os sistemas mecatrônicos são considerados complexos por incluir uma grande quantidade de conexões entre os diferentes domínios internos (HEHENBERGER, *et al.*, 2010). É comum concluir que esses sistemas mecatrônicos não atendem apropriadamente o trabalho pelo qual foram desenvolvidos. O principal motivo está nas especificações-meta do projeto que evidenciam falhas nas atividades de entendimento, documentação e levantamento dos requisitos e que são a causa de problemas como: sistema que resolve o problema errado, não funciona como esperado, difícil para os clientes utilizarem e entenderem. Segundo Back, *et al.* (2008) uma definição inadequada dessas especificações de projeto ou uma determinação imprópria de certos aspectos do problema poderá causar uma sequência de decisões que fará emergir uma solução errônea que não satisfaz as necessidades dos clientes ao longo do ciclo de vida do produto.

A seguir será apresentado o desenvolvimento para a determinação das especificações-meta do produto mecatrônico.

4.1.1 Elaboração das especificações-meta do produto mecatrônico

A tarefa principal para iniciar o desenvolvimento de qualquer projeto mecatrônico é a apresentação e análise detalhada do problema, o que resulta em um entendimento sobre as diferentes circunstâncias que o projeto está exposto, tais como barreiras de ordem: socioeconômica, tecnologia, mercadológicas e em termos de viabilidade financeira.

Para o levantamento destas informações contou-se com o apoio de pesquisadores da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), principalmente referente sobre as dificuldades e facilidades do uso dos métodos e técnicas já existentes (Figura 34).

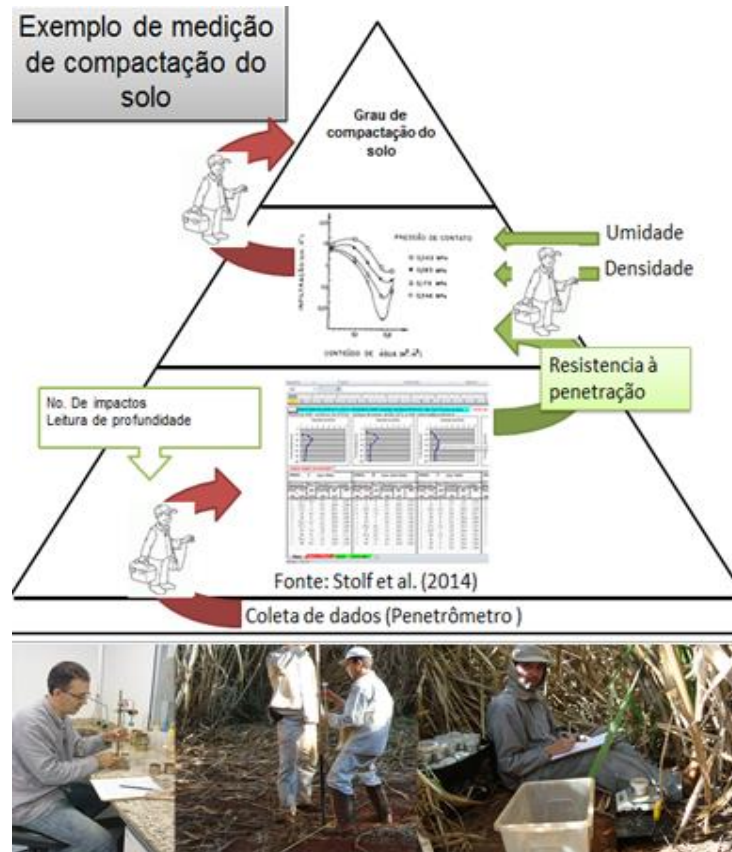


Figura 30: Sistema de atividade para avaliação da compactação do solo.

4.1.1.1 Identificação e classificação dos stakeholders

Segundo Gausemeir, *et al.* (2011) para gerenciar a complexidade do projeto do produto mecatrônico é necessário um modelo do processo adequado, esse modelo de procedimentos têm como envolvidos os “*stakeholders*” de diferentes domínios, onde há a necessidade de atividades a serem executadas, coordenadas e sincronizadas.

Para clarificar quem são os clientes, atores, envolvidos diretos e indiretos no projeto, torna-se necessário realizar um levantamento dos mesmos e incluí-los dentro do ciclo de vida do produto (Figura 31), tomando-os com a abordagem de *stakeholders* (interessados) que são todos os que podem afetar ou que são afetados de alguma forma pelo projeto do produto, facilitando assim o levantamento das necessidades. Para assim utilizar

posteriormente a interação e integração entre a fase de clarificação da tarefa no projeto conceitual nos diferentes níveis de sistema, subsistema e componentes.

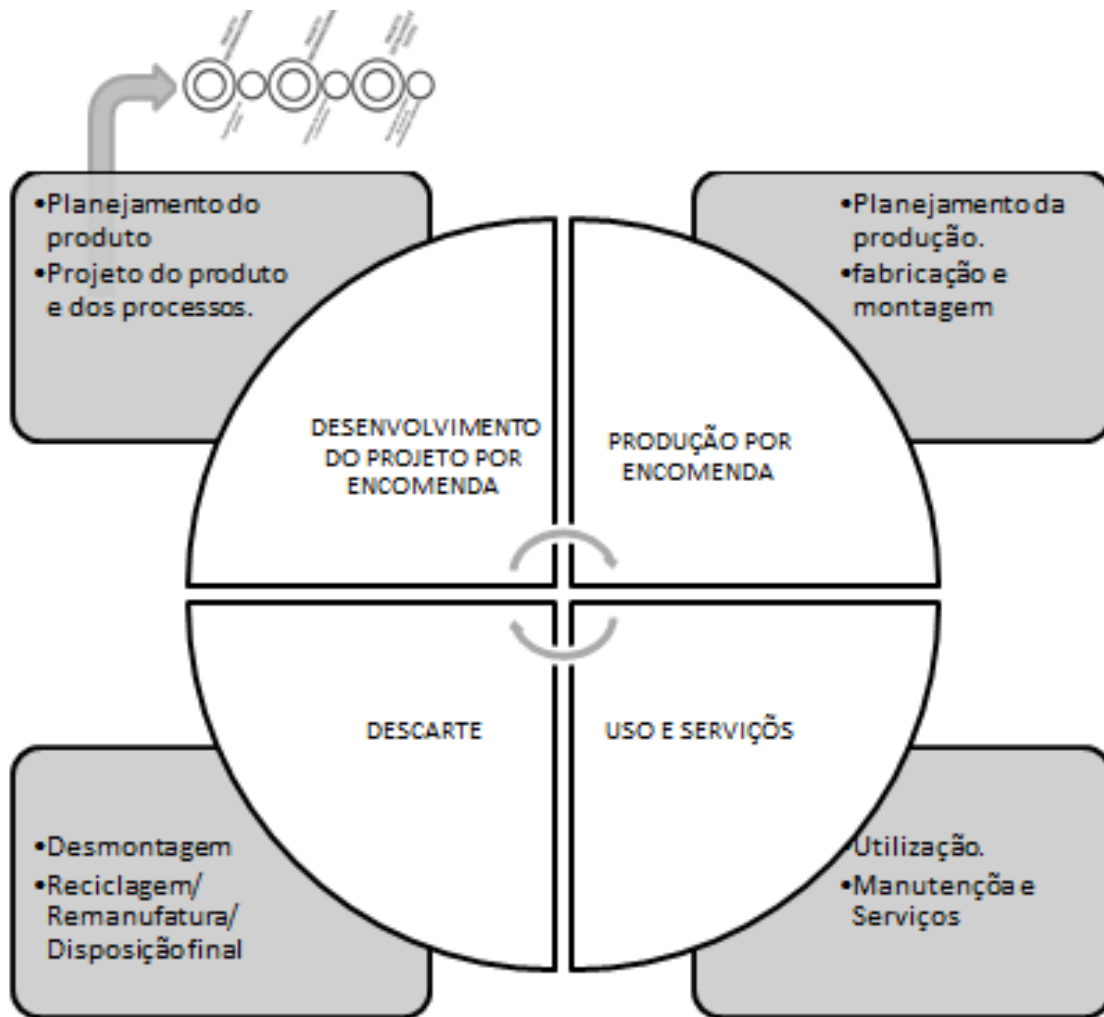


Figura 31: Ciclo de vida do produto.

É importante ressaltar que o presente trabalho encontra-se especificamente relacionado com a fase de projeto, sendo esta de maior importância para o processo de desenvolvimento de produto, se faz necessário um desdobramento desta fase, para assim termos o ciclo de vida do projeto, permitindo relacionar mais especificamente os *stakeholders* em cada fase do projeto (Figura 32).

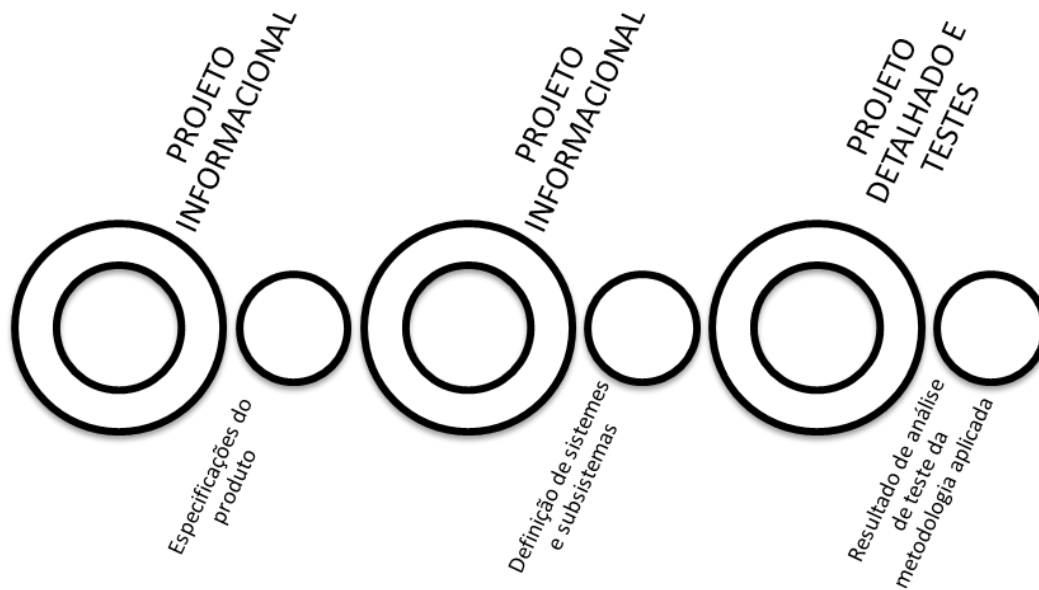


Figura 32: Ciclo de vida do projeto por encomenda.

Para se realizar o levantamento dos *stackholders* do projeto é necessária uma pesquisa aprofundada sobre o problema e contextualizá-lo, pois assim é possível visualizar todos os atores, desde a cadeia de suprimentos até a equipe de projeto ou fabricante do instrumento. A técnica abordada para realizar o levantamento dos atores e de que forma eles interagem dentro do projeto é utilizando o ciclo de vida do produto, e após realizar esta tarefa classificar seu nível de importância (Figura 33). Para isso, utiliza-se a proposta de Back, *et al.* (2008) que classifica os *stakeholders* em: Externos, Intermediários, Internos, Diretos e Indiretos.

Classificação dos Stakeholders					Stakeholders - Pesquisa.	Influência no Projeto				
Externos	Intermediários	Internos	Diretos	Indiretos		Projeto Informacional	Projeto Conceitual	Projeto Detalhado	Protótipo	Validação
x				x	1. Produtor Rural	x				
x			x		2. Analista de Laboratório	x				
x			x		3. Pesquisador	x				
x				x	4. Cooperativas/Industria/Universidades/Agroindústria/Sector Civil	x			x	x
		x			5. Empresário	x				
	x				6. INPI/ IBPI/ United States Patent/ Propriedade Intelectual (Inventores)	x				
x			x		7. Operários do Instrumento	x				
	x				8. ABNT/ ISSO	x				
	x				9. Amb. Organizacional- ONG E Ambientalistas (Componentes Radioativos e fabricação)	x				
	x				10. Amb. Institucional- Legislação Municipal e Estadual	x				
	x				11. Concorrentes	x	x			
x			x		12. Equipe de Projeto	x	x	x	x	x
x			x		13. Embrapa	x	x			x
x				x	14. Laboratórios de INMETRO	x	x			x
		x			15. Fornecedores de peças e componentes	x		x		
x			x		16. Laboratório de Montagem e Fabricação do Protótipo	x		x	x	
		x			17. Desenvolvimento de Fornecedores de componentes e serviços	x				x
x			x		18. Fabricante do Instrumento	x				x
		x			19. Laboratórios de Instituições de pesquisa e ensino	x				x
	x				20. Distribuidor do instrumento	x				x

Figura 33: Identificação, Classificação e Nível de Influência dos *stakeholders* no projeto.

4.1.1.2 Levantamento dos Requisitos dos Clientes (RC).

As necessidades dos clientes foram levantadas a partir do ciclo de vida do produto através do envolvimento de seus *stakeholders* em cada fase do ciclo de vida. Os principais métodos utilizados para levantamento das necessidades foram: entrevistas, questionários, observações diretas (Figura 30), mapeamento do fluxo de atividade para medir e avaliar a compactação do solo dos equipamentos existentes (ANEXO II).

A Tabela 1 ilustra parte do mapeamento do fluxograma de atividades.

Tabela 1: Matriz de apoio ao levantamento dos atributos e requisitos do projeto.

Fluxograma de Projeto por encomenda para EMBRAPA		
Processo	Característica	Necessidades presentes
Levantar o instrumento do chão	Erguer instrumento do chão	1. Ser leve
Condução do instrumento até a unidade de armazenamento do instrumento	Deslocamento do instrumento até o carro e levado ao campo	2. Ser versátil e compacto
		3. Ser de fácil transporte
		4. Ser seguro pelo transporte
		5. Ser portátil
Montagens dos equipamentos	São preparados e montados os instrumentos que serão utilizados no estudo e colheita de amostras do solo.	6. Ser de fácil montagem e desmontagem
		1. Ser leve
		7. Não ter muitos cabos
Transporte do equipamento por o operador	O operador necessita caminhar pela área a ser avaliada para fazer as medições. Normalmente, além do penetrômetro, carrega outros equipamentos, como trado para coleta de solo para avaliação de umidade, bolsa com amostras de solo coletadas, prancheta para anotar dados, cantil de água, entre outros.	8. Ser seguro pelo operador
		5. Ser portátil
		2. Ser versátil e compacto
		3. Ser de fácil transporte
		1. Ser leve
		8. Ser seguro pelo operador

Depois de realizado o levantamento das necessidades dos clientes, Thompson (2013) recomenda inserir a informação em uma tabela que permita visualizar e analisar o mapeamento das necessidades dos clientes (Ver ANEXO III). Este tipo de mapeamento facilita a tarefa seguinte que consiste em transformar as necessidades em requisitos das partes interessadas, além de permitir identificar seus domínios.

A Tabela 2 ilustra parte do levantamento das necessidades dos clientes do projeto por meio dos *stakeholders* encontradas ao longo do ciclo de vida.

Tabela 2: Matriz de apoio ao levantamento dos atributos e requisitos do projeto.

Ciclo de Vida	Classificação dos Stakeholders		Stakeholders	Necessidades	Funcionamento	Ergonomia	Estética	Economicidade	Segurança	Confiabilidade	Legalidade	Patentiabilidade	Da normalização	Do Impacto Ambiental		
PROJETO	Externos	Diretos	EMBRAPA	Ter medições de (umidade, RP)	X					X						
				Ser de fácil manuseio	X	X			X							
				Ser de fácil montagem e desmontagem		X		X	X							
				Ser seguro pelo operador	X				X							
				Ser leve		X										
	Indiretos		Cooperativas/Indústria/Universidades/Agroindústria/Sector Civil	Estar de acordo com as normas técnicas e leis					X		X					
			Laboratórios de INMETRO	Estar de acordo com as normas técnicas e leis					X		X					

Fonte: baseado de Thompson, (2013).

Com a realização do mapeamento, pode-se seguir com o agrupamento das necessidades dos clientes que permite a verificação de redundâncias que causam esforços desnecessários na tentativa por dar solução a uma necessidade já atendida. Segundo Montelisciani, *et al.* (2014) explicam que o objetivo dessa tarefa é, principalmente, obter dois macro grupos: (I) as necessidades cuja satisfação é dada como certa - a condição essencial para o produto é atender o mercado-alvo; (II) as necessidades que aumentam a satisfação dos clientes e a atratividade do produto - o seu cumprimento diferencia o produto dos concorrentes.

Após o agrupamento, o passo seguinte consiste em transformar o grupo de Necessidades dos Clientes em uma frase curta que sintetiza a informação sem perder o foco principal “a voz dos clientes”, essa frase representa o Requisito dos Clientes (Tabela 3). A frase deve começar com os verbos ser, estar ou ter; quando um requisito não começa com ditos verbos, é sinônimo de uma Restrição (R) ou é um Requisito Funcional do produto (RF). De acordo com Back, *et al.* (2008) as necessidades das partes envolvidas são

transformadas ou traduzidas para os requisitos dos clientes usando-se uma linguagem mais compacta e apropriada ao entendimento geral da equipe de desenvolvimento.

Tabela 3: Requisitos dos clientes.

Requisitos do Cliente
Ter uma boa acurácia e confiabilidade
Ser multifuncional
Ser de fácil manuseio
ser leve
Ser confortável pelo uso do operário
Estar de acordo com as normas técnicas e leis
Ter proteção para atos inseguros.
Ser de fácil montagem e desmontagem
Ser inovador
Ter distribuição rápida, eficaz e segura
Ter componentes padronizados disponíveis no mercado
ser de fácil manutenção
Ser de fácil fabricação
Não causar intensa reação visual
Não ter muitos cabos
Ter baixo consumo de energia
Ser de custo acessível
Ter custo acessível de fabricação e manutenção
Ser portátil
Ter facilidade de identificação de erros
Ter uma vida útil longa
Ter perpendicularidade na penetração do haste
Utilizar processos convencionais de fabricação
Não gerar poluição
Ser de fácil descarte
Ter a possibilidade de fabricar subsistemas em diversas empresas
Não necessitar intensa intervenção humana para sua

Este é um passo fundamental para obter as especificações de um produto mecatrônico de um sistema complexo, com a finalidade de construir um protótipo que seja adequado não somente as especificações de produto geradas mais também as restrições que são percebidas no decorrer do processo de interação e integração das fases de um produto mecatrônico.

A etapa final desta fase tem por objetivo a hierarquização dos Requisitos dos Clientes. Essa hierarquização ajuda a visualizar quais requisitos impactam mais na satisfação dos clientes, ao qual são utilizados comumente os métodos de Mudge e Kano.

No Diagrama de Mudge Figura 34, a integração de número/letra nos campos centrais da matriz representa qual requisito é predominante e sua importância. Nas duas últimas colunas, obtêm-se os pesos dos requisitos das partes interessadas, ou seja, seus respectivos graus de importância. Segundo Nickel, *et al.* (2010.) estes graus de importância passam a ser entendidos como ‘taxas de substituição’ na medida em que se obtêm os valores percentuais.

Requisitos do Cliente		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	TOTAL	%	
Ter uma boa acurácia e confiabilidade	A	A1	A3	0	A1	F3	G3	A1	A5	A3	K1	A3	A3	A1	A5	A1	0	A1	0	A1	A1	0	A5	A5	A3	A5	A3	51	6,86	
Ser multifuncional	B		B1	B1	F1	G3	B1	B3	B5	B3	0	B3	N1	B5	P3	Q1	0	S1	B1	B1	B1	B5	B3	B3	B5	AA1	42	5,65		
Ser de fácil manuseio	C			C1	0	F1	G3	C1	0	C5	C3	L1	C3	0	C5	P3	Q1	R1	C1	C3	C3	C5	C3	C3	C5	AA1	46	6,19		
Ser leve	D				D3	F1	G3	D1	D5	D5	D1	0	D3	D3	D5	P1	0	R1	S1	D3	D1	D3	D5	D3	D3	AA3	47	6,33		
Ser confortável pelo uso do operário	E					F3	G5	0	E3	E5	K1	E1	E3	0	E5	P3	Q1	R1	S1	E3	E5	E3	E1	E3	E5	AA1	40	5,38		
Estar de acordo com as normas técnicas e leis	F						F1	F3	F5	F5	F1	F1	0	F1	F5	0	F1	F1	F1	F1	F3	F3	F5	F1	F5	F5	58	7,81		
Ter proteção para atos inseguros.	G							G3	G5	G5	G3	G1	G1	G1	G5	0	0	G1	0	G5	0	G1	0	G1	G5	G1	55	7,4		
Ser de fácil montagem e desmontagem	H								H5	H5	H1	H1	H1	0	H1	P3	Q1	H1	S1	T1	H3	0	H1	0	Y1	H3	AA5	22	2,96	
Ser inovador	I									I5	K1	0	I3	I1	I5	P1	Q3	R1	I3	I3	U1	V1	I3	X3	Y5	I1	I3	27	3,63	
Ter distribuição rápida, eficaz e segura	J										K5	L3	M3	N3	0	P5	Q3	R3	S5	T3	U3	V1	J1	X1	J1	J5	AA5	7	0,94	
Ter componentes padronizados disponíveis no mercado	K											K1	K1	N1	K3	P3	Q1	R1	S3	K1	K1	K1	0	X1	Y1	0	K1	17	2,29	
Ser de fácil manutenção	L											L3	N1	L3	P3	Q1	0	L1	T1	0	V1	L3	X1	L1	L3	AA3	18	2,42		
Ser de fácil fabricação	M												N3	M3	P5	0	0	S1	M1	M1	M1	0	X3	Y1	0	M1	10	1,35		
Não causar intensa reação visual	N														N3	P3	0	0	N1	N1	U1	N3	N1	X3	Y3	N5	N1	24	3,23	
Não ter muitos cabos	O															P5	Q3	R3	0	T1	U3	O5	O1	X3	Y1	O1	AA3	7	0,94	
Ter baixo consumo de energia	P																0	0	0	P1	P3	P1	X1	Y3	P3	P3	50	6,73		
Ser de custo de acessível	Q																	0	Q3	Q1	U3	Q3	Q3	X3	Y3	Q5	Q3	33	4,44	
Ter custo acessível de fabricação e manutenção	R																		R1	R3	R1	R3	0	X3	Y3	0	R1	20	2,69	
Ser portátil	S																			0	U1	V1	S3	X1	S3	S5	S1	25	3,36	
Ter facilidade de identificação de erros	T																				0	T3	T1	X3	Y1	T5	AA3	15	2,02	
Ter uma vida útil longa	U																					U3	U3	0	0	U1	AA1	19	2,56	
Ter perpendicularidade na penetração do haste	V																						V1	0	Y1	V1	AA3	6	0,81	
Utilizar processos convencionais de fabricação	W																							0	Y1	W3	AA3	3	0,4	
Não gerar poluição	X																								0	X3	X3	32	4,31	
Ser de fácil descarte	Y																										Y5	Y3	32	4,31
Ter a possibilidade de fabricar subsistemas em diversas empresas	Z																										AA5	0	0	
Não necessitar intensa intervenção humana para sua	AA																											37	4,98	
																													743	

Figura 34: Diagrama de Mudge.

4.1.1.3 Especificações-meta do produto.

Esta etapa destina-se a determinar as especificações do instrumento. O método mais utilizado como apoio no levantamento das especificações técnicas de um projeto é o método de Desdobramento da Função Qualidade (QFD), mais especificamente a primeira casa da qualidade.

O QFD é utilizado para comparar os requisitos dos clientes com os requisitos do projeto sendo hierarquizados de acordo com seu valor, avaliando entre os requisitos de projeto quais são os mais contraditórios (-) e os que não (+). Lee, *et al.* (2008), afirmam

que: O QFD é um conceito global que fornece meios de traduzir as necessidades do cliente em requisitos técnicos adequados para cada estágio de desenvolvimento de produto e de produção.

Para o preenchimento da casa da qualidade (Ver ANEXO IV) recomenda-se buscar o apoio de especialistas das diversas áreas de conhecimento envolvidas, visando que o produto mecatrônico possa ser encaminhado de forma correta para as próximas etapas do projeto. Assim o resultado desta atividade será as especificações-meta do produto (Tabela 4).

Tabela 4: Especificações de projeto.

Especificação	Unidade de medição	Objetivo	Sensores	Saídas Indesejadas	Observações
Medições multiples (umidade, RP)	MPA cm ³ /cm ³	Ter facilidade de medição das variáveis umidade e Resistência à Penetração	Sensores (umidade, impactos, profundidade)	O instrumento apresente restrições nas medições	Projetar um instrumento que possa medir umidade e Resistência
Baixo Consumo de potência/Energia (Kw/h)	w ou kw/h	Mínimo consumo possível	Verificação do projeto detalhado	Fonte de potência e energia que apresente um alto custo de consumo.	Apresentar um sistema estável e de baixo consumo
Alto nível de identificação de erros (%)	%	Detecção de erros acima do 80%	Informações relatadas pelos operadores e indicadores de maquinas	Apresentar erros que não possam ser detectados.	Buscar projetar o instrumento com indicadores de leitura para o operador

Continuação da Tabela 4– Especificações de projeto.

Baixa Exigência de Esforço Físico Do Operador (Kgf)	Kgf	Máximo 12 kg	Informações relatadas pelo operador.	O operador realize um esforço físico acima de 12 kg.	O operador necessita caminhar pela área a ser avaliada para fazer as medições. Normalmente, além do penetrômetro, carrega outros equipamentos.
Alta Segurança durante a operação		Apresentar o máximo de segurança possível na operação	Cumprir as normas de segurança do trabalho e projetá-las durante o projeto	Apresentar risco para o operador	Projetar um produto que não ofereça risco à integridade do operador
Alta facilidade de calibração	MPA cm ³ /cm ³ Kgf	Garantir acurácia, precisão e confiabilidade nos dados medidos.	Equipamentos para realizar as calibrações, ajustes e incertezas e documentação do instrumento.	Baixa acurácia, precisão e confiabilidade do instrumento.	Projetar um instrumento confiável
Baixa Frequência de manutenção (n°)	N°	Uma intervenção corretiva e manutenção preventiva em intervalos programados de 2 ou 3 meses	Informações relatadas pelas pessoas entrevistadas	Necessidade de mais de uma intervenção corretiva ao ano.	Cumprir com as manutenções preventivas programadas
Suporte para encaixe e apoio		Utilizar o mínimo necessário de operários para realizar o trabalho	Verificação do projeto detalhado	O instrumento precisar de mais um operador para manipular o instrumento	Projetar um instrumento que utilize o mínimo de operários

Continuação da Tabela 4– Especificações de projeto.

Alta resistência a condições ambientais e físicas		Apresentar uma resistência boa para condições ambientais como: chuva; poeira; poluições.	Verificação nos testes	Utilizar componentes de baixa resistência a condições ambientais	Projetar um instrumento que possa ser utilizado em campo e laboratório
Baixo custo de aquisição (R\$)	R\$	Compra do instrumento abaixo de 10.000,00	Informações relatadas pelos entrevistados	O instrumento ser de alto valor aquisitivo	Projetar o instrumento de baixo custo de aquisição
Alta Resolução de Sinal	MPA cm ³ /cm ³	Ter uma sinal de alta qualidade e resolução	Software de programação da configuração dos sensores no instrumento	O instrumento ter uma recepção de sinal ruim e de baixa qualidade	Melhorar o ângulo de visado
Alta estabilidade nas medições		Uma boa estabilidade do sistema e uma ótima sensibilidade nas medições	Software de programação da configuração (interface gráfica)	Sistema instável e muito sensível nas medições	Projetar um sistema estável
Resposta das medições em tempo real	Horas/Dias	Ter uma resposta em menos de 24 horas ou imediato	Verificação de tempo (Relógio)	Demora a saída do resultado da análise	Rapidez na tomada de decisão sobre a necessidade ou não de operações para descompactar o solo.
Altos N° de Componentes Normalizados e Padronizados	n°	Utilizar de todos os componentes normalizados e padronizados	Verificação do projeto detalhado	Porcentagem baixa de componentes padronizados utilizados	Entende-se por componentes padronizados aqueles disponíveis no mercado

Continuação da Tabela 4– Especificações de projeto.

Alta facilidade de operabilidade do sistema		Simplicidade na sua operabilidade	Manual de operações	Sistema difícil de operar ou precisar de curso treinamento de operação	Incrementar o pessoal qualificado para operar o instrumento e diminuir o tempo de ensino a os novos estagiários
Alto N° de Componentes Recicláveis	n°	Utilizar maior numero de componentes recicláveis	Verificação do projeto detalhado.	Utilizar menos de 50% de componentes recicláveis	Buscar utilizar no projeto componentes que possam ser reciclados
Alto n° de componentes com geometria simples (n°)	n°	Acima de 80%.	Verificação do projeto detalhado.	O projeto apresentar problemas na fabricação, montagem e desmontagem.	Buscar projetar de modo que a fabricação seja pratica e simples
Durabilidade do instrumento (anos)	Anos	5 anos	Informações relatadas pelos entrevistados	Antes dos 5 anos de uso apresentar defeitos que o levem ao descarte	Estima-se uso
Baixo Custo de Manutenção	R\$	Ter componentes disponíveis no mercado/padronizados	Mais de 70% dos componentes padronizados e disponíveis no mercado	Não ter componentes disponíveis para fazer manutenção tornando o processo caro	Apresentar um sistema de baixo custo de manutenção
Baixo Custo de Fabricação	R\$	Fabricação abaixo do orçamento	Verificação do projeto detalhado.	Alto custo de fabricação	Projetar o instrumento de acordo com as restrições de orçamento para sua fabricação
Baixo N° de Componentes Expostos	n°	Menor número possível de componentes expostos	Verificação do projeto detalhado.	Apresentar no uso do instrumento	Obter segurança no funcionamento e na operação

Mesmo empregando um conjunto de métodos e técnicas para apoiar a geração das especificações do instrumento de medição de umidade e resistência à penetração, as mesmas não foram suficientes para determinar as especificações do software do sistema. Para isso será necessário iniciar a fase de projeto concepção, ou seja, alocação dos requisitos em funções físicas, para determinar as especificações do software.

4.2 PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual é realizado a partir da análise do problema com a intenção de desenvolver a seleção e concepção do produto, para isso, é concebida a estrutura funcional do produto onde a mesma é desdobrada conforme a necessidade do projeto, a fim de cumprir os requisitos dos clientes. Esse processo analisa a arquitetura do produto surgindo oportunidades de modularização.

Assim, esta fase é considerada a fase mais importante no processo de projeto de produto, uma vez que, as decisões tomadas apresentam grande influência nos resultados das fases seguintes.

Nas próximas seções serão apresentadas as Etapas e atividades para o desenvolvimento do Projeto Conceitual, além da aplicação dos métodos e técnicas apresentados no Capítulo 3.

4.2.1 Estrutura funcional do produto

Antes de inicia-se a busca por soluções para o problema de projeto de produto mecatrônico, é importante evidenciar as características típicas dos sistemas complexos que são: uma combinação de elementos ou componentes que formam um sistema complexo que serve para um propósito determinado; esse propósito é argumentado por uma função global; a função global do sistema pode ser detalhada, sucessivamente, em funções de menor complexidade; esses sistemas complexos são considerados como procedimentos de transformação de estados e das propriedades de entrada e saída (energia, material e sinal ou informação).

Para a definição da estrutura funcional do produto foi utilizado o método da síntese funcional. Segundo Back, *et al* (2008) o método da síntese funcional é mais

apropriado ao desenvolvimento de sistemas complexo que apresentam as características já expostas.

A função global do instrumento de medição de umidade e resistência à penetração (RP) para avaliação da compactação do solo foi definida como “Medir Umidade e RP”. Esta expressão é a representação simplificada do problema de projeto de produto mecatrônico. As interfaces do sistema e as grandezas de entrada e saída são representadas na Figura 35.

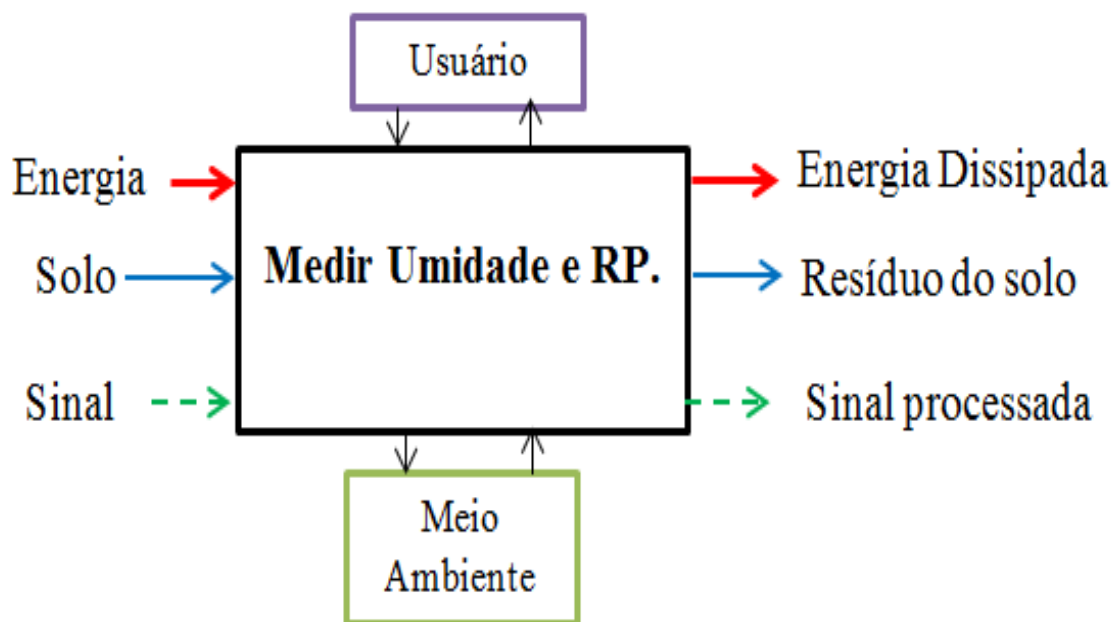


Figura 35: Função global do sistema.

4.2.2 Estruturas funcionais alternativas

Com a definição da função global do produto mecatrônico (Ver Figura 35), foi possível desdobrar a mesma por estruturas de funções parciais para desenvolver princípios de soluções. Assim, a Figura 36 mostra o desdobramento da função global em funções parciais.

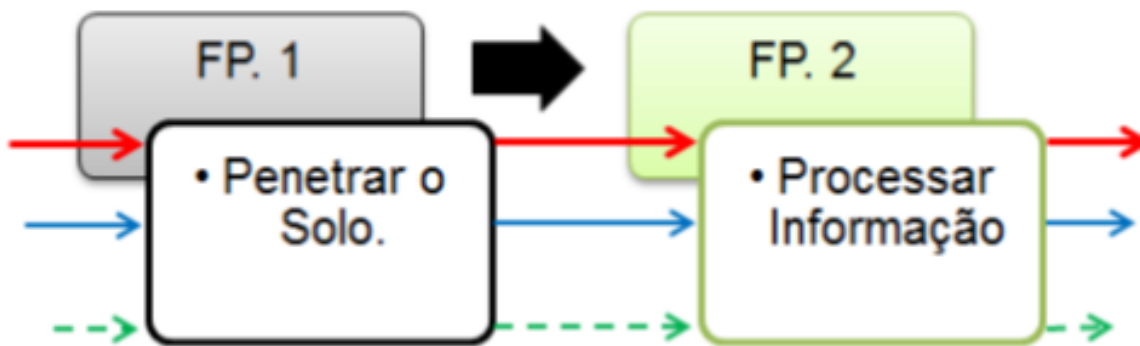


Figura 36: Funções Parciais do sistema.

O processo de medição de umidade e resistência à penetração deve ocorrer em duas etapas distintas, de forma que permita as funções de penetração do solo, medição, determinação da umidade, e resistência do solo à penetração, sendo essas atividades executadas em fluxo contínuo. Dessa forma, tem-se:

1. Penetrar o solo, sendo configurado o instrumento para então serem iniciados os trabalhos de medição e penetração do solo;
2. Processar e manipular para diversas avaliações as informações dos dados obtidos das medições anteriores.

Mesmo com o desdobramento da função global em funções parciais muitas vezes a equipe de projeto necessita estabelecer princípios de solução que possam acolher diretamente cada uma destas duas funções parciais. Para este tipo de situação é recomendado que se realize mais um desdobramento das funções parciais em funções elementares (Figura 37, Figura 38 e Figura 39), possibilitando a identificação de princípios de solução e que combinados conseguem atender a função global do produto mecatrônico. O sistema descrito nas figuras tem como constante transformação de uma grandeza de estado “sinal”, sendo o sinal detectado, traduzido, analisado e interpretado como principal resposta ao problema.

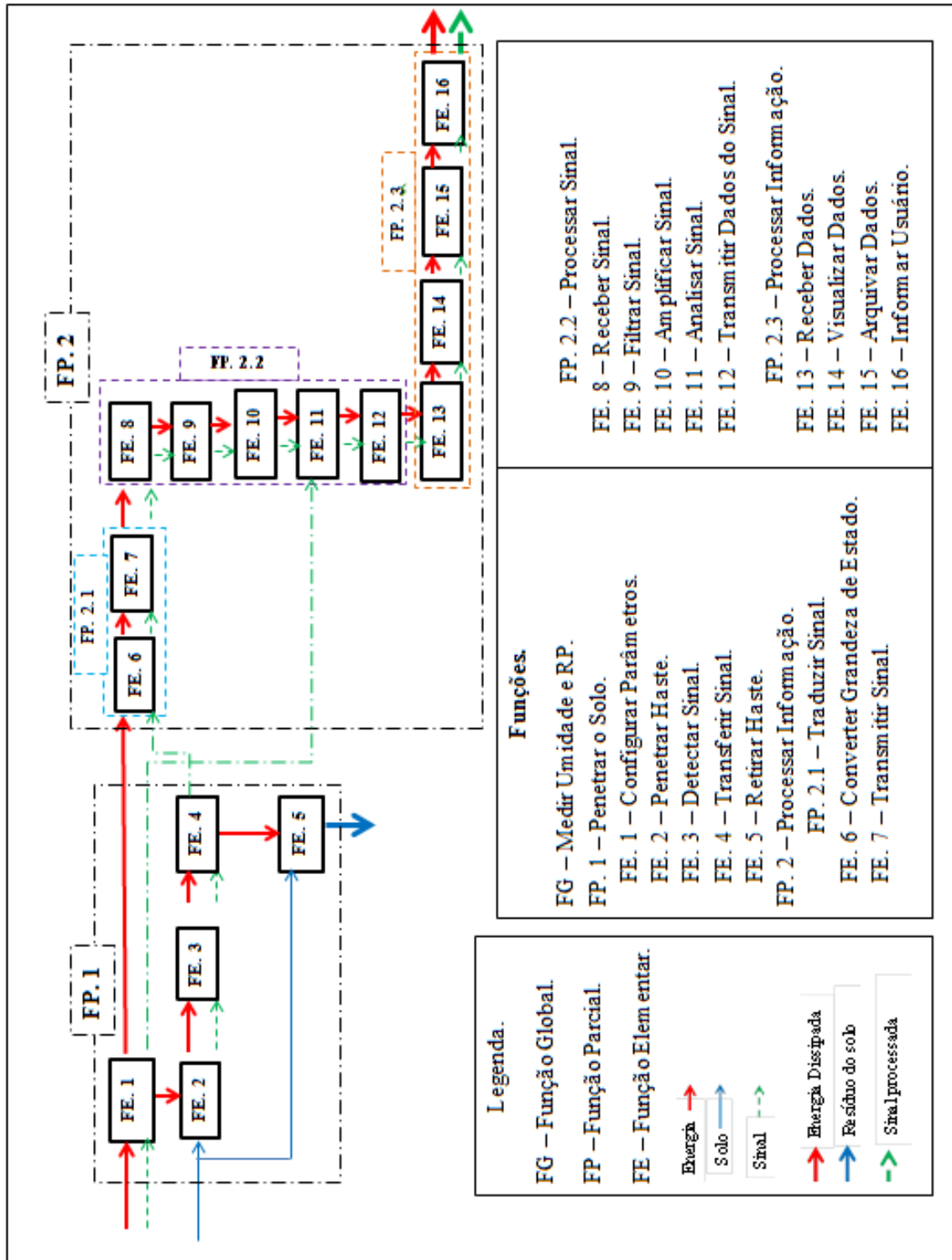


Figura 37: Funções Elementares do sistema 1.

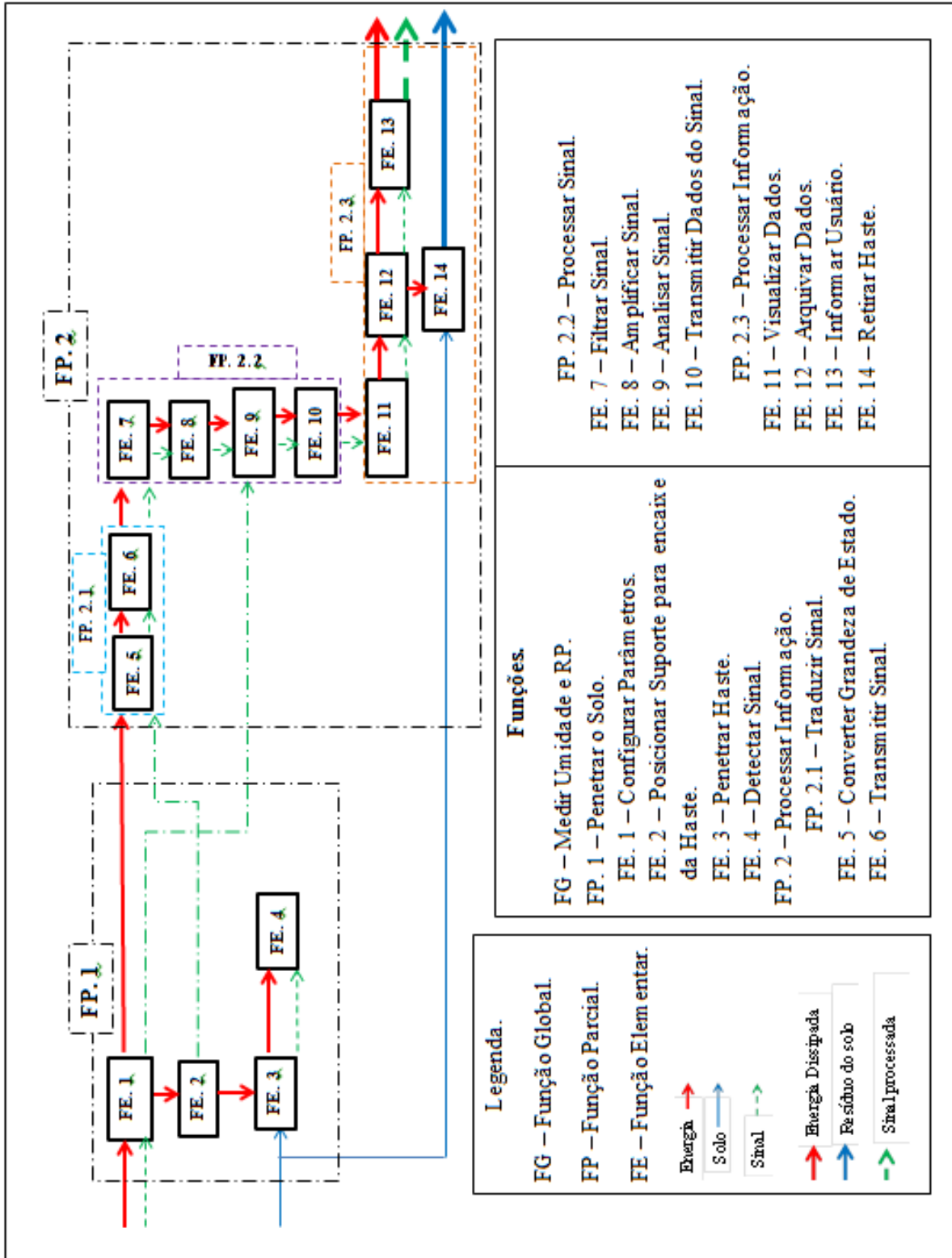


Figura 38: Funções Elementares do sistema 2.

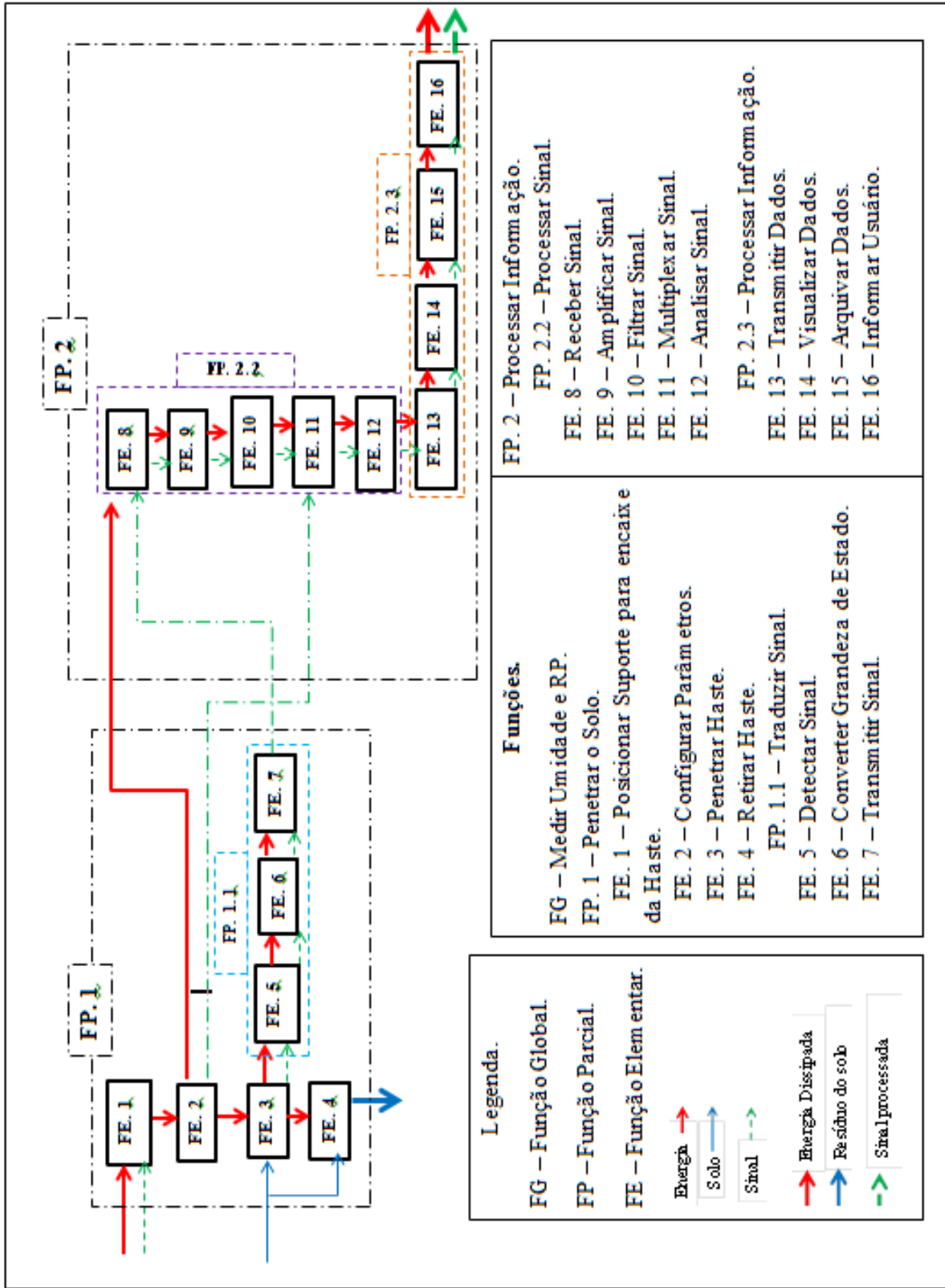


Figura 39: Funções Elementares do sistema 3.

4.2.3 Seleção da Estrutura Funcional que Melhor Atende ao Problema de Projeto de Produto Mecatrônico

Para escolher a estrutura funcional que melhor atende ao problema de projeto, ou seja, a alternativa de estrutura funcional que melhor atende às necessidades dos clientes usa-se a matriz de seleção de alternativa de estrutura funcional (MARIBONDO, 2000). Estas estruturas foram submetidas a uma seleção para a determinação de qual será a mais promissória para a concepção do instrumento.

O primeiro passo da seleção das estruturas de funções é a determinação dos critérios de avaliação com os quais serão confrontadas. Para isso, são utilizados os requisitos dos clientes com seus respectivos valores outorgados pelos clientes no QFD. Estes estão dispostos na primeira coluna da matriz de seleção de alternativas de estrutura funcional, e confrontados com as estruturas de funções elementares (Quadro 7).

O segundo passo consiste em escolher uma das estruturas funcionais para servir como referência para as demais. Assim, estabelecer comparações relativas entre as estruturas funcionais para cada um dos critérios de avaliação, assim:

1. A nota 1 representa um desempenho superior à referência;
2. A nota 0 representa um desempenho igual o equivalente à referência;
3. A nota -1 representa um desempenho fraco ou inferior à referência.

A escolha da melhor alternativa de estrutura funcional para o projeto de produto mecatrônico se estabelecerá com base na variante que obtiver maior pontuação na soma total.

Quadro 7: Matriz de seleção de alternativa da estrutura funcional.

Requisitos do Cliente	Valor	Alternativas das Estruturas Funcionais para o Sistema		
		Alternativa 1	Alternativo 2	Alternativo 3
Ter uma boa acurácia e confiabilidade	5	0	1	0
Ser multifuncional	5	0	0	0
Ser de fácil manuseio	5	0	0	0
Ser leve	5	1	0	0
Ser confortável pelo uso do operário	4	-1	1	0
Estar de acordo com as normas técnicas e leis	5	0	0	0
Ter proteção para atos inseguros	5	-1	0	0
Ser de fácil montagem e desmontagem	3	0	0	0
Ser inovador	3	0	0	0
Ter distribuição rápida, eficaz e segura	1	0	0	0
Ter componentes padronizados disponíveis no mercado	3	0	0	0
Ser de fácil manutenção	4	0	0	0
Ser de fácil fabricação	3	0	0	0
Não causar intensa reação visual	5	0	0	0
Não ter muitos cabos	2	0	0	0
Ter baixo consumo de energia	4	0	0	0
Ser de custo acessível	5	0	0	0
Ter custo acessível de fabricação e manutenção	4	0	0	0
Ser portátil	5	1	0	0
Ter facilidade de identificação de erros	3	0	0	0
Ter uma vida útil longa	5	0	0	0
Ter perpendicularidade na penetração da haste	3	-1	1	0
Utilizar processos convencionais de fabricação	1	0	0	0
Não gerar poluição	4	0	0	0
Ser de fácil descarte	5	0	0	0
Ter possibilidade de fabricar subsistemas em diversas empresas	1	0	0	0
Não necessitar intensa intervenção humana para sua operação	5	0	1	0
SOMA (+)		2	4	0
SOMA (-)		3	0	0
SOMA PONDERADA TOTAL		-2	17	0

Nota-se que após de realizadas as comparações relativas entre as estruturas funcionais para cada um dos critérios de avaliação com relação a uma referência (Função elementar do sistema 3), verificou-se que a “função elementar do sistema 2” se mostra mais adequada às necessidades dos clientes destacando-se por permitir suprir necessidade do tipo ergonômicos e de perpendicularidade nas penetrações.

Assim, a alternativa 2 obteve maior pontuação, de acordo com a avaliação e comparação com os requisitos dos clientes.



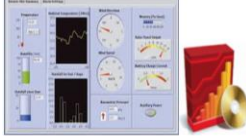
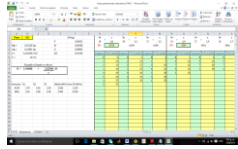
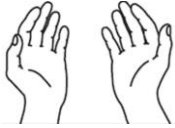






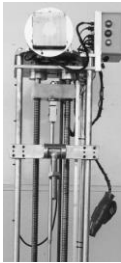








4.2.4 Busca dos Princípios de Solução e Geração de Alternativas de Concepção

Uma vez definida a estrutura funcional do produto, iniciasse a busca de princípios de solução alternativos que atendem a cada um das funções contidas na estrutura. Segundo Back et al. (2008), a busca de princípios pode ser por um levantamento da literatura técnica, de soluções adotadas em sistemas técnicos similares existentes ou, usando catálogos ou banco de dados de princípios de solução.

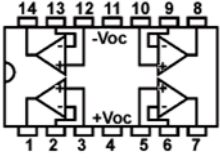
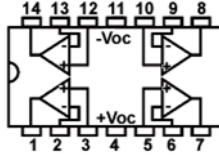
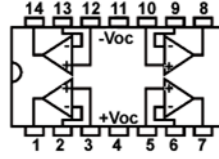
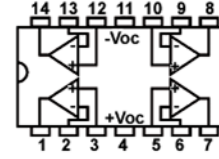

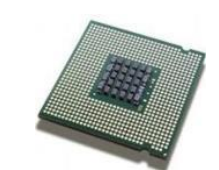

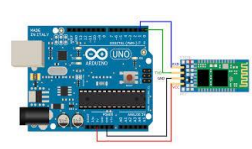






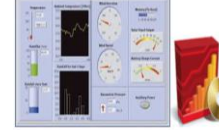
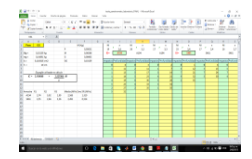








Essa busca de princípios aponta em direções específicas para auxiliar a tradução da estrutura funcional do instrumento, em uma linguagem mais técnica e física podendo indicar a composição dos diversos componentes futuramente, utilizados para a construção de um protótipo.

Nesta dissertação optou-se pela utilização do método da Matriz Morfológica o qual é empregado com grande sucesso para geração de soluções de projetos de produtos, e pelos bons resultados alcançados nestes trabalhos (Quadro 8). A Matriz Morfológica consiste na pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos visando à geração de diferentes soluções para o problema/funções a serem atendidas (FARINA, 2010).


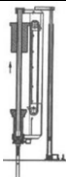
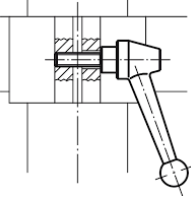

Quadro 8: Matriz Morfológica.

Função	Princípios de solução			
<p>FE. 1</p>	 Display + teclado ou botão	 Display 7 segmentos + teclado ou botão	 Interface Gráfica + Software	 Excel
<p>FE. 2</p>	 Manual	 Polias	 Válvula Hidráulica	 Motor CC
<p>FE. 3</p>	 Hidráulico	 Força física	 Massa que cai com altura constante	 Mecânico
<p>FE. 4</p>	 Sensores (Umidade tipo Resistivo + impacto + ultrassónico)	 Sensores (Umidade tipo capacitivo + ultrassónico + força)	 Sensores (umidade tipo TDR+ ultrassónico) + célula de carga tipo S	 Sensores (umidade tipo TDR + ultrassónico + força circular tipo resistivo)
<p>FE. 5</p>				
<p>FE. 7</p>	 Filtro de sinal	 Filtro de sinal	 Filtro de sinal	 Filtro de sinal

Continuação do Quadro 8: Matriz Morfológica

<p>FE. 8</p>	 <p>Amplificadores</p>	 <p>Amplificadores</p>	 <p>Amplificadores</p>	 <p>Amplificadores</p>
<p>FE. 9</p>	 <p>Microcontrolador</p>	 <p>Microprocessador</p>	 <p>FPGA's</p>	 <p>ARDUINO</p>
<p>FE. 10</p>	 <p>Conectores</p>	 <p>Conectores</p>	 <p>Conectores</p>	 <p>Conectores</p>
<p>FE. 11</p>	 <p>Display LCD</p>	 <p>Display 7 segmentos</p>	 <p>Interface Gráfica + Software</p>	 <p>Excel</p>
<p>FE. 12</p>	 <p>Pen Drive + SD card.</p>	 <p>Memoria RAM</p>	 <p>Memoria Interna</p>	 <p>Cabo USB</p>
<p>FE. 13</p>	 <p>Led's</p>	 <p>Buzzer</p>	 <p>Display LCD</p>	 <p>Display 7 segmentos</p>

Continuação do Quadro 8: Matriz Morfológica

FE. 14	 Esforço Físico	 Hidráulico	 Alavancamento	 Mecânico com motor
---------------	---	---	---	---

Legenda.

FG – Função Global. **FP** – Função Parcial. **FE** – Função Elementar.

Funções.	
FG – Medir Umidade e RP. FP. 1 – Penetrar o Solo. FE. 1 – Configurar Parâmetros. FE. 2 – Posicionar Suporte para encaixe da Haste. FE. 3 – Penetrar Haste. FE. 4 – Detectar Sinal. FP. 2 – Processar Informação. FP. 2.1 – Traduzir Sinal. FE. 5 – Converter Grandeza de Estado. FE. 6 – Transmitir Sinal.	FP. 2.2 – Processar Sinal. FE. 7 – Filtrar Sinal. FE. 8 – Amplificar Sinal. FE. 9 – Analisar Sinal. FE. 10 – Transmitir Dados do Sinal. FP. 2.3 – Processar Informação. FE. 11 – Visualizar Dados. FE. 12 – Arquivar Dados. FE. 13 – Informar Usuário. FE. 14 – Retirar Haste.

Nota-se que as funções detectar sinal, converter grandeza de estados e transmitir sinal foram atribuídas no Quadro 2, unicamente aos sensores não sendo feita a separação em componentes para cada função, uma vez que nos sensores se aplicam os mesmos princípios de solução que interatuam e integram estas funções.

4.2.4.1 *Análise e descrição dos conjuntos ou sistemas da matriz morfológica*

Neste tópico, são discutidos alguns dos princípios de solução do Quadro 8, que poderiam formar parte do instrumento a ser concebido. Alguns deles serão empregados simultaneamente na concepção para executar diversas funções, é por esse motivo que se torna pertinente uma breve descrição dos componentes ou conjuntos que formam parte das concepções apresentadas como alternativas de solução ao problema de projeto, obtendo uma geração e seleção de alternativas que permitira determinar a melhor alternativa de solução do projeto.

Sistema Mecânico de deslocamento linear: Quando se pensa em um sistema mecânico como princípio de solução para o desenvolvimento de funções elementares como: penetrar e retirar haste deve-se considerar o desdobramento funcional do sistema que integra a estrutura de sustentação mecânica que servira como chassi para o instrumento; as partes móveis do sistema (Acionamentos para movimentação).

Estrutura de sustentação mecânica: A estrutura do sistema pode ser projetada com diferentes tipos de materiais dependendo do tipo de trabalho e condições às que fica exposto o instrumento. Uma alternativa a se considerar é a utilização de ligas padronizadas de alumino, que apresentam características de baixo peso e propriedades mecânicas equivalentes àquelas dos aços mais utilizados. Essas ligas são empregadas normalmente em aplicações que necessitam de um comportamento estrutural superior.

A Figura 40 apresenta a estrutura de sustentação do sistema mecânico. Esta estrutura é composta por três eixos circulares e duas bases (superior e inferior), apresenta um baixo peso e simples conformação para o sistema.

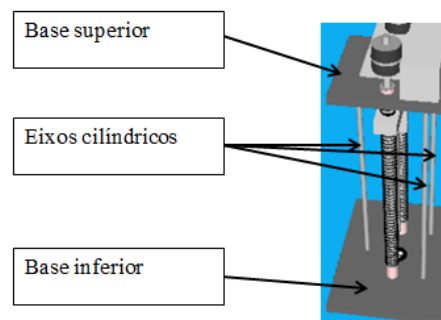


Figura 40: Estrutura de sustentação Mecânica.

Acionamentos para movimentação: Os acionamentos para movimentação de um sistema podem ser de tipo linear ou rotativo. Ambos atendem as necessidades de posicionamento, força, torque e suavidade de movimento. A escolha do tipo de acionamento estará sujeita e direcionada com o custo final das soluções que representa uma restrição fundamental do projeto.

Comumente a escolha mais econômica é do tipo rotativo, ou seja, o motor, a opção por um módulo de conversão de movimento (Rotativo – Translativo) deve ser

implementada. Existem varias maneiras de converter um movimento rotativo em translativo dependendo do sistema de parafusos de potência a se utilizar, entre estas maneiras podemos citar: fuso com castanha, pinhão, cremalheira, correntes e polias.

Os parafusos de potência são aplicados juntamente com porcas especiais (buchas ou mancais rosqueados) para simplesmente transformar o movimento angular (rotação) em movimento linear (translação retilínea) de um determinado mecanismo (SHIGLEY, MISCHKE, & BUDYNAS, 2005).

A Figura 41 apresenta o sistema de acionamentos para a movimentação. Esta figura é a representação de um sistema de conversão de movimento rotativo em movimento translativo composto de um motor elétrico e um sistema de parafuso de potência.

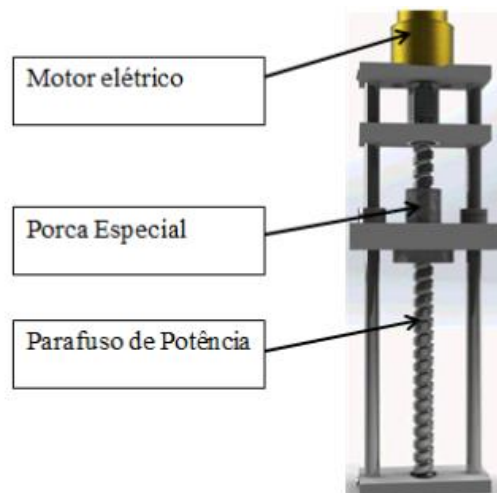


Figura 41: Sistema de acionamento para movimentação.

É importante ressaltar que, quando se deseja trabalhar com este tipo de sistema cuja transmissão será por parafuso de potência, é necessário determinar alguns parâmetros do motor como: potência, o torque e a rotação de funcionamento que o habilita para realizar um determinado trabalho. Para isso é importante conhecer aspectos como: o tipo de movimento (sistema de parafuso de potência), a massa do corpo que será deslocado, a velocidade desejada e outros.

Sistema Eletro-Hidráulico: A arquitetura dos sistemas eletro-hidráulicos são esquemas de comandos e acionamentos que representam os diferentes componentes

hidráulicos e elétricos que interatuam entre eles para se conseguir o funcionamento desejado do sistema. Enquanto a arquitetura hidráulica representa a analogia das partes mecânicas (Figura 43), a arquitetura elétrica (Figura 42) representa a sequência de comando de controle dos componentes hidráulicos, para que as partes móveis do sistema apresentem os movimentos finais desejados.

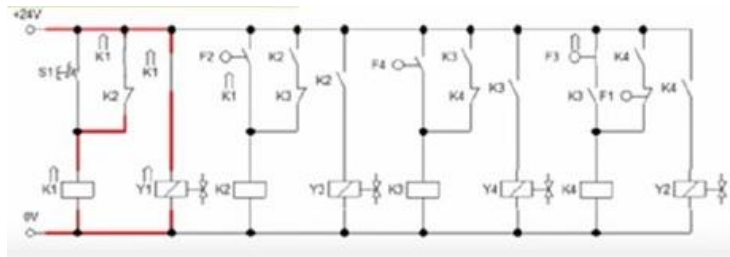


Figura 42: Arquitetura elétrica do sistema Eletro-Hidráulico.

A arquitetura básica de um sistema hidráulico segundo Ferreira de Almeida pode ser subdividida em três grupos assim – Elementos de trabalho: cilindros e motores – elementos de comando e regulação: válvulas direcionais, válvulas de fluxo, válvulas de pressão – elementos de alimentação: bombas, reservatório, líquido e filtro.

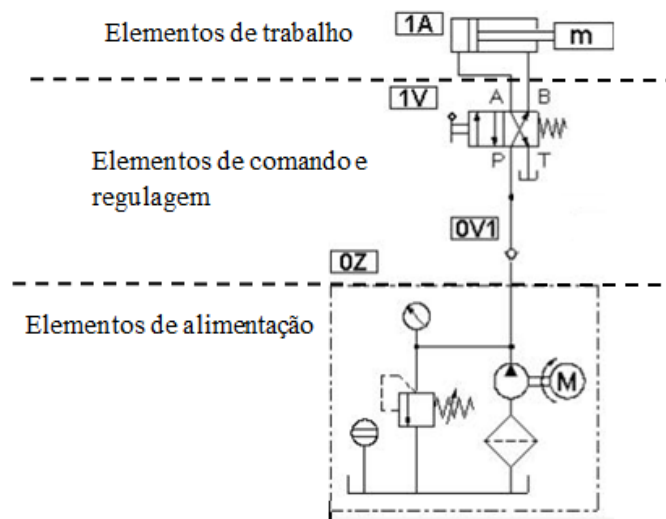


Figura 43: Arquitetura básica Hidráulica do sistema Eletro-Hidráulico.

Sistemas de Aquisição de Dados: Os mais variados tipos de fabricantes têm disponibilizado uma grande quantidade de sistemas de interpretação, aquisição de dados, e softwares, capazes de atender com qualidade a solução de diversas funções, entre estas

podemos citar: configuração de parâmetros, analisar sinal, transferir dados, informar usuário, visualizar dados. É através dos sensores que é possível coletar as mais variadas informações do sistema que se monitoram através de um visualizador de dados pelo usuário. Segundo Soloman (2010), para o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados (Figura 44) são necessários: um fenômeno do mundo real, sensores, um condicionamento de sinal, um hardware para a aquisição de dados, controle dos sensores, um sistema computacional, interfaces de comunicação e um programa.



Figura 44: Arquitetura de um sistema de aquisição de dados.

Fonte: adaptado de Carvalho (2014).

De acordo com o apresentado na Figura 44, um fenômeno físico é qualquer grandeza física (penetração, umidade, temperatura, pressão e outros) que se deseja observar, controlar e medir através de algum instrumento.

Transdutor é um sistema ou componente de um sistema capaz de traduzir os fenômenos físicos em sinais elétricos que, ligados ao sistema de condicionamento de sinal permitem a produção de um sinal capaz de ser detectada pelo equipamento de medição. O sistema de medição traduz os valores que representam o fenômeno para o homem. O computador é um meio de apresentação dos dados lidos pelo sistema total.

Sensores: São dispositivos ou sistemas capazes de detectar/captar ações ou estímulos externos e responder em consequência. Além disso, estes sistemas podem transformar as grandezas físicas ou químicas em grandezas elétricas e transmitir o sinal. Satisfazendo assim funções elementares do sistema como detectar sinal, converter grandezas de estados, e transmitir sinal.

Para Wendling (2012) sensor é um termo empregado para designar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa, térmica, cinética,

relacionando informações sobre uma grandeza física que precisa ser mensurada (medida), como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, posição e outros.

No entanto o autor citado acima enfatiza que um sensor nem sempre tem as características elétricas necessárias para ser utilizado em um sistema de controle. Normalmente o sinal de saída deve ser manipulado antes de sua leitura no sistema de controle. Isso geralmente é realizado com um circuito de interface simples (Condicionamento de sinal) para produção de um sinal que possa ser lido pelo controlador.

A integração dos subsistemas “sensor + interface” é comumente denominado transdutor. Transdutor é o instrumento completo que engloba sensor e todos os circuitos de interface (amplificação, filtragem) capazes de serem utilizados numa determinada aplicação (Wendling, 2012).

É importante ressaltar que existe uma série de características relacionadas aos sensores que devem ser levadas em consideração no momento da seleção do sensor para a realização de uma determinada aplicação. Algumas dessas características são: tipo de saída, linearidade, alcance (range) e velocidade de resposta.

Equipamento de medição: A arquitetura de conformação do equipamento de medição composta de um *hardware* (placa eletrônica) e um *software* (ambiente de desenvolvimento) para criação dos diferentes projetos.

A placa eletrônica é a responsável pelas entradas e saídas do sistema de aquisição de dados. Ou seja, ela devesse executar funções como: processamento e conversão de sinais a formatos análogo/ digital ou digital/análogo, transferir informação em direções diferentes do sistema, análise e armazenamento de dados. Para a geração dos programas que serão carregados no microcontrolador da placa eletrônica, realizar ditas funções, é utilizado um ambiente de programação integrado (*software*). A síntese utilizada neste *software* é baseada na linguagem de alto nível C.

Os equipamentos de medição atualmente em sua maioria existem em variedades diferentes e provenientes de diversos fabricantes, baseados no *Open Source Hardware (OSHW)* ou Hardware Livre.

Open Source Hardware (OSHW) é um termo para artefatos tangíveis, máquinas, dispositivos ou outros objetos físicos, cujo projeto foi disponibilizado ao público de modo que qualquer um pode construir, modificar, distribuir e utilizar estes artefatos (DEFINED, 2013)

Alavancado pelo desenvolvimento da microeletrônica, o crescimento da internet e heranças do *software livre*. Tudo isso, permite oferecer e fornecer plataformas de prototipagem eletrônica de baixo custo de aquisição, e fácil manuseio para qualquer projeto de produto mecatrônico. Entre eles pode-se citar o Arduino.

Arduino: Foi desenvolvido na Itália em 2005 com o objetivo de oferecer uma plataforma de prototipagem eletrônica de baixo custo de aquisição e fácil manuseio (ARDUINO, 2015). A arquitetura de conformação de Arduino é composta de um *hardware* (placa eletrônica) e um *software* (ambiente de desenvolvimento) para criação dos diferentes projetos. A arquitetura do Arduino é “*open source*” onde a documentação para o desenvolvimento do *hardware* e código fonte (*software*) do ambiente de desenvolvimento está disponível para os usuários, que quando modificado, dá origem a outros derivados.

É por esse motivo que, a placa de Arduino não possui recursos de rede, mas pode ser combinado com outros Arduinos ou derivados criando extensões chamadas *Shields* que acrescentam várias funções específicas, desde controle sobre de motores até sistemas de rede sem fio.

Em termos práticos o Arduino é um pequeno computador em que é possível se interagir com o ambiente (Figura 45) já que pode operar sem a presença do computador (*standalone*)

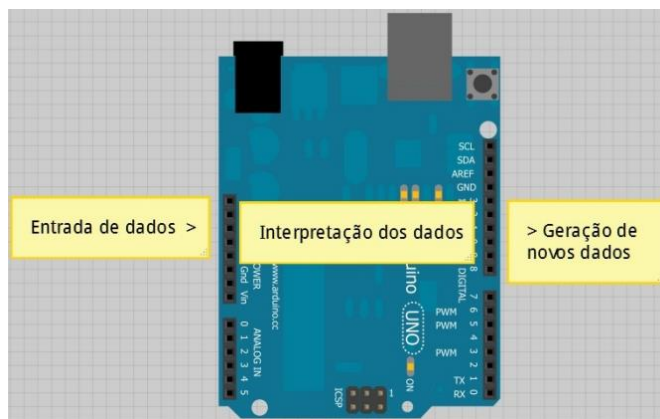


Figura 45: Princípio de funcionamento do Arduino.

Fonte: Arduino (2015).

Para geração dos programas que serão enviados para a placa eletrônica, a plataforma Arduino envolve um ambiente de desenvolvimento integrado (*IDE – Integrated Development Environment*) ao *hardware*. O IDE do Arduino foi desenvolvida em JAVA, na biblioteca AVR-gcc (para microcontroladores da família AVR) e a sintaxe utilizada baseada na linguagem de programação de alto nível C.

A arquitetura de Arduino, mostrado na Figura 46, apresenta o ciclo de desenvolvimento de um programa que será carregado na placa eletrônica para realizar um determinado trabalho.

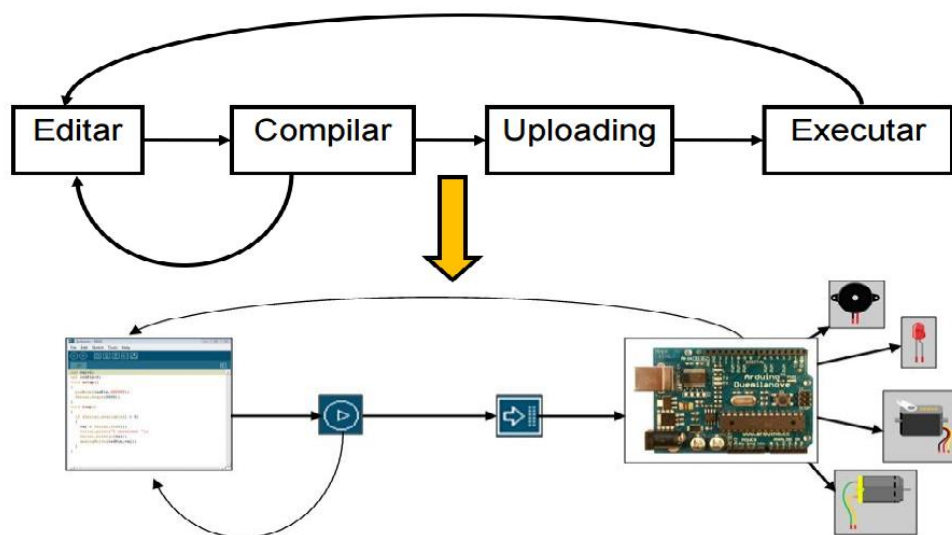


Figura 46:Arquitetura de desenvolvimento de um projeto Arduino.

4.2.4.2 *Geração e seleção de alternativas de projeto*

Para gerar e selecionar alternativas de projeto utiliza-se a abordagem *DSM (Design Structure Matrix)* baseado em componentes. Segundo Yassine (2004) esta abordagem permite a modelagem e análise de arquiteturas de sistema / produto, definindo as interações entre os subsistemas e componentes compreendendo o sistema / produto.

Por outra parte a arquitetura de produto permite atribuir as funções elementares aos componentes físicos da arquitetura, de forma a atender os requisitos dos clientes levantados na fase do Projeto Informacional e a função global.

O primeiro passo no preenchimento da matriz DSM é a consideração e definição das diretrizes de interação definidas nesta dissertação como:

Espacial – A interação do tipo espacial identifica necessidades de adjacência entre dois elementos. Associações de espaço físico e alinhamento.

Energia – A interação do tipo de Energia identifica necessidades de um fenômeno físico entre dois elementos.

Informação – A interação do tipo de informação identifica necessidades de troca de informações ou sinal entre dois elementos.

Material – A interação do tipo de material identifica necessidades de interfaces ou componentes entre dois elementos.

Com a definição destas diretrizes, torna-se possível identificar que, uma interação entre dois componentes de um sistema complexo podem, assim, ser representados como um conjunto de análise de quatro pontos, ou seja, uma matriz 2X2 (Espacial, Energia, Informação e Material) dentro da matriz DSM.

O segundo passo consiste em utilizar um esquema de quantificação para as interações que dentro do DSM pode ajudar neste tipo de análise. A Figura 47 descreve este esquema de quantificação das interações.

Valor/ Diretriz	Espacial	Energia	Informação	Material
+ 2 (Necessária)	Necessária para Funcionalidade			
+1 (Desejado)	Benéfica, mas não é absolutamente necessária para a funcionalidade.			
0 (Indiferente)	Não afeta a Funcionalidade			
-1 (Indesejada)	Causa Efeitos negativos, mas não impede sua funcionalidade.			
-2 (Prejudicial)	Evitada para atingir a funcionalidade.			

Figura 47:Esquema de quantificação das diretrizes.

Fonte: adaptado de Pimmler & Eppinger (1994).

Assim, para obter as informações necessárias das interações dos componentes, e preencher a DSM, a equipe de projeto apoia-se em métodos, ferramentas, produtos concorrentes e conhecimentos próprios de engenheiros da equipe.

A Figura 48 mostra como este esquema de avaliação é aplicado à interação entre dois componentes (Sensor – Arduino (equipamento de medição)) a partir de informações levantadas em tópicos anteriores.

Componentes	Sensor	Arduino (equipamento de medição)
Funções	Transformar as grandezas físicas ou químicas em grandezas elétricas e transmitir o sinal.	Executar funções como: processamento e conversão de sinais a formatos análogo/digital ou digital/análogo, e transferir e analisar informações em direções diferentes do sistema.
Relação	É através dos sensores que é possível coletar as mais variadas informações do sistema que se analisam na placa eletrônica para ser transmitidos em direções diferentes do sistema.	
Avaliação	Espacial: 0	Energia: 2
	Informação: 2	Material: 2

Figura 48: Exemplo da análise e avaliação das diretrizes entre dois componentes.

Fonte: adaptado de Pimmler & Eppinger, (1994).

O terceiro passo consiste em agrupar os componentes por domínios (Mecânicos, elétricos e de controle) da matriz DSM. Segundo Pimmler & Eppinger (1994) o agrupamento pode ser utilizado para definir não só a arquitetura física do produto, mas também a estrutura da equipe de desenvolvimento de produtos.

O processo de agrupamento consiste em reordenar as linhas e as colunas da matriz DSM-inicial, a fim de aglomerar os elementos positivos mais perto da diagonal. Os blocos resultantes da matriz, com os blocos da diagonal correspondem ao resultado do agrupamento arquitetônico.

De acordo com o anterior, foram definidas as matrizes DSM, logo agrupadas em domínios dos componentes (Mecânicos, elétricos e de controle) e finalmente desenvolvidas quatro concepções de arquitetura de produto como se mostram a continuação. Este resultado permitira realizar uma seleção de alternativas que determinara a melhor alternativa de solução do projeto.

A Figura 49 mostra a primeira matriz de interação DSM baseada em componentes, apresentando os resultados de quantificar as interações para os dez elementos que poderiam integrar-se para conformar a primeira concepção de arquitetura de produto. Estas interações foram levantadas através das experiências e conhecimentos da equipe de projeto, catálogos de equipamentos e produtos concorrentes e a matriz morfológica.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Display + Teclado	A			0 2	0 0 2 0	2 0 2 0	2 0 2 0	2 0 2 0	1 0	
Mãos	B		1 0	0 0						1 0
Haste	C	1 0		2 2						0 2
Sensores	D	0 0	2 2		1 2 0 2	2 0 0 2	0 0 2 0	0 0		
Circuito (Interface) Filtragem e Amplificação	E	0 0		1 2		1 0 2 0	2 0 1 0	1 0	1 0	
Arduino	F	2 0		0 2	1 0		2 0 2 0	1 0		
Conectores	G	2 0		2 0	2 0 2 0			2 0 2 0		
Micro – SD	H	2 0		0 2	1 0 2 0	2 0			1 0	
Led's	I	1 0		0 0	1 0 1 0	2 0	1 0			
Tambor Roscado	J		1 0							

Lenda
Espacial

S	E
---	---

 Energia
Informação

I	M
---	---

 Material

Figura 49: Primeira Matriz DSM baseada em componentes

Após as interações foram avaliadas, analisadas, quantificadas e agrupados os componentes de acordo com o domínio. A Figura 50 mostra o resultado do agrupamento evidenciando três principais módulos de acordo com as interações dos componentes. Além,

permite identificar uma interação dos componentes dos diferentes módulos direcionados principalmente pelas diretrizes Espacial e Informação. Neste caso, o papel integrador é desempenhado pelos sensores/ circuito de filtragem e amplificação.

	B	J	C	D	E	G	F	A	I	H
Mãos	B	1 0 0 2	1 0 0 0							
Tambor Roscado	J	1 0 0 2	2 0 0 0							
Haste	C	1 0 0 0	2 0 0 0	2 2 0 0						
Sensores	D		2 2 0 0	1 2 2 2	2 2 2 0	2 0 2 0	0 2 2 2	0 0 2 2	0 0 2 2	0 0 2 2
Circuito (Interface) Filtragem e Amplificação	E			1 2 2 2	2 2 2 0	2 0 2 0	1 0 2 2	0 0 2 2	0 0 2 2	1 0 2 2
Conectores	G			2 0 2 0	2 0 2 0	2 0 2 0	2 0 2 0	2 0 2 0	2 0 2 0	2 0 2 0
Arduino	F			0 2 2 2	1 0 2 2	2 0 2 0	2 0 2 2	2 0 2 2	1 0 2 2	2 0 2 2
Display + Teclado	A			0 0 2 2	0 0 2 2	0 0 2 0	2 0 2 2	2 0 2 2	1 0 2 2	2 0 2 2
Led's	I			0 0 2 2	1 0 2 2	2 0 2 2	1 0 2 2	1 0 2 2	2 0 2 2	1 0 2 2
Micro - SD	H			0 2 2 2	1 0 2 2	2 0 2 2	2 0 2 2	2 0 2 2	1 0 2 2	2 0 2 2

Lenda

Espacial	S	E	Energia
Informação	I	M	Material

Figura 50: Agrupamento dos componentes na primeira matriz DSM.

Com as informações obtidas do agrupamento da DSM, foi definida a primeira concepção de arquitetura de produto, apresentada na Figura 51, destaca-se pela utilização de uma arquitetura de controle que emprega a maioria das funções elementares do sistema e que é de baixo custo de fabricação; um sistema de alavancamento (conjunto de desacople conformado por um tambor com rosca e um eixo de aço para retirar a haste do solo) que reduz o esforço físico do operador.

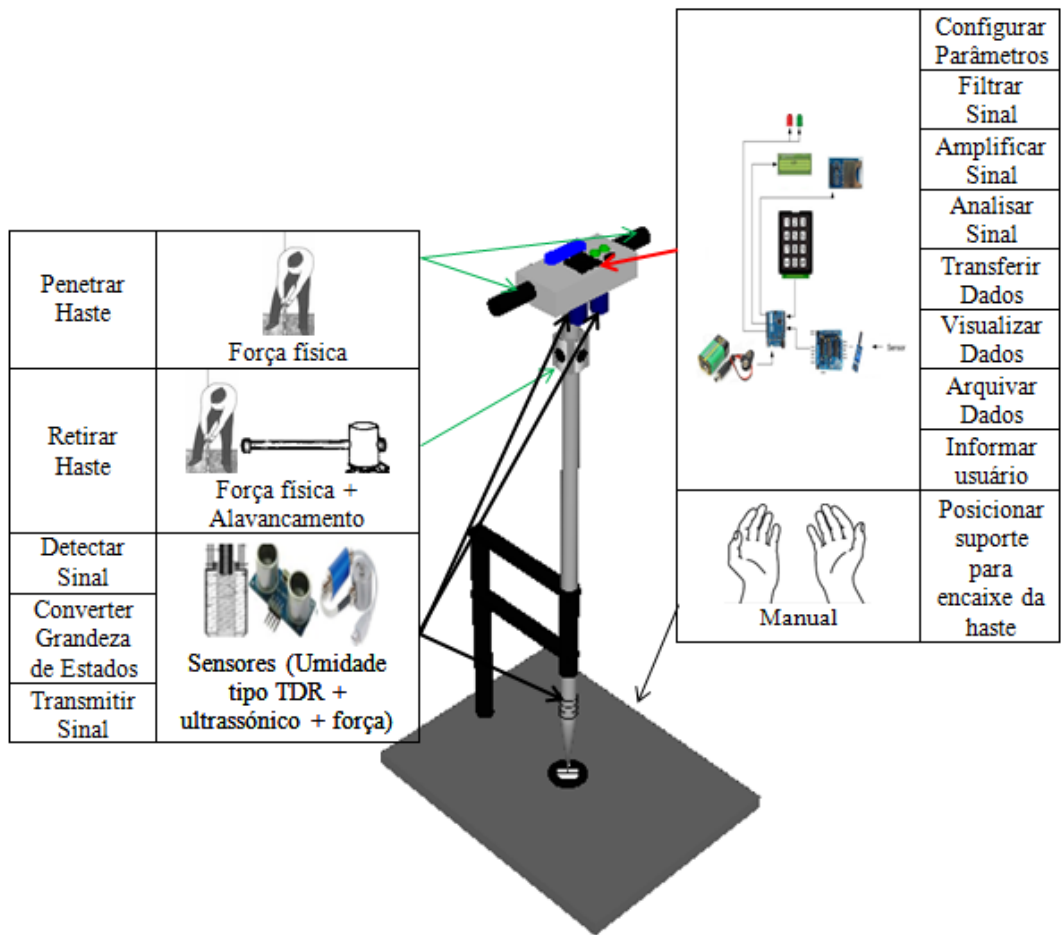


Figura 51: Alternativa de solução A – arquitetura de produto

A Figura 52 mostra a segunda matriz de interação DSM baseada em componentes, apresentando os resultados de quantificar as interações para os onze elementos que poderiam integrar-se para conformar a segunda concepção de arquitetura de produto. É importante destacar que para a análise desta matriz DSM, o sistema hidráulico não foi desdobrado em componentes de domínio específico de tipo mecânico, mas foi considerado como um componente do sistema Eletro-Hidráulico. Esta consideração permitiu reduzir a complexidade de análise dos componentes que formarão uma arquitetura.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Interface Gráfica	A			0 0		0 0	0 0	2 0		1 0	0 0	
Mãos	B			2 2		2 2	2 2	2 0		2 0	2 1	1 0
Sistema Elétrico	C	0 0			1 0	0 2	2 0	0 0	2 0	0 0	0 0	0 0
Sistema Hidráulico	D			1 0		2 2				0 0	0 0	2 -2
Sensores	E	0 0		0 2	2 2		2 2	0 2	2 0	0 2	0 2	1 2
Circuito (Interface) Filtragem e Amplificação	F	2 2		2 2		2 2		0 0	2 0	0 0	2 0	
Microprocessador	G	2 0		0 0		0 2	0 0		2 0	2 0	1 0	
Conectores	H			2 0		2 0	2 0	2 0		2 0		
Memoria Interna	I	1 0		0 0	0 0	0 2	0 0	2 0	2 0		0 0	
Cabo USB	J	0 0		0 0	0 0	0 2	2 0	1 0		0 0		
Haste	K	2 1		2 2	2 2	2 2	2 0	2 2		2 1		
			1 0	0 0	2 -2	1 2						
			0 0	0 2	0 2	2 0						

Lenda
Espacial

S	E
I	M

 Energia
Informação

S	E
I	M

 Material

Figura 52: Quantificação das interações na segunda matriz DSM.

Após as análises das interações dos diferentes componentes em relação com as quatro diretrizes, foram agrupados os componentes como mostrado na Figura 53. A figura mostra o resultado do agrupamento evidenciando uma redução significativa da complexidade devido a análise realizada dos componentes e sistemas no passo anterior. Isso permitiu identificar três módulos principais da arquitetura de acordo com as interações dos componentes. Além, permite analisar uma forte interação dos componentes dos diferentes módulos. Neste caso, o agrupamento dos componentes na matriz DSM identifica necessidades significativas de integração dos módulos. O papel integrador é então desempenhado por diferentes componentes dentro da arquitetura a se desenvolver.

	B	K	D	C	E	F	H	J	G	I	A
Mãos	B	1 0	0 0								
Haste	K	1 0	0 0	2 0	-2 2	0 0	0 2	1 2	2 0		
Sistema Hidráulico	D		2 0	-2 2		1 2	0 0	2 2	2 0	2 2	2 2
Sistema Elétrico	C		0 0	0 2	1 2	0 0		0 2	2 2	2 2	2 2
Sensores	E		1 2	2 0	2 2	2 0	2 2	0 0	2 2	0 2	2 0
Circuito (Interface) Filtragem e Amplificação	F				2 2	2 2					
Conectores	H			2 2	0 0		2 2	0 0		2 2	2 2
Cabo USB	J			0 2	0 2	0 2	0 2	0 2		1 2	0 2
Microprocessador	G			0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	1 2	0 2	2 2
Memoria Interna	I			0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	2 2	1 2
Interface Gráfica	A			0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	1 2	0 2

Lenda
Espacial

S	E
I	M

 Energia
Informação

S	E
I	M

 Material

Figura 53: Agrupamento dos componentes na segunda matriz DSM.

A segunda concepção, apresentada na Figura 54, destaca-se pela utilização de um sistema hidráulico para a operação de um embolo de efeito duplo, que é controlado através de uma interface gráfica de *software*. Essa arquitetura de produto utiliza o computador como parte fundamental do sistema onde estão alocados diferentes componentes que atendem a diferentes funções elementares do sistema, além disso, possui uma interface gráfica desenvolvida para o controle do sistema e uma melhor interação com o operador. No entanto, para a comunicação do computador com o sistema (sensores e circuito hidráulico) é necessário à utilização de um subsistema de amplificação e filtragem que permitira a comunicação.

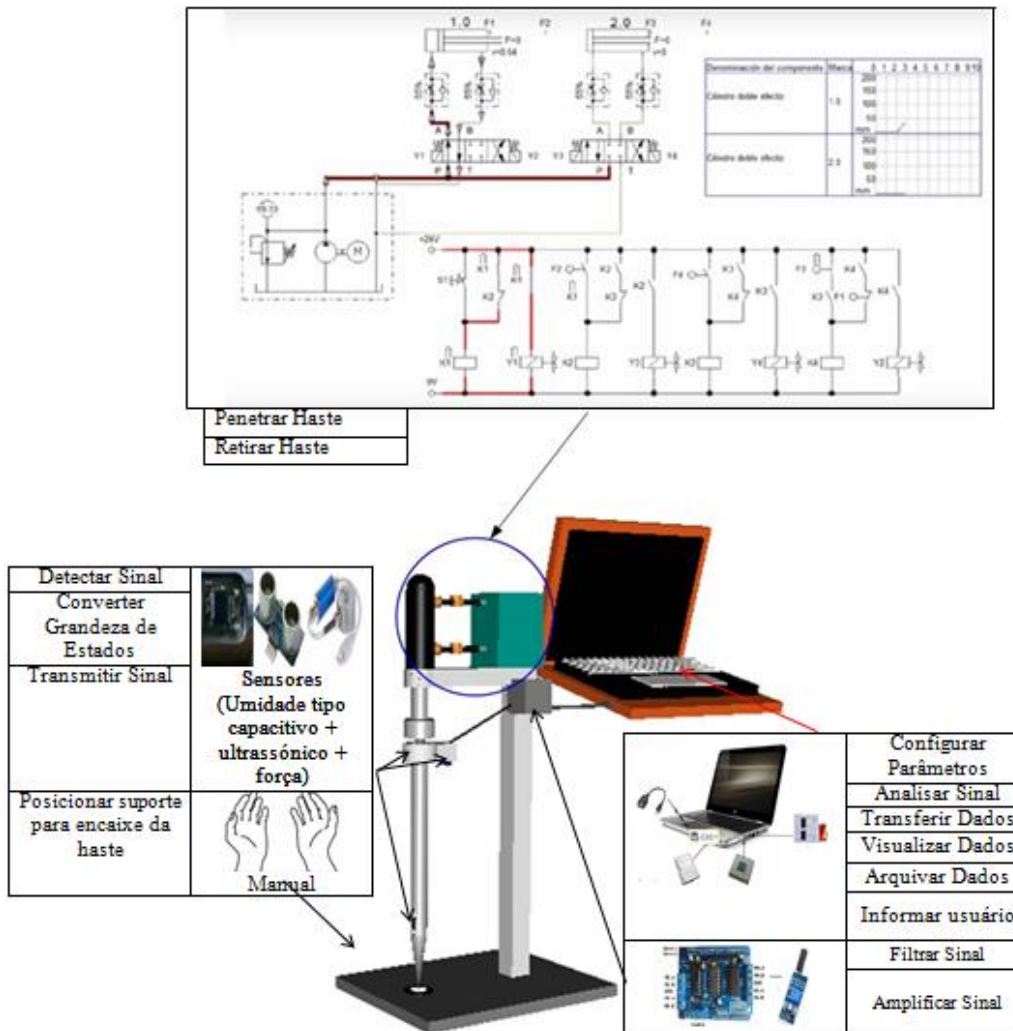


Figura 54: Alternativa de solução B – arquitetura de produto.

A Figura 55 mostra a terceira matriz de interação DSM baseada em componentes, apresentando os resultados de quantificar as interações para os catorze componentes que integraram uma nova concepção de arquitetura de produto. A diferença em relação à concepção anterior onde o sistema hidráulico é visto como um componente ao se considerar que é um kit comercial onde diversas análises com relação a alguma diretriz já foi tratado, vem através do desdobramento do sistema de deslocamento linear em componentes individuais devido a que o sistema apresenta aspectos importantes relacionados com as diretrizes que precisam ser analisados cuidadosamente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Interface Gráfica Excel	A	0 0	1 0		0 0	0 0	0 0	0 0	0 0			2 0		
Cabo USB	B	0 0	2 1	0 0	2 2	2 2	2 2	2 2	0 0			1 2		
Memoria Interna	C	1 0	0 0		2 0	0 0	0 0	0 0	0 0			2 0		
Conectores	D			2 0		2 0	2 0	0 0	2 0		1 -1	2 0		
Display 7 segmentos	E	0 0	0 0	0 0	2 0		1 0	0 0	0 0	1 0	1 -1	0 0	1 0	
FPGA	F	0 0	0 0	0 0	2 0	1 0		0 2	0 0	1 0	1 -1	0 0	1 0	
Sensores	G	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 2		0 0	2 2	1 -2	0 2	1 0	1 2
Motor	H	0 0	0 0	0 0	2 0	0 0	0 0	0 0		2 -1	1 -2	0 0	1 0	1 0
Parafusos de Potência	I				1 0	1 0	2 2	2 -1		1 -2	1 0		2 -2	2 0
Estrutura de sustentação	J			1 -1	1 -1	1 -1	1 -2	1 -2	1 -2		1 0		2 0	2 0
Mãos	K								1 0	1 0			1 0	
Microprocessador	L	2 0	1 2	2 0	2 0	0 0	0 0	0 2	0 0					
Porca Especial	M					1 0	1 0	1 0	1 0	2 -2	2 0	1 0		2 0
Haste	N							1 2	1 0	2 0	2 0		2 0	

Lenda
Espacial

S	E
---	---

 Energia
Informação

I	M
---	---

 Material

Figura 55: Terceira matriz DSM baseada em componentes.

O agrupamento dos componentes é mostrado na Figura 56. Foram identificados três módulos principais da arquitetura (mecânico, eletrônico e de controle). O módulo mecânico apresenta uma interação forte entre os componentes que o conformam, evidenciando aspectos relacionados com a diretriz de Energia que tem que ser controlados para o correto funcionamento do mesmo. Por outra parte, o conceito de agrupamento que esta relacionado à concentração de elementos positivos que estão mais próximos da diagonal (PIMMLER & EPPINGER, 1994), deve ser redefinido devido à interação de componentes que integram um sistema complexo para apresentar qualificações de tipo negativas que são de muita importância no adequado desenvolvimento de sua concepção, pois são diretrizes de funcionamento que precisam ser evitadas para um melhor funcionamento do sistema.

		K	N	J	H	I	M	G	E	F	D	B	L	C	A
Mãos	K		1 0	1 0		1 0	1 0								
Haste	N	1 0		2 0	1 0	2 0	2 0	1 2							
Estrutura de sustentação	J	1 0	2 0		1 -2	1 -2	2 0	1 -2	1 -1	1 -1	1 -1				
Motor	H		1 0	1 -2		2 -1	1 0	0 0	0 0	0 0	2 0	0 0	0 0	0 0	0 0
Parafusos de Potência	I	1 0	2 0	1 -2	2 -1		2 -2	2 2	1 0	1 0					
Porca Especial	M	1 0	2 1	2 0	1 0	2 -2		1 0	1 0	1 0					
Sensores	G		1 2	1 -2	0 0	2 2	1 0		0 0	0 2	0 0	0 0	0 2	0 0	0 0
Display 7 segmentos	E			1 -1	0 0	1 0	1 0	0 0		1 0	2 0	0 0	0 0	0 0	0 0
FPGA	F			1 -1	0 0	1 0	1 0	0 2	1 0		2 0	0 0	0 0	0 0	0 0
Conectores	D			1 -1	2 0			0 0	2 0	2 0			2 0	2 0	
Cabo USB	B				0 0			0 0	0 0	0 0			2 0	0 0	0 0
Microprocessador	L				0 0			0 2	0 0	0 0	0 2	0 1	2 2	2 0	2 0
Memoria Interna	C				2 2			2 2	1 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 0
Interface Gráfica Excel	A				0 0			0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 2	0 1	0 0
					0 2			2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 1	2 0	2 0

Lenda
Espacial

S	E
---	---

 Energia
Informação

I	M
---	---

 Material

Figura 56: Agrupamento do domino dos componentes na terceira matriz DSM

A terceira arquitetura de produto, apresentada na Figura 57, utiliza um sistema mecânico (carro porta-cabeçote, guias cilíndricas roscadas e motor) para penetrar e retirar a haste. Esse esquema é muito empregado em sistemas robóticos cartesianos e impressoras. Uma arquitetura de controle e aquisição composta de uma FPGA que faz a comunicação entre o sistema e o Excel (computador). Além disso, a FPGA permite realizar funções como: arquivar dados e informar o usuário por meio do Display 7 segmentos.

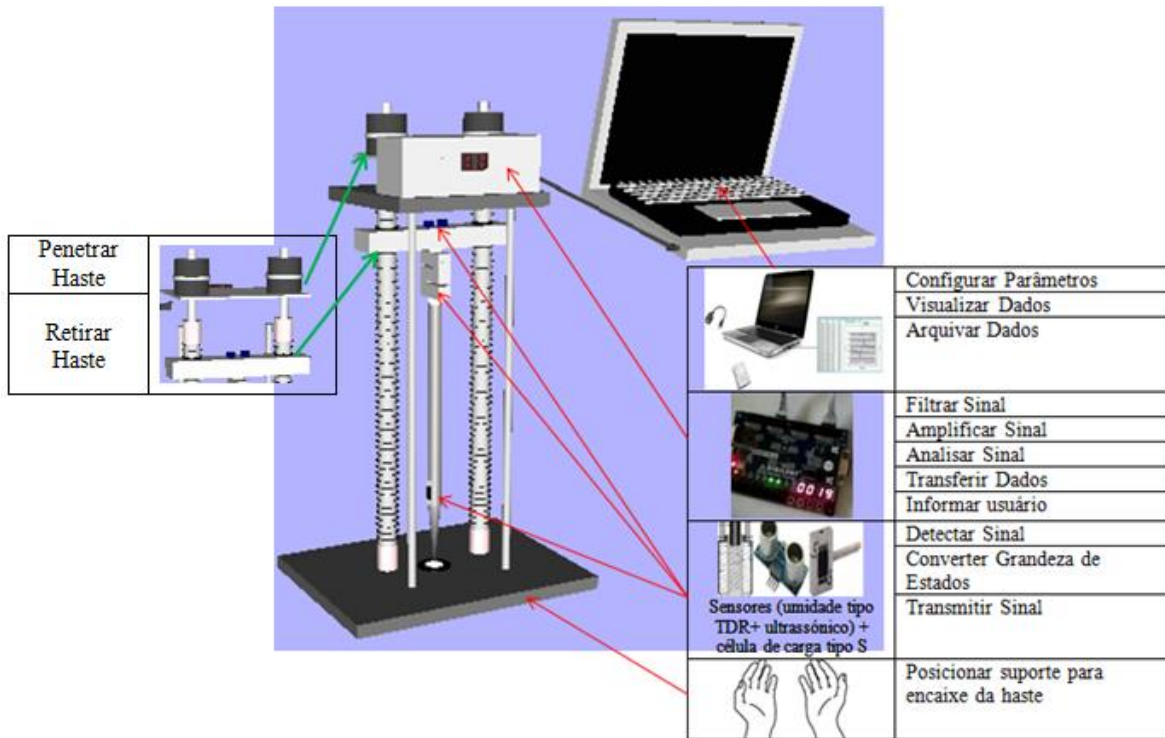


Figura 57: Alternativa de solução C – arquitetura de produto.

A Figura 58 mostra a quarta matriz de interação DSM baseada em componentes, apresentando os resultados de quantificar as interações para os dezessete componentes que integraram uma nova concepção de arquitetura de produto. Os sistemas de alavanca e de impacto para penetração apresentados na matriz morfológica foram desdobrados em componentes individuais permitindo analisar diretrizes de interação espacial e de energia que se possam utilizar em uma nova concepção.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Peça de sujeição para manuseio	A		1 0	2 0	1 0			1 0	1 0		1 0	2 0	1 0	2 0		2 0	
Sensor	B			2 0	2 0	0 2	0 0	1 0		1 2		1 1		1 0	2 2	1 2	0 2
Parafuso	C	1 0			2 0	2 0			1 0	1 0		1 0	1 0	2 -2	2 0		1 0
Mãos	D	2 0	2 0	2 0					2 0	1 0				1 0	1 0		1 0
Corpo (Base do macaco mecânico)	E	1 0	2 0	2 0					1 0	1 0		1 0	1 0	2 -2	1 0		1 0
Arduíno	F		0 2					1 0			2 0					2 0	2 0
Micro - SD	G		2 2					2 2			2 2					2 0	2 2
Pesos	H	1 0	1 0	1 0	2 0	1 0			1 0		1 0	2 -2	1 0	1 -2		2 -2	
Guia de Penetração	I	1 0		1 0	1 0	1 0			1 0			1 0	1 0	1 0	1 0		2 0
Circuito (Interface) Filtragem e Amplificação	J		1 2				2 0	0 0								2 0	1 0
Peça para fixação de altura de queda	K	1 0		1 0		1 0			1 0	1 0			2 0	1 0	2 0		2 0
Junque de Impacto	L	2 0	1 1	1 0		1 0			2 -2	1 0		2 0		1 0	1 0		2 -2
Chapéu de acople (parte superior do macaco mecânico)	M	1 0		2 -2	1 0	2 -2			1 0	1 0		1 0	1 0		1 0		1 0
Peça para Fixação do Suporte	N	2 0	1 0	2 0	1 0	1 0			1 -2	1 0		2 0	1 0	1 0			2 -2
Conectores	O		2 2				2 0	2 0			2 0						2 0
Haste	P	2 0	1 2	1 0	1 0	1 0			2 -2	2 0		2 0	2 -2	1 0	2 -2		
Display + Teclado	Q		0 2				2 0	1 0			1 0					2 0	
			2 2				2 2	2 2			2 2					2 0	

Lenda
Espacial

S	E
I	M

 Energia
Informação

S	E
I	M

 Material

Figura 58: Quantificação de interações na quarta matriz DSM.

O agrupamento dos componentes é mostrado na Figura 59. Foram identificados cinco módulos, três de domínio mecânico e dois de domínio eletrônico e controle. Além disso, foi percebida uma forte interação de tipo Espacial e Material nos módulos do domínio mecânico, evidenciando uma necessidade de integração entre eles; também, pode-se visualizar que em dois desses módulos de domínio mecânico há necessidade de controlar a diretriz de Energia para permitir o correto funcionamento dos componentes. Por outra parte, os componentes que compõem os módulos do domínio eletrônico e controle

apresentam uma forte interação de tipo Informacional e Material o que evidência uma necessidade de integração entre eles.

O agrupamento resultante da consideração de todas as interações nesta matriz DSM não só verifica a importância dos cinco módulos iniciais, mas também identifica necessidades significativas de integração entre eles. O papel integrador entre os dois grupos de domínio (Figura 59) é desempenhado pelos sensores.

	D	A	K	N	I	C	E	M	H	P	L	B	J	O	F	G	Q
Mãos	D	2 0		1 0	1 0	2 0		1 0	2 0	1 0		2 0					
Peça de sujeição para manuseio	A	0 0	1 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0					
Peça para fixação de altura de queda	K		0 2		2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0					
Peça para Fixação do Suporte	N	1 0	2 0	2 0		2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0					
Guia de Penetração	I	1 0	1 0	1 0	2 0		1 0	1 0	1 0	1 0	2 0	1 0					
Parafuso	C	2 0	1 0	1 0	2 0	1 0		2 0	2 -2	1 0	1 0	1 0					
Corpo (Base do macaco mecânico)	E		1 0	1 0	1 0	1 0	2 0		2 -2	1 0	1 0	1 0	2 0				
Chapeu de acople (parte superior do macaco mecânico)	M	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	2 -2	2 -2		1 0	1 0	1 0					
Pesos	H	2 0	1 0	1 0	1 -2	1 0	1 0	1 0	1 0		2 -2	2 -2	1 0				
Haste	P	1 0	2 0	2 -2	2 -2	2 0	1 0	1 0	1 0	2 -2		2 -2	1 2				
Junque de Impacto	L		2 0	2 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	2 -2	2 -2		1 1				
Sensor	B	2 0			1 0		2 0		1 0	1 2	1 1		1 2	2 2	2 0	2 0	0 0
Circuito (Interface) Filtragem e Amplificação	J												2 2	2 0	2 2	2 2	2 2
Conectores	O												2 2	2 2	2 0	2 2	2 0
Arduino	F												0 2	2 2	2 0		1 0
Micro - SD	G												2 2	2 2	2 2		2 2
Display + Teclado	Q												0 2	1 0	2 0	2 0	1 0

Lenda
Espacial

S	E
---	---

 Energia
Informação

I	M
---	---

 Material

Figura 59: Agrupamento dos componentes na quarta matriz DSM.

A quarta concepção, apresentada na Figura 60, utiliza uma arquitetura de controle e aquisição de dados que emprega as principais funções elementares do sistema e é de baixo custo de fabricação e aquisição; um sistema de alavancamento (tipo macaco mecânico) para retirar a haste e que elimina o esforço físico do operador. Esta arquitetura conserva a estrutura básica do Penetrômetro de impacto ao utilizar uma massa que cai com altura constante para realizar a função de penetrar a haste.

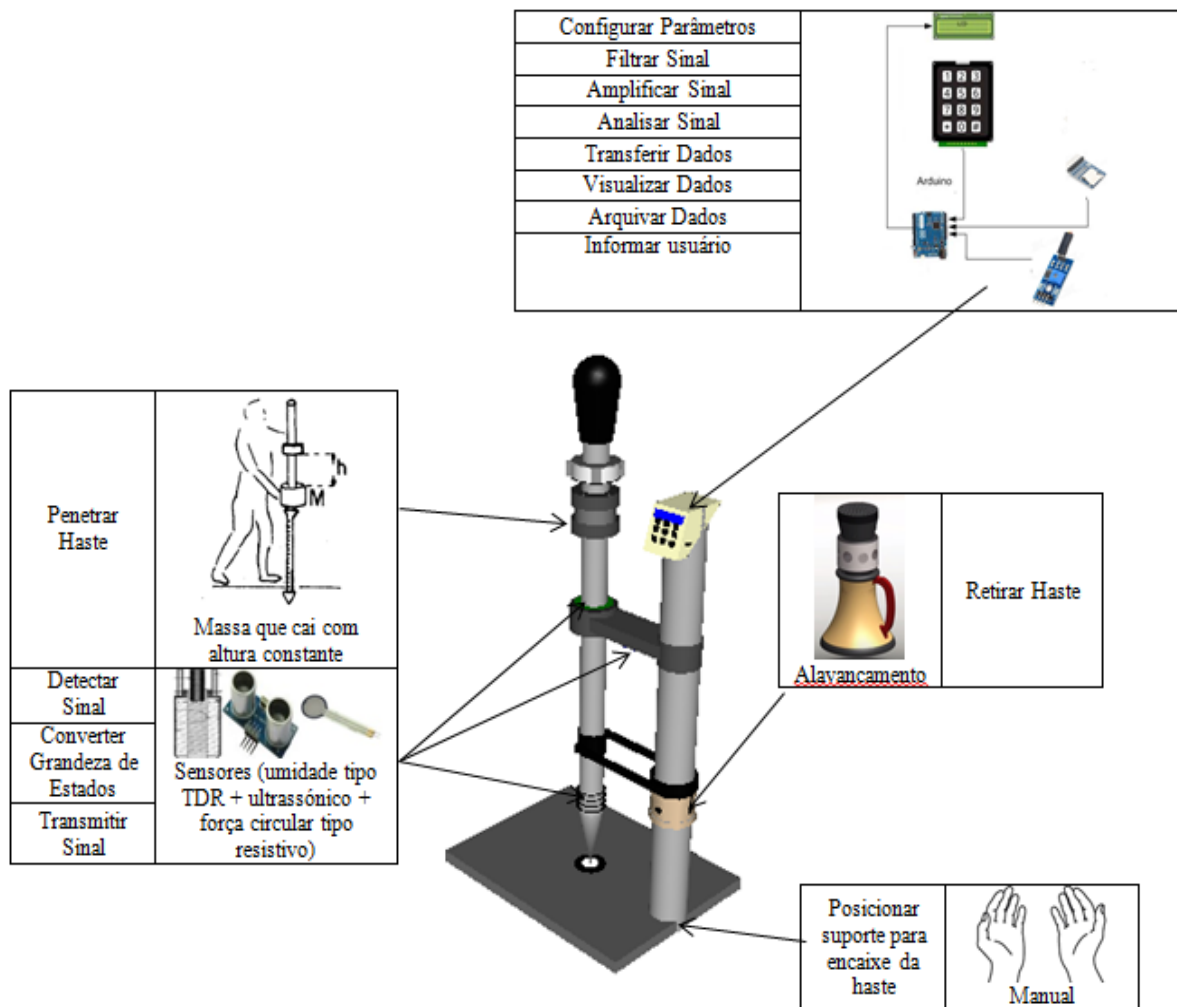


Figura 60: Alternativa de solução D – arquitetura de produto.

Pahl e Beitz (2005) ressaltam que há alguns critérios determinantes na seleção de alternativas de projeto que são: combinar subfunções com princípios de solução compatíveis, procurar por soluções que atendam as especificações de projeto e restrições de orçamento, concentrar em alternativas promissoras estabelecendo os motivos da preferência, basear-se na estrutura de funções e finalmente utilizar um bom senso.

É importante ressaltar que além dos princípios de soluções apresentados na arquitetura de produto, os requisitos dos clientes e as restrições do projeto que foram levantadas no Projeto Informacional guiarão a seleção de alternativas de projeto.

A combinação pura e simples das alternativas de solução apresentadas, não determina a configuração apropriada ou possíveis soluções integradas. Para alcançar combinações que atendam de maneira mais ampla os requisitos dos clientes e as restrições do projeto, é preciso utilizar um método para determinar qual alternativa será mais eficaz de acordo com os requerimentos do projeto. Para este propósito, Back, *et al.* (2008) recomenda o Método de Pugh, que compara os diversos conceitos de produto com que se pretende trabalhar com um conceito de referência (especificações de produto obtidas no QFD) para diferenciar as soluções viáveis para o projeto.

Analisando os pontos positivos (vantagens), pontos negativos (desvantagens) e equivalências (igualdade) dos conceitos propostos com relação ao conceito de referência, é possível identificar e escolher o melhor conceito que será adotado para a concepção do produto. As diversas alternativas de solução são registradas na coluna direita, e nas linhas da esquerda são colocadas às especificações do produto (Tabela 5), para indicar quais dos conceitos apresentam pontos positivos, negativos ou equivalência com o conceito de referência usa-se a seguinte simbologia: (+1) Vantagem sobre a referência, (0 (igual)) Equivalente à referência, (-1) Desvantagem com a referência.

Tabela 5: Matriz Pugh para seleção de alternativas de concepção do produto.

Requisitos de projeto	Peso (QFD)	Alternativas de solução			
		A	B	C	D
Alto nível de configuração do sistema	4,2	+1	0	0	+1
Alta resolução de sinal	4,1	0	+1	+1	0
Alta estabilidade nas medições	4,0	0	0	0	0
Medições múltiples (umidade, RP)	7,2	0	0	0	0
Resposta das medições em tempo real	4,0	0	+1	+1	0
Alto nível de identificação de erros (n°)	6,1	0	0	0	0
Baixo consumo de potencia/energia (Kw/h)	6,4	+1	0	0	+1
Alta resistência a condições ambientais e físicas	4,7	0	0	0	0
Baixa exigência de esforço físico do operador	5,9	0	0	+1	+1
Alta segurança	5,9	0	0	0	0
Baixo numero de componentes expostos (n°)	3,6	0	0	0	0
Baixo custo de aquisição (R\$)	4,5	+1	0	0	+1
Baixa frequência de manutenção (n°)	5,5	0	0	0	0
Alta facilidade de calibração	5,6	0	0	0	0
Altos n° de componentes normalizados e padronizados (n°)	4,1	0	0	0	0
Alta vida útil (anos)	3,8	0	0	0	0
Baixo custo de manutenção (R\$)	3,8	+1	0	0	+1
Alto n° de componentes recicláveis (n°)	4,0	0	0	0	0
Alto n° de componentes com geometria simples (n°)	3,8	0	0	0	0
Alto n° de componentes disponíveis em mercado (n°)	4,8	+1	0	+1	+1
Alta facilidade de operabilidade do sistema	4,0	0	0	0	0
Baixo custo de fabricação (R\$)	3,8	+1	0	0	+1
Soma Negativa		0	0	0	0
Soma Positiva		27,1	8,1	18,8	33,4

Como pode ser observado, depois de computados os resultados da Matriz de Pugh, nota-se que todas as alternativas de solução atendem ao problema de projeto de produto. Porém, escolheu-se a alternativa D. Esta foi a que obteve a maior pontuação, sendo identificada como a alternativa de solução que melhor atende aos requisitos dos clientes. Destacando-se por aspectos como: baixo custo de aquisição e fabricação, alto numero de componentes disponíveis no mercado, o alto nível de configuração do sistema e o baixo esforço físico do operador.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

No primeiro tópico, Projeto Informacional, buscou-se focar na geração das especificações do projeto, no qual os trabalhos Montelisciani et al., (2014) e Thompson (2013) foram essenciais para condução das atividades.

Esta primeira parte da pesquisa envolveu uma série de visitas ao campo para conhecer os métodos de análises existentes, com intuito de compreender melhor o problema de projeto. As visitas ao campo e conversas com especialistas que utilizam os equipamentos existentes geraram um conjunto de necessidades, que foram tratadas.

As principais referências para o processo de projeto de produto, com apresentação dos métodos e técnicas de apoio focam-se no projeto de sistemas mecânicos. Neste tópico buscou-se o caminho da engenharia de sistemas para projetar um instrumento de medição de umidade e resistência à penetração.

Com o segundo tópico, Projeto Conceitual, buscou-se converter as especificações-meta do produto em outro nível de informação, alternativas de concepções, no qual o produto passou a adquirir variadas arquiteturas físicas, que resultaram da análise da matriz DSM e a combinação dos diferentes princípios de solução a partir do processo de síntese funcional.

A matriz morfológica é utilizada como ferramenta de combinação dos diferentes princípios de solução. Além disso, ela pode ser utilizada para fornecer informações importantes e soluções de componentes para o preenchimento e análise da matriz DMS baseada em componentes.

A abordagem DSM baseada em componentes direciona a equipe de domínio, e permite conduzir o processo de desenvolvimento da arquitetura de produto através da análise das interações entre os diferentes componentes. Além disso, esse método possibilita reduzir a complexidade do projeto no processo de desenvolvimento e concepção do produto.

A DSM baseada em componentes identifica e mostra a forma como os conjuntos de sistemas mecânicos, elétricos e de controle interagem entre eles e se integram através

das interfaces do sistema conceituando o instrumento de medição de umidade e Resistência à Penetração (R.P), como um sistema complexo, ou seja, um sistema mecatrônico. Tomando como referente os autores (Vasić & Lazarević (2008); Hehenberger *et al.* (2010); Gausemeier *et al.*, 2011) analisados no Capítulo 3, pode-se definir com relação aos sistemas mecatrônicos que:

- Interface – São ligações realizadas através de componentes que operam dentro de um sistema, realizando uma conexão direta entre os subsistemas.
- Interação – esta relacionada com a comunicação recíproca entre sistemas/subsistemas ou mais, realizando um trabalho em conjunto a fim de cumprir com o objetivo em comum dentro de um sistema.
- Integração – após se obter a definição dos sistemas, subsistemas, interfaces, componentes, interações, eles se juntam para fazer parte um sistema complexo total (sistema mecatrônico).

CAPÍTULO 5 – PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS TESTES FUNCIONAIS

Definida solução conceitual para o instrumento de medição de umidade e resistência à penetração, inicia-se o desenvolvimento de algumas atividades do projeto detalhado, planejamento e execução dos testes funcionais, sendo essas atividades conhecidas como ‘Projeto Preliminar’ (BACK, *et al.*, 2008), também chamado de ‘Produto Virtual’ (GAUSEMEIER, *et al.*, 2011). Esta fase tem por objetivo determinar módulos ou componentes da solução conceitual que possam gerar algum tipo de risco para realizar atividades de modelagem, simulação e análise.

Do ponto de vista do projeto de engenharia, os modelos são recipientes de conhecimento que podem ser: icônicos, análogos, computacionais, entre outros; e as simulações são atividades que produzem informações que podem melhorar o conhecimento sobre o produto e, potencialmente, a qualidade de muitas análises e decisões tomadas durante o processo de concepção (HEHENBERGER, *et al.*, 2010).

Neste capítulo são apresentados os resultados do projeto preliminar, onde foram definidas as ferramentas para obter as interfaces de integração entre o instrumento de medição, o processador e a programação a ser utilizada. Além disso, são desenvolvidos os testes funcionais do produto.

A utilização de ferramentas CAD (*Computer Aided Design*) permitiu que atividades de modelagem e simulação fossem realizadas simultaneamente, otimizando o desenvolvimento do projeto.

5.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA CONCEPÇÃO DO PRODUTO

No modelo de 3-Ciclos, Gausemeier, *et al.* (2011) afirmam que o Produto Virtual compreende as três fases: Projeto Conceitual do Produto, Concretização do Domínio Específico e Integração dos sistemas; que são necessários para o Projeto conceitual. Para determinar a integração dos sistemas é preciso conhecer a estrutura funcional do produto e ter o domínio específico do mesmo (Ver CAPÍTULO 4), e assim procurar desenvolver

interfaces de integração. Nesse contexto, a criação e análise de modelos de computador é uma parte importante, que conduz aos termos amplamente utilizados ‘Produto Virtual’ e ‘Prototipagem Virtual’, respectivamente.

Para obter a interface entre o instrumento de medição, o processador e o programa utilizado, há a ferramenta *Proteus*. Esta ferramenta é um sistema completo para o projeto dispositivos eletrônicos que combina um avançado programa de modelagem esquemática icônico, um sistema de simulação misto (análogo digital) com base em *Spice*, e um programa para disposição dos componentes nas placas do circuito impresso e auto-roteamento (BREIJO, 2012).

Proteus tem a capacidade de simulação de circuitos baseados em microcontroladores (Figura 61), com todos os componentes que podem ser utilizados nesses projetos (chips, LEDs, teclados, display LCD, Arduino, entre outros), em tempo real e de forma interativa.

A Figura 61 mostra o software do *Proteus* durante a modelagem icônica e analógica, e a simulação do módulo de umidade.

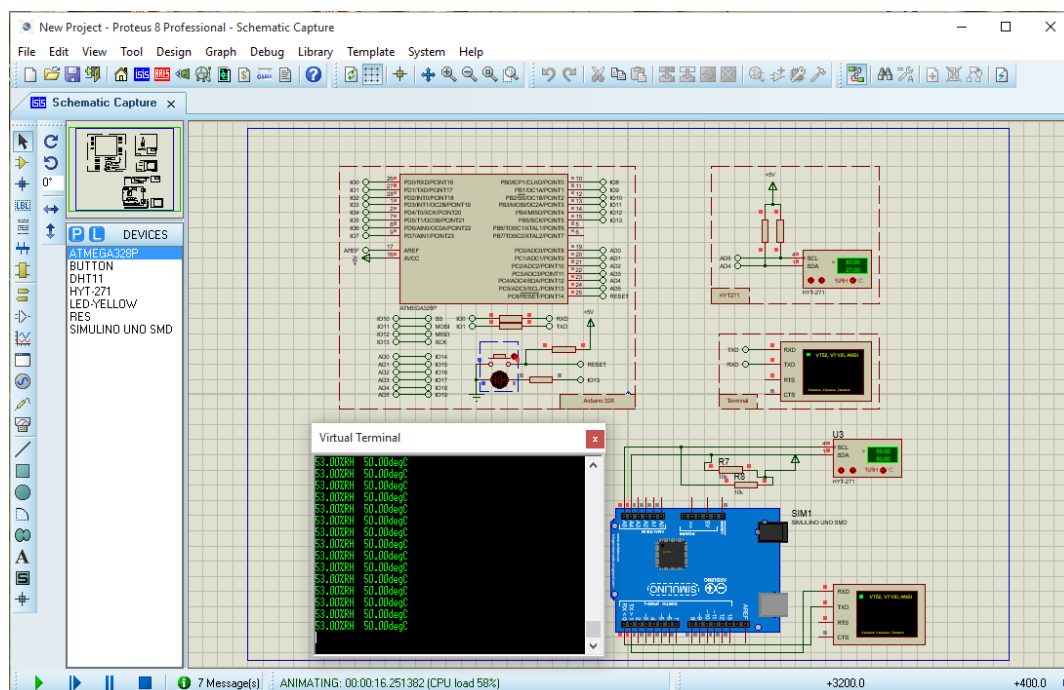


Figura 61: Software de modelagem e simulação *Proteus*.

Essa ferramenta destaca-se por: facilidade de uso, qualidade das modelagens, prática análise do comportamento de sistemas, interatividade com outros *softwares* (ambientes de desenvolvimento), permitir a inclusão de instrumentos de medição virtuais para simulações e a inclusão de gráficos que representam os sinais obtidos durante a simulação.

5.2 TESTES FUNCIONAIS

Para validar que as concepções obtidas no projeto conceitual estão de acordo como as especificações do produto que foram obtidas através da análise e desdobramento das necessidades dos clientes, a fim de identificar, determinar e diminuir os riscos de erro do projeto e o grau de incertezas nas avaliações é necessário realizar os testes funcionais das principais funções levantadas.

O método do teste funcional é uma das técnicas de verificação de aspectos técnicos do produto mais utilizadas na prática, empregando as especificações do produto como requisitos do sistema a ser testado. Utilizado de forma efetiva, pode fornecer indicadores importantes sobre a qualidade e confiabilidade do produto.

O motivo para se realizar os testes funcionais consiste na descoberta de defeitos que possam ter sido introduzidos em qualquer fase do desenvolvimento e que, em geral, são decorrentes de omissões, inconsistências ou incompreensões das especificações do produto. A meta do teste é de detectar, processar, informar e armazenar os dados gerados que são aspectos relevantes no contexto específico de aplicação, tal como a correta interação entre os componentes que constituem um módulo.

Os testes funcionais podem ser realizados com sucesso através de simulações e provas com montagem simples dos módulos a serem desenvolvidos, utilizando dos fundamentos das principais funções levantadas no estudo de soluções e concepções de alternativas (VER CAPITULO 4).

5.2.1 Planejamento dos testes

O planejamento para o desenvolvimento dos testes foi feito com base nos conhecimentos de Neto (2002) para garantir a confiabilidade do desenvolvimento de um produto mecatrônico, combinados com a metodologia para o desenvolvimento dos testes de produto de (BACK & LEAL, 1991). O procedimento adotado para o desenvolvimento dos testes é esquematizado na Figura 62. Baseado na síntese funcional do produto que descreve o grau de complexidade do projeto, o sistema descrito realiza a transformação de uma grandeza de estado, e o sinal é traduzido, analisado e interpretado e, devido a fatores como: Restrições de Projeto; Tempo e Recursos, foram selecionados três módulos, os quais são apresentados de forma independente. Para identifica-los, recorre-se à estrutura funcional do produto e à arquitetura do produto.

Modulo Sensor de Umidade. – o teste deste módulo pretende verificar o funcionamento de um principio de solução que tem ligação direta com a função global do produto e é portador do maior numero de funções elementares a serem analisadas.

Modulo de Distância – dentre os módulos que compõem a solução conceitual do produto, este é a configuração ou subsistema que estará submetido a maiores interferências (vibração, ruídos, etc.). Desta forma, sua utilização permite validar comportamentos funcionais de outros sistemas e, conseqüentemente, permite determinar o grau de dificuldade na calibração desses tipos de módulo. É portador das funções principais que precisam ser analisadas de acordo com o planejamento formulado.

Modulo leitor de cartão SD para armazenamento de dados – o teste desse módulo pretende validar o funcionamento de um principio de solução adotada na concepção final do produto. Tem a função de armazenar dados fornecidos pelo Arduino. Juntos esses módulos são portadores das funções FE. 10 e FE. 12 a serem testadas.

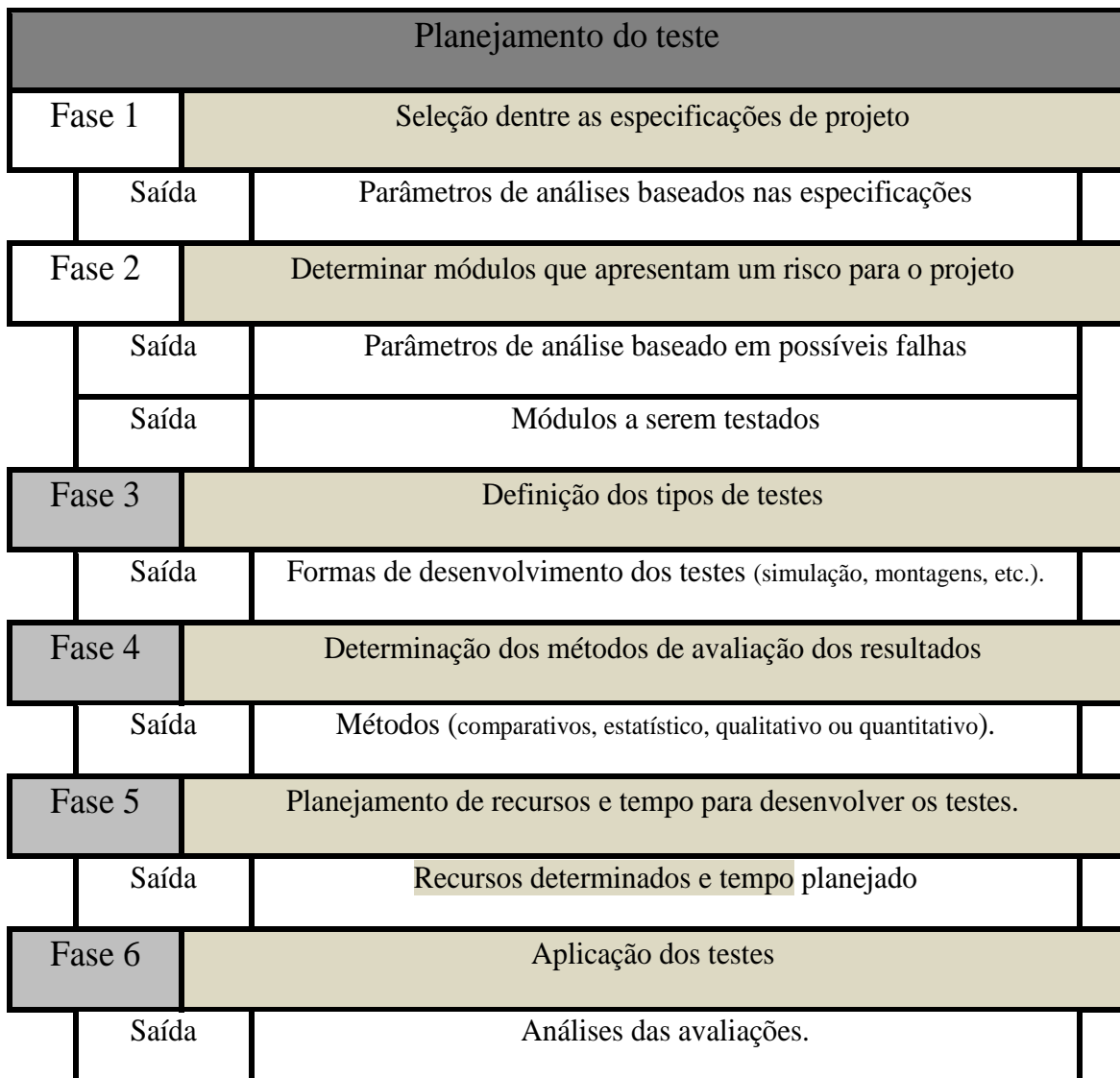


Figura 62: esquematização do planejamento dos testes.

- **Tipos de testes a serem realizados**

Quando se analisa o ciclo de vida do produto, pode-se identificar, conforme ilustra a Figura 63, duas fases importantes para o projeto de produto que são: estudo de viabilidade ou projeto conceitual, onde são concebidas soluções de alternativas para o projeto; e projeto preliminar, fase em que é avaliada a concepção do produto através dos testes funcionais.

Segundo Back & Leal (1991), nas fases de projeto conceitual e projeto preliminar, o projetista deve preocupar-se com os testes que deverão ser efetuados para avaliar a adequação do seu trabalho frente aos requisitos inicialmente propostos. Como o projeto se

encontra em estágios de desenvolvimento e estudo, estas situações exigem um tipo de teste específico como mostrado na Figura 63.

Teste tipo 1: durante as três primeiras fases do ciclo de vida são usados modelos analíticos para a síntese, simulação e análise. Recomenda-se, devido a sua importância, concentração de esforços, versatilidade, rapidez e economia e, principalmente, pela facilidade de uso de ferramentas computacionais.

Teste tipo 2: também é utilizado nas primeiras fases do ciclo de vida, compreende os modelos icônicos e os analógicos. Segundo Back & Leal (1991) os modelos icônicos, também são usados como ferramentas auxiliares de desenho e desenvolvimento, têm como principal função verificar a adequação estética e da ergonomia do produto. Os modelos analógicos permitem o estabelecimento dos valores dos produtos adimensionais das variáveis do fenômeno físico e, pelas leis de semelhança, dimensionar as variáveis de partes ou da solução global do problema.

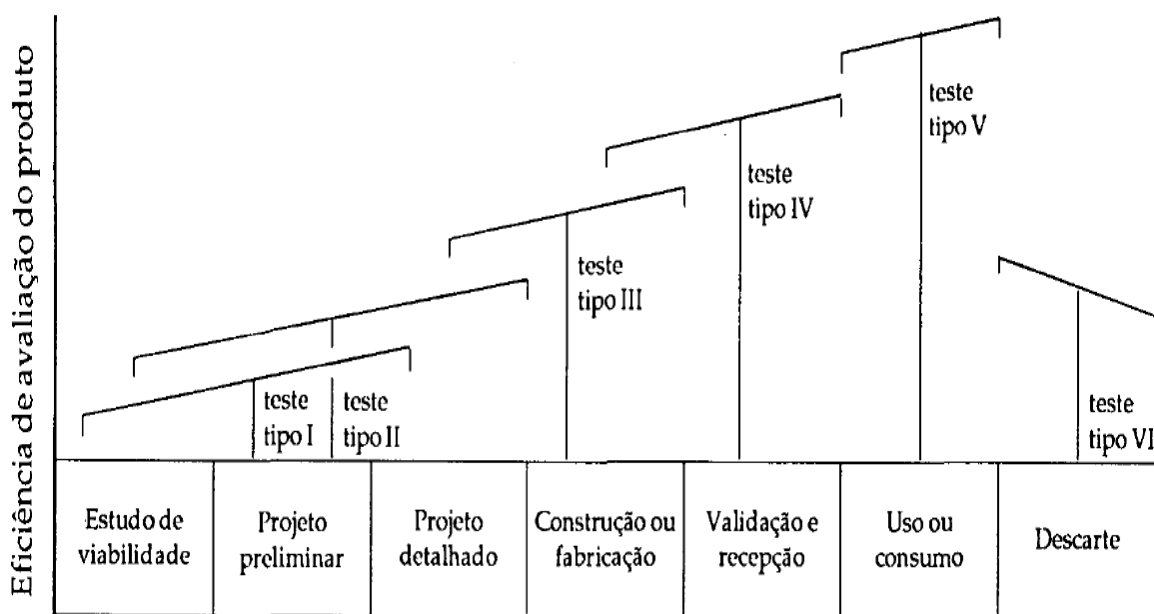


Figura 63: Representação esquemática dos tipos de testes usados ao longo das fases de desenvolvimento de um produto.

Fonte: Back & Leal (1991).

5.2.2 Procedimento de testes

Os testes foram realizados no laboratório, nas instalações da Universidade de Brasília e da Embrapa Cerrados. Para o desenvolvimento dos testes contou-se com a colaboração de pessoal experiente, principalmente no que se refere às dificuldades e facilidades de uso e calibração dos módulos, indicando os possíveis caminhos e orientando sob quais fatores poderiam ser descartáveis em relação ao cumprimento dos objetivos traçados durante o planejamento dos testes.

Foram testados três módulos da solução conceitual: módulo de umidade, módulo de distância e o módulo de leitura de cartão SD, sempre procurando seguir os procedimentos determinados durante o planejamento dos testes. No entanto, conforme orientações sobre o procedimento de manuseio e calibração do módulo de distância, foram eliminados fatores como ruído e vibração. Isso facilitou o processo de trabalho e a utilização de um método estatístico para configurar ou calibrar o módulo.

No que se refere ao módulo de umidade, sabe-se que a calibração desse tipo de módulo requer um método padrão. Nesse caso adota-se o método gravimétrico, que determina a umidade volumétrica e a densidade do solo por meio de pesagem e secagem de amostras do solo.

- **Modulo Sensor de Umidade.**

Para a realização dos testes do modulo de umidade, que possui funções elementares importantes, é necessário realizar primeiramente um procedimento de preparação de amostras com diferentes tipos de texturas de solo.

Preparo das amostras com diferentes tipos de textura de solo: coletar amostras indeformadas na camada superficial (0 a 5 cm), em anéis volumétricos de quatro solos representativos do Bioma Cerrado. As amostras foram coletadas na área experimental da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina, Distrito Federal. Os teores de argila dos solos variam de 80 a 700 g kg⁻¹, configurando textura de arenosa a muito argilosa.

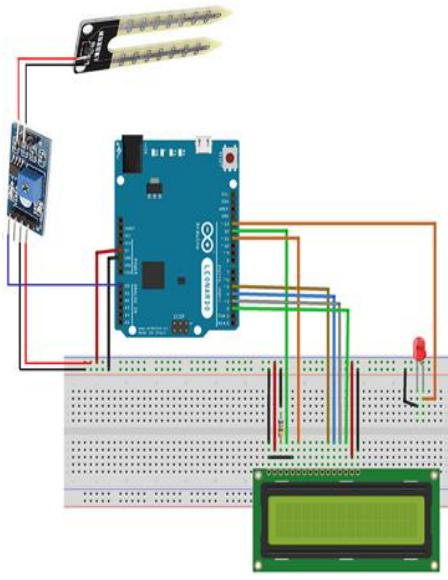
Em laboratório, as amostras foram equilibradas em 5 níveis de umidade (baseados na tensão métrica)

- 1) Amostras saturadas (0,00 kPa)
- 2) Amostras equilibradas a 6,00 kPa
- 3) Amostras equilibradas a 33 kPa
- 4) Amostras equilibradas a 100 kPa
- 5) Amostras secas em estufa a 40°C (equivalente à umidade residual, ou seja, tensões superiores a 1500 kPa).

Durante a realização dos testes do modulo de umidade, utilizou-se o programa carregado na placa de Arduino, permitindo a determinação e ajuste das variações de umidade de solo nas diferentes amostras coletadas. As medições foram feitas em 3 repetições (4 solos x 5 níveis de umidade x 3 repetições = 60 amostras)

O Quadro 9 determina os objetivos e funções que serão testadas, além da modelagem do módulo.

Quadro 9: esquematização do procedimento de teste do modulo de umidade.

Modulo Sensor de Umidade conectado ao Arduino.	
	Função a ser testada
	FE. 4
	FE. 5
	FE. 6
	FE. 7
	FE. 8
	FE. 9
	FE. 10
FE. 11	

Continuação do Quadro 9 – Esquematização do procedimento de teste do módulo de umidade.

Objetivo	Avaliar o comportamento funcional do módulo no âmbito das funções elementares do sistema e como o mesmo consegue atender as especificações do projeto
Comentário	Além da modelagem do módulo de umidade, realiza-se análises comparativas do comportamento do instrumento em prova de medição de campo, de laboratório e simulado. Para realizar a calibração do módulo necessita-se de um método padrão, nesse caso adota-se o método gravimétrico. Os testes são realizados ajustando a sensibilidade do sensor de acordo com os parâmetros de umidade.

Legenda.

FG – Função Global. **FP** – Função Parcial. **FE** – Função Elementar.

Funções.

FG – Medir Umidade e RP.
FP. 1 – Penetrar o Solo.
 FE. 4 – Detectar Sinal.
FP. 2 – Processar Informação.
 FP. 2.1 – Trazer Sinal.
 FE. 5 – Converter Grandeza de Estado.
 FE. 6 – Transmitir Sinal.

FP. 2.2 – Processar Sinal.
FE. 7 – Filtrar Sinal.
FE. 8 – Amplificar Sinal.
FE. 9 – Analisar Sinal.
FE. 10 – Transmitir Dados do Sinal.
 FP. 2.3 – Processar Informação.
FE. 11 – Visualizar Dados.

No laboratório, as amostras foram saturadas e equilibradas em câmaras de tensão. Uma vez atingido o equilíbrio, será obtida a massa úmida (solo + anel volumétrico) em balança de precisão (0,001 g), será feita a medição com o sensor, e posteriormente as mesmas serão secas em estufa a 105 °C por 24 horas, para obtenção da massa seca (solo + anel volumétrico). O solo será descartado e será obtida a massa do anel volumétrico, bem como seu volume. O teor de água gravimétrico será calculado pela equação 1, a Densidade do solo pela equação 2 e o teor de água volumétrico pela equação 3.

$$U = \frac{Mu}{Ms} - 1 \quad (1)$$

Onde:

U é o teor de água gravimétrico no solo, em g g^{-1} ;

Mu é a massa da amostra de solo úmido, após equilibradas nas câmaras de tensão, em gramas (descontada a massa do anel volumétrico);

Ms é a massa da mesma amostra de solo após seca em estufa a 105°C por 24 h, em gramas (descontada a massa do anel volumétrico).

$$Ds = \frac{Ms}{V} \quad (2)$$

Onde:

Ds é a densidade aparente do solo, em g cm^{-3} ;

Ms é a massa de solo no interior do anel volumétrico seco em estufa a 105°C por 24 h, em gramas.

V é o volume do anel volumétrico (neste trabalho, serão medidos todos os anéis).

$$\theta = U \times \frac{Ds}{Da} \quad (3)$$

Onde:

θ é o teor de água volumétrico no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

U é o teor de água gravimétrico no solo, em g g^{-1} (equação 1);

Ds é a densidade aparente do solo, em g cm^{-3} (equação 2)

Da é a densidade da água, considerada como $1,0 \text{ g cm}^{-3}$.

Na Tabela 6 é possível observar os teores de argila, densidades e teores de água médios para os solos utilizados na aferição/calibração do sensor. Os teores de argila variam de 80 a 700 g kg^{-1} , o que caracteriza ampla variação textural e representatividade das principais classes de solos cultivados no Cerrado. As variações nos teores de água também foram bastante amplas dentro de cada classe de solo.

Tabela 6: Granulometria, Condições de umidade¹, densidade e teores de água médios.

Solo	Granulometria			Ψ_m	Ds	Teor de água	
	Argila	Silte	Areias			U	θ
	-----(g kg^{-1})-----			---(kPa)---	(g cm^{-3})	-----(%)------	
				0	1,34	37,35	49,76
				6	1,32	17,91	23,55
RQ	80	30	890	33	1,34	12,61	16,83
				100	1,36	11,26	15,27
				Seco (40°C)	1,35	6,66	9,02
				0	1,15	35,79	41,04
				6	1,16	13,40	15,51
LVA _m	196	30	774	33	1,11	11,82	13,05
				100	1,12	10,22	11,44
				Seco (40°C)	1,18	2,47	2,90
				0	1,13	48,35	54,44
				6	1,21	29,98	36,38
LVA	500	120	380	33	1,12	23,37	26,27
				100	1,19	20,90	24,87
				Seco (40°C)	1,16	5,72	6,63
				0	1,13	49,24	55,38
				6	1,15	31,00	35,75
LV _{ma}	700	100	200	33	1,14	24,32	27,59
				100	1,07	24,35	26,12
				Seco (40°C)	1,14	4,63	5,29

1: Tensões mátricas (Ψ_m) de 0 (amostra saturada), 6, 33 e 100 kPa aplicadas às amostras indeformadas, bem como amostras secas em estufa a 40°C por 3 dias. Ds: densidade do solo. U: teor de água gravimétrico do solo (g g^{-1}) e θ : teor de água volumétrico do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), ambos expressos em porcentagem. RQ: Neossolo quartzarênico distrófico; LVA_m Latossolo Vermelho Amarelo ácrico textura média; LVA: Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa; LV_{ma}: Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa.

Com os valores determinados de umidade volumétrica das amostras, que comparadas com as medidas obtidas pelo sensor, são determinados os parâmetros de ajuste do modulo. Com isso, encontrou-se uma relação linear entre a umidade volumétrica e os valores medidos pelo sensor. A seguir, são apresentadas as análises dos testes do modulo de umidade para os diferentes tipos de texturas do solo, onde os resultados variam de solo para solo.

Neossolo quartzarênico distrófico (RQ). Na Figura 64a são apresentadas as relações gráficas entre os teores de água volumétricas (Θ) reais e estimadas. A dispersão de

dados nesse tipo de solo foi muito consistente. Na Figura 64b, é apresentada a distribuição de erros (valor estimado menos valor real) do solo RQ. Observa-se que os erros são de tipo sistemático, com uma tendência de superestimação dos valores de Θ pelo modulo de umidade. Estes erros sistemáticos podem ser corrigidos matematicamente. Conforme observado na Figura 64 os erros do sensor para esse tipo de solo encontra-se em 10% com alguns pontos próximos de 13%.

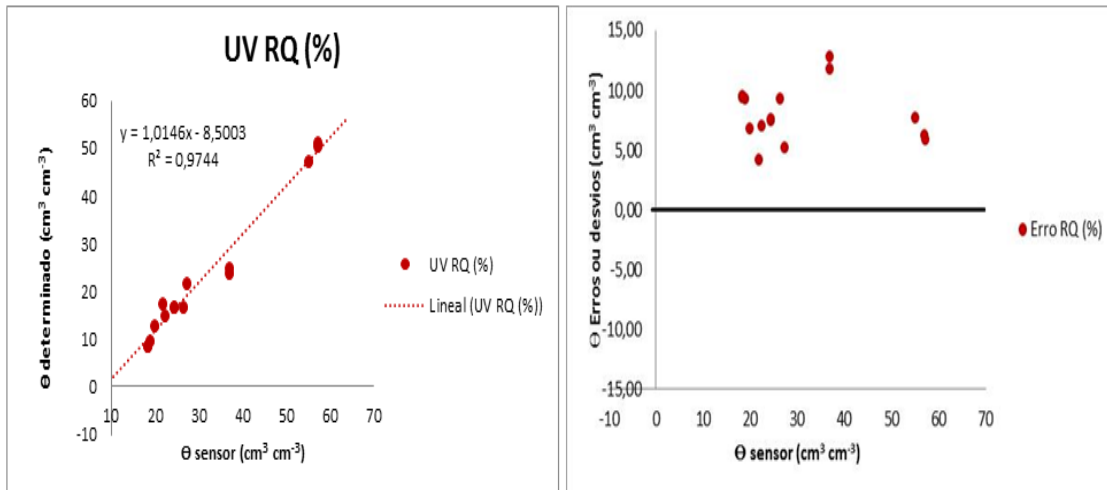


Figura 64: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo RQ.

Latossolo Vermelho Amarelo ácrico textura média (LVam). Na Figura 65a são apresentadas as relações gráficas entre os teores de água volumétricas (Θ) reais e estimadas do solo LVam. A dispersão de dados neste tipo de solo foi muito próxima da reta 1: 1. Na Figura 65b, é apresentada a distribuição de erros (valor estimado menos valor real) do solo LVam. Observa-se que os erros são de tipo sistemático, com uma tendência uniforme de estimação por parte do modulo. Esses erros sistemáticos podem ser corrigidos matematicamente. Conforme observado na Figura 65b os erros do sensor para este tipo de solo encontra-se em $\pm 5\%$ com alguns pontos aleatórios próximos de 8%. Este tipo de erro aleatório é compreendido como a probabilidade de falha de contato entre o sensor e o solo ou pela deformação da haste durante a inserção.

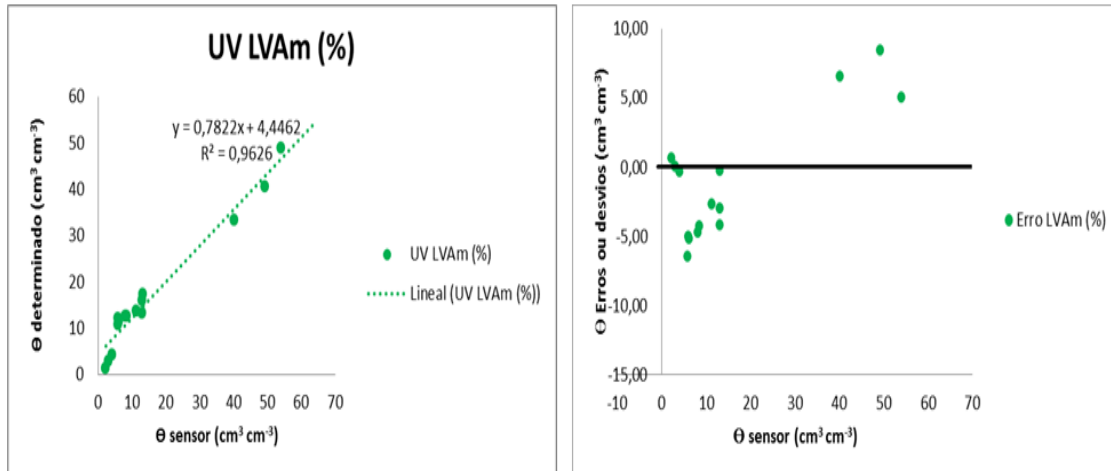


Figura 65: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo LVAm.

Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa (LVa). Na Figura 66a são apresentadas as relações gráficas entre os teores de água volumétricas (Θ) reais e estimadas do solo LVa. A dispersão de dados nesse tipo de solo foi muito parecida com o solo LVAm, com aproximadamente 89% das estimativas apresentando uma distribuição de erro (Figura 66b) entre $\pm 4\%$ com alguns pontos aleatórios próximos de 10% o que mostra uma leve tendência de superestimação. Por outro lado, os erros aleatórios podem ser causados por deformação da haste durante a inserção, principalmente em condições de solo com consistência mais dura, como este tipo de solo, o que pode ter interferido no sinal.

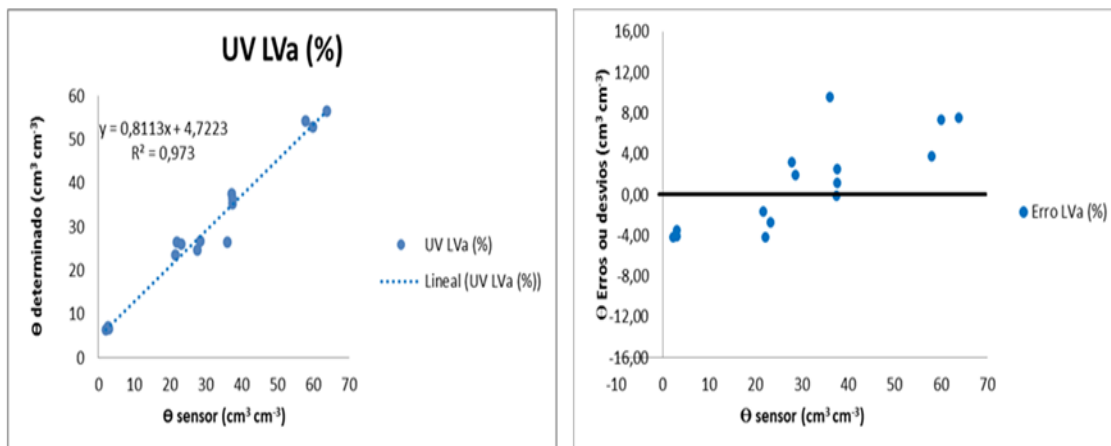


Figura 66: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo LVa.

Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa (LVma). Na Figura 67a são apresentadas as relações gráficas de dispersão de dados entre os teores de água volumétricas (Θ) reais e estimadas do solo LVma. A dispersão de dados nesse tipo de solo foi consistente entre as variações de medida de umidade e muito parecido com a dispersão mostrada pelo solo RQ. Com aproximadamente uma dispersão de erro (Figura 67b) de $\pm 4\%$ e com uma tendência a se afastar do valor real da estimativa de umidade em alguns pontos. Observa-se que os erros das medidas feitas no solo LVma são de tipo sistemáticos e que podem ser minimizados matematicamente.

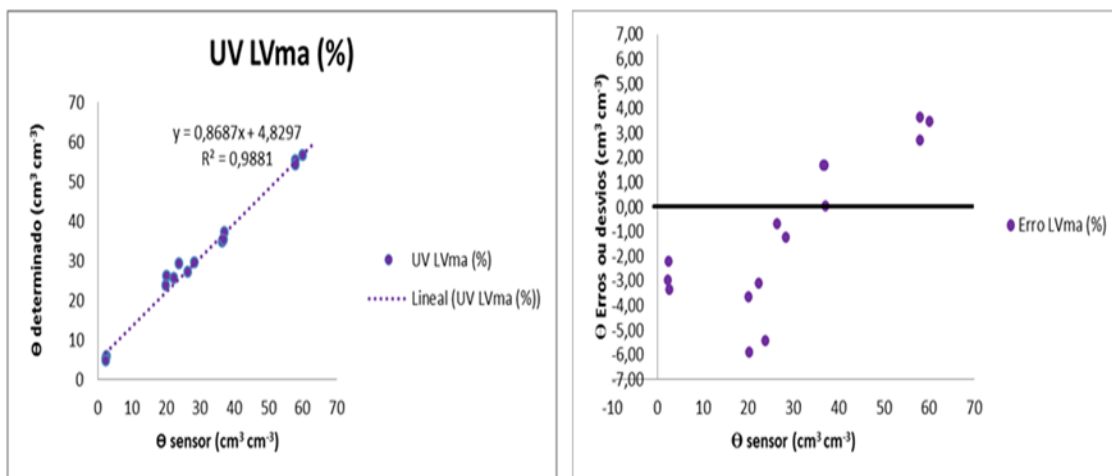


Figura 67: Relações gráficas entre os teores de água volumétricos (Θ) reais e estimados (a) e distribuição de erros ou resíduos (b) para o solo LVma.

Com base nos resultados anteriores, observa-se que a maior parte dos erros foram sistemáticos, com uma tendência de superestimação dos valores de Θ pelo módulo de umidade para os solos RQ e LVA. Por outro lado, os erros aleatórios precisam ser melhor compreendidos, e provavelmente são resultado de falhas no contato entre o sensor e o solo, o que pode variar de solo para solo em função do seu grau de estruturação, o que resulta em maior ou menor porosidade de aeração. Outra questão que pode ter influenciado é a deformação da haste durante a inserção, principalmente em condições de solo com consistência mais dura, o que pode ter interferido no sinal.

Durante as aferições, verificou-se que o sensor fornecia um valor de “bits” de 1023 quando o mesmo estava exposto ao ar (aberto) e de 0 (zero) quando era inserido na água

(curto), o que correspondia, respectivamente, a 0 e 100% de umidade volumétrica. Entretanto, analisando a distribuição de erros dos diferentes solos, observa-se que elas encontram-se em sua maioria entre ± 4 ou 5%, com exceção do solo RQ. Será necessário fazer a correção matemática dos erros sistemáticos para se verificar qual a real magnitude dos erros aleatórios acompanhados de uma nova serie de testes, já que se espera que um sensor dessa natureza apresente erros muito próximos a ± 3 ou 4% em valores de teor de água volumétricos (Θ), para que seja pelo menos compatível com os equipamentos comerciais existentes.

Conforme os resultados obtidos, o modulo de umidade apresentou uma resposta de funcionamento boa em solos argilosos onde houve em média 83% de acertos, no solo LVam o modulo apresentou uma resposta regular com uma média de 63% e no solo RQ o modulo apresentou uma resposta ruim devido ao erro de superestimação de 10%, ou seja, este tipo de testes que tem como objetivo a analise do funcionamento do modulo de umidade em condições reais mostra uma necessidade de realização de mais testes com intuito de obter um sistema apto a trabalhar nos diferentes solos do Brasil, e assim, o funcionamento do sistema não fica restrito a um tipo de solo, conforme observou-se durante os testes.

Avaliando o comportamento e funcionamento do modulo do sensor de umidade pode-se analisar que:

- O modulo interage de forma ótima com os demais componentes que formam o sistema, devido a sua arquitetura compacta e funcionamento simples.
- As funções FE. 4, FE. 5 e FE. 6 são desenvolvidas com dois eletrodos (hastes) que em contato com o solo passam corrente através dele , e faz a leitura da resistência para obter um valor de voltagem equivalente ao nível de umidade do solo, ou seja, quanto mais água tiver no solo, maior a condução de corrente entre os eletrodos, devido à baixa resistência, fazendo como que o sinal de saída do sensor se aproxime a 5V. Enquanto que em um solo seco a condutividade é baixa, por causa da alta resistência, resultando em uma sinal de saída do sensor muito próxima de 0V.

- Para avaliação dos testes das funções foi utilizado o sensor que tem dois eletrodos em forma de U (Ver Quadro 9), porém quando o protótipo do instrumento é desenvolvido o sensor será projetado de acordo com as características de fabricação do protótipo. A revisão da literatura recomenda utilizar o sensor enrolado na haste do instrumento permitindo melhor contato da superfície com o solo.
- As funções FE. 7 e FE. 8 são realizadas pelo controlador (módulo de detecção de umidade). O controlador possui um circuito integrado com um potenciômetro que permite regular a sensibilidade do sensor de acordo como os parâmetros de umidade, realizando assim a fácil calibração do instrumento.
- A placa do Arduino desempenha durante os testes o papel de sistema integrador entre os diferentes componentes da arquitetura do produto desenvolvendo as funções FE. 9 e FE. 10 através do programa (Ver ANEXO V) carregado no microprocessador da placa. Testou-se a função FE. 11 através do display (para aspectos de simulação usa-se o monitor serial).

A Figura 68 mostra alguns testes experimentais realizados com o módulo de umidade, com variação das condições das amostras do solo.

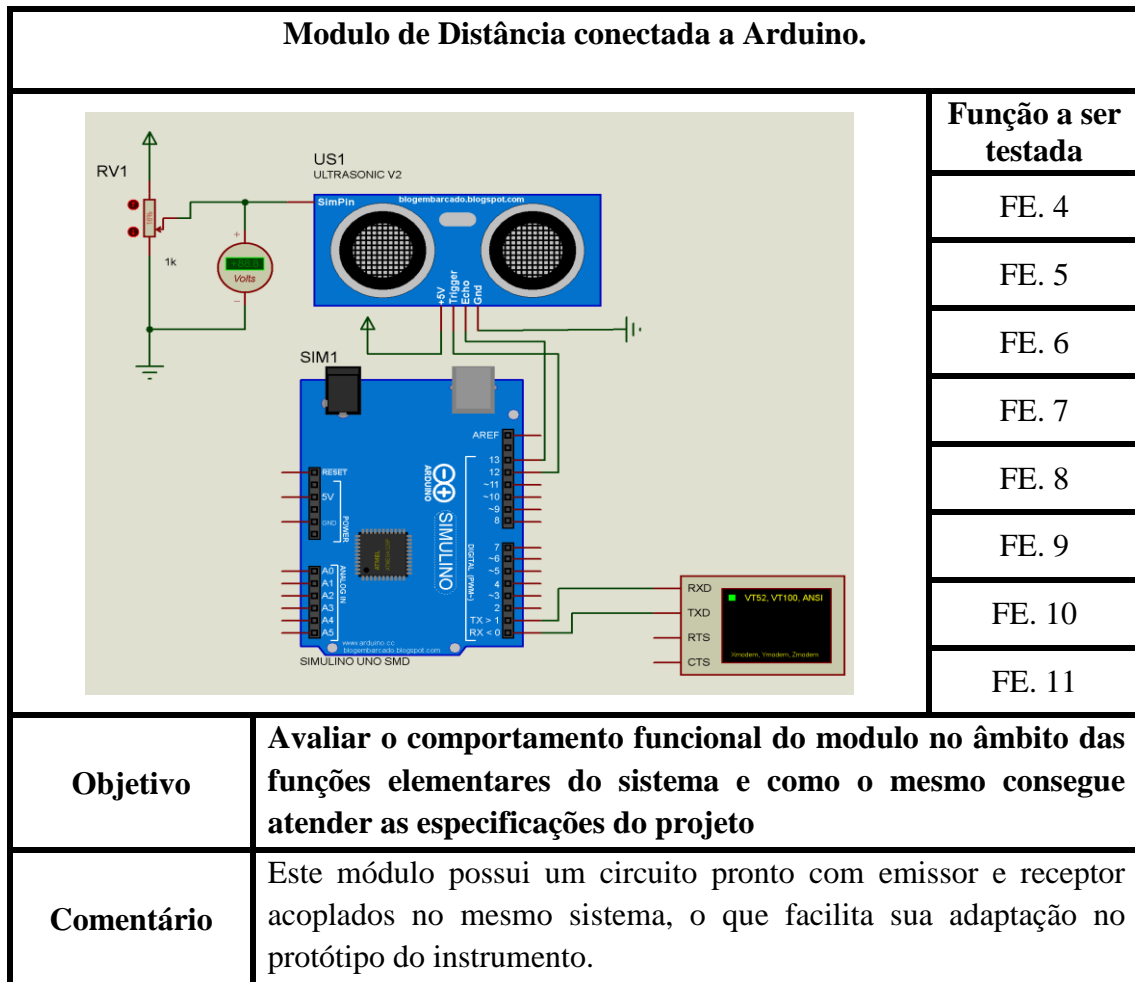


Figura 68: Testes funcionais do módulo de umidade com amostras saturadas (A), amostras equilibradas a 6,00 kPa, amostras equilibradas a 33,00 kPa, amostras equilibradas a 100 kPa e amostras secas em estufa a 40°C (equivalente a 1500 kPa).

- **Modulo de Distância.**

Para o desenvolvimento dos testes do módulo de distancia, utilizando como instrumento padrão uma régua calibrada, é feito uma montagem simples em uma superfície plana que, em conjunto com a régua padrão permite realizar comparações e ajustes de distância utilizando métodos estatísticos e o programa utilizado para trabalhar nesse modulo. O Quadro 10 esquematiza o processo a se realizar com o modulo de distância.

Quadro 10: Esquemática do procedimento de teste do modulo de distância.



Legenda.

FG – Função Global. **FP** – Função Parcial. **FE** – Função Elementar.

Funções.

FG – Medir Umidade e RP.
 FP. 1 – Penetrar o Solo.
 FE. 4 – Detectar Sinal.
 FP. 2 – Processar Informação.
 FP. 2.1 – Traduzir Sinal.
 FE. 5 – Converter Grandeza de Estado.
 FE. 6 – Transmitir Sinal.

 FP. 2.2 – Processar Sinal.
 FE. 7 – Filtrar Sinal.
 FE. 8 – Amplificar Sinal.
 FE. 9 – Analisar Sinal.
 FE. 10 – Transmitir Dados do Sinal.

 FP. 2.3 – Processar Informação.
 FE. 11 – Visualizar Dados.

Avaliando o comportamento e funcionamento do módulo de distância como um sistema que integra diferentes componentes em um espaço reduzido, pode-se dizer:

- É um módulo de baixo custo, funciona basicamente com o envio de um sinal que, ao atingir um objeto volta para o módulo (sensor) e com base nesse tempo entre o envio e recebimento de sinal, é calculada a distância que se encontra o objeto. Ele pode medir distâncias entre 2 cm e 4 m, com precisão de 3mm. Dessa forma, o módulo compacto desenvolve com facilidade e rapidez as funções elementares FE. 4, FE. 5, FE. 6, FE. 7 e FE.8.
- Oferece uma ótima detecção sem contato, com uma elevada precisão, é um instrumento de leituras estáveis, de fácil manuseio, além de sua compatibilidade e interação com outros componentes, como o Arduino.
- O funcionamento do módulo não é afetado por aspectos físicos como luz solar e a velocidade do som. Para isso, o fabricante recomenda utilizar como parâmetro ideal de velocidade do som 340 m/s.
- Este módulo apresenta características técnicas como: Frequência de trabalho de 40KHz, ângulo de detecção de 30° com um ângulo eficaz de 15°. Esses tipos de características técnicas faz dele o instrumento adequado para este projeto.

Para realizar e obter medidas confiáveis, o módulo de distância tem que ser calibrado. Para isso, utiliza-se a ajuda de uma régua padrão que, disposta em uma superfície lisa, é comparada a distância medida pelo módulo com uma posição de referência (Ver Figura 69). Essa comparação permite determinar a relação entre eles que, nesse caso, apresenta a forma de uma regressão lineal.

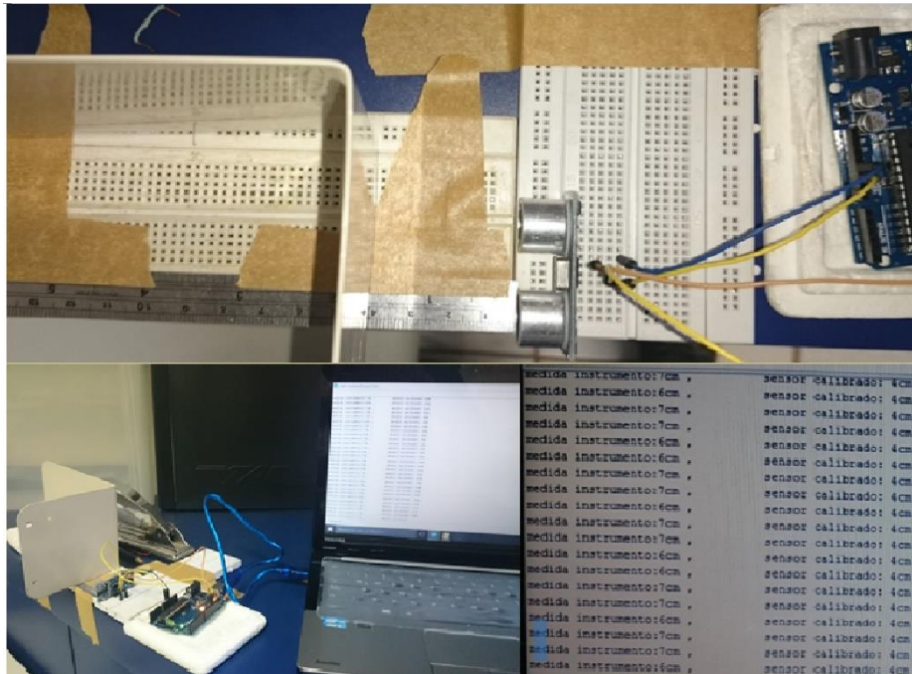


Figura 69: Método de calibração do módulo de distância.

Através do método estatístico de regressão linear (ver Tabela 7) podem-se obter os parâmetros ou valores para correção do programa carregado no microcontrolador do Arduino, realizando assim, a calibração do instrumento. Logo, o módulo de distância pode ser calibrado de forma simples com a programação (Ver ANEXO V).

A Figura 70 mostra o erro sistemático do módulo depois de ser comparado em relação ao instrumento padrão durante o método estatístico.

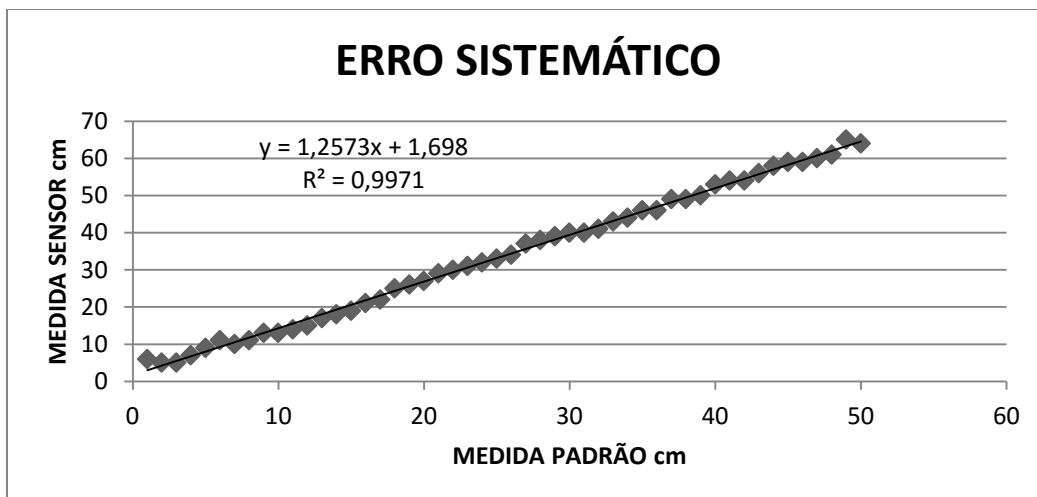


Figura 70: Erro sistemático do módulo de distância.

Tabela 7: Método de regressão linear para 50 amostras.

Distância	RÉGUA PADRÃO cm (X)	SENSOR cm (y)	x*y	x*x
	1	6	6	1
	2	5	10	4
	3	5	15	9
	4	7	28	16
	5	9	45	25
	6	11	66	36
	7	10	70	49
	8	11	88	64
	9	13	117	81
	10	13	130	100
	11	14	154	121
	12	15	180	144
	13	17	221	169
	14	18	252	196
	15	19	285	225
	16	21	336	256
	17	22	374	289
	18	25	450	324
	19	26	494	361
	20	27	540	400
	21	29	609	441
	22	30	660	484
	23	31	713	529
	24	32	768	576
	25	33	825	625
	26	34	884	676
	27	37	999	729
	28	38	1064	784
	29	39	1131	841
	30	40	1200	900
	31	40	1240	961
	32	41	1312	1024
	33	43	1419	1089
	34	44	1496	1156
	35	46	1610	1225
	36	46	1656	1296
	37	49	1813	1369
	38	49	1862	1444
	39	50	1950	1521
	40	53	2120	1600
	41	54	2214	1681
	42	54	2268	1764
	43	56	2408	1849
	44	58	2552	1936
	45	59	2655	2025
	46	59	2714	2116
	47	60	2820	2209
	48	61	2928	2304
	49	65	3185	2401
	50	64	3200	2500
SOMATÓRIA	1275	1688	56136	42925
COEFICIENTE ANGULAR DA ORDENADA	1,257334934			
	1,697959184			

$$y = m \cdot x + n$$

Com o processo de calibração terminado, o módulo principal ‘Arduino’ executa o programa e realiza o papel de sistema controlador e integrador entre os módulos, desenvolvendo assim, as funções FE. 9 e FE. 10. Para o desenvolvimento dos testes do módulo de distância a função elementar FE. 11 é testada através do computador utilizando como ferramenta de visualização de dados o monitor serial do mesmo.

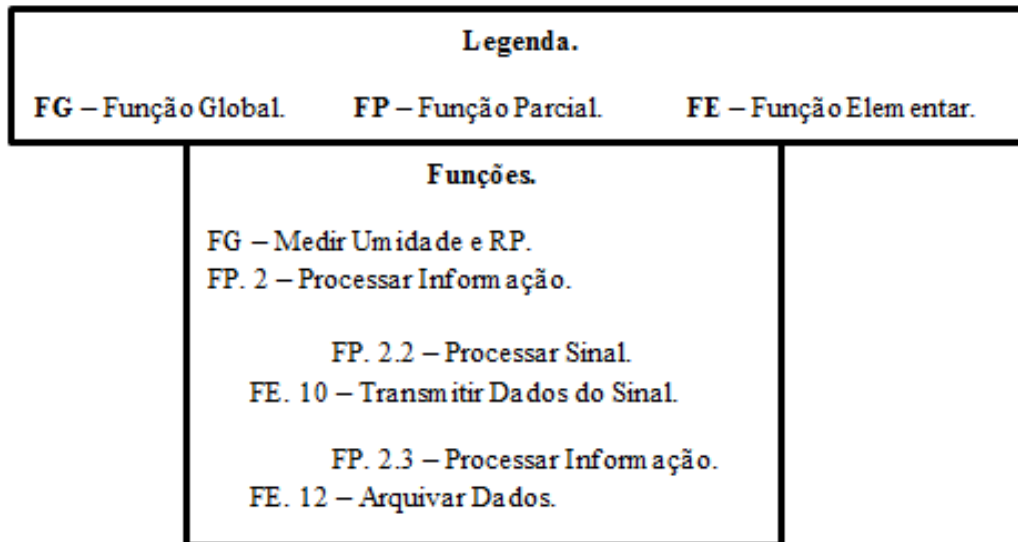
- **Modulo leitor de cartão SD para armazenamento de dados**

Para a realização dos testes do módulo leitor de cartão (Quadro 11), utilizaram-se as simulações do software Proteus® para testar as funções de transmitir e arquivar os dados. Após isso, é testado o sistema interagindo com os demais módulos que compõem o produto.

Quadro 11: Esquematização do procedimento de teste do modulo leitor de Cartão SD.

Modulo leitor de cartão SD para armazenamento de dados conectado a Arduino.		Função a ser testada
		FE. 10
		FE. 12
Objetivo	Avaliar o comportamento funcional do modulo no âmbito das funções elementares do sistema e como o mesmo consegue atender as especificações do projeto	
Comentário	Para avaliação da simulação do teste funcional do modulo leitor de cartão SD, foram testadas e analisadas apenas duas funções (FE. 10 e FE. 12) porque as demais funções elementares foram analisadas com relação a outros componentes (módulo de umidade do solo e de distancia).	

Continuação do Quadro 11 – Esquematização do procedimento de teste do módulo de distância.



Observando que o espaço disponível para armazenamento de dados em um microcontrolador é muito limitado em relação aos modelos maiores onde existe algo de memória *RAM* e em quase todos eles têm uma pequena quantidade de memória *EEPROM*. No entanto, os projetos que envolvem desenvolvimentos de instrumentos precisam armazenar grandes quantidades de dados, tais como temperatura, umidade, pressão, entre outras, além de dados históricos como a data e hora de realização dos processos de medição. É por esse motivo que é muito vantajoso recorrer a algum módulo ou elemento de armazenamento de dados externo.

A solução encontra-se o “Módulo leitor de cartão SD” para armazenamento de dados que é um sistema de armazenamento de dados robusto, leve, barato e altamente compatível com outros sistemas. Além disso, esse módulo tem uma faixa de tensão de trabalho de 2,7V a 3,6V e pode ser operado usando um protocolo SPI, que é bem compatível com os microcontroladores. O que permite uma ótima interação com os demais componentes da arquitetura sem precisar de uma interface de comunicação entre eles.

Ao ser simulado em conjunto com um sensor de umidade foi possível avaliar as funções elementares do sistema, com um enfoque especial nas funções FE. 10 e FE. 12, obtendo como resultado final que o módulo leitor de cartão SD permite armazenar

informações que são compatíveis com o Excel. Isso permite ter uma visualização e, se necessário, uma ferramenta de apoio onde possam ser tratados os dados do instrumento.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tanto na simulação dos módulos quanto a realização de testes forneceram subsídios importantes para examinar se o conceito do produto desenvolvido neste projeto atende às necessidades dos clientes. Nessas atividades do projeto preliminar foram realizadas avaliações quantitativas e qualitativas dos módulos da concepção. As avaliações quantitativas foram simuladas e testadas, e por meio delas procurou-se determinar “o quanto” os módulos são eficientes em atender a função global do produto.

Na avaliação qualitativa dos módulos busca-se, comparar os resultados obtidos das análises com as especificações-meta do produto que foram estabelecidas na fase do projeto informacional. É importante ressaltar que nem todas as especificações do projeto foram avaliadas, pois alguns dependem de observações do desempenho no tempo, como é o caso da frequência de manutenção, custos de manutenção, durabilidade do instrumento e outros que dependem da fabricação do protótipo para serem avaliados, como no caso do número de componentes expostos. A continuação do resultado dessa avaliação é exibida no Quadro 12.

Quadro 12: Avaliação dos testes em relação às especificações do projeto.

Especificação	Unidade de medição	Objetivo	Valor Obtido	Observações
Medições múltiplas (umidade, RP)	MPA cm ³ /cm ³	Ter facilidade de medição das variáveis umidade e Resistência à Penetração	Otima	foram feitas análises de duas variáveis que influenciam diretamente com a função principal do projeto (umidade e distância)
Baixo Consumo de potência/Energia (Kw/h)	w ou kw/h	Mínimo consumo possível	Otima	os sistemas ou módulos apresentam um consumo de potência muito baixo

Continuação do Quadro 12 – Avaliação dos testes em relação à especificações do projeto.

Alta facilidade de calibração	MPA cm ³ /cm ³ Kgf	Garantir acurácia, precisão e confiabilidade nos dados medidos	Satisfatoria	O sensor de umidade precisa ser calibrado em comparação com um método padrão, comumente utiliza-se o método gravimétrico
Baixo custo de aquisição (R\$)	R\$	Compra do instrumento abaixo de 10.000,00	Otima	Os custos de aquisição dos módulos constituem um valor abaixo do total estimado
Alta estabilidade nas medições		uma boa estabilidade do sistema e uma ótima sensibilidade nas medições	Satisfatoria	Evitar as vibrações que possam afetar o sensor ultrasom
Resposta das medições em tempo real	Horas/Dias	Ter uma resposta em menos de 24 horas ou imediato	Otima	Foram obtidas respostas satisfatorias em questão de segundos.
Altos N° de Componentes Normalizados e Padronizados	n°	Utilizar de todos os componentes normalizados e padronizados	Otima	A maioria dos componentes encontram-se disponíveis no mercado

A realização dos testes funcionais, tratando-se de um produto mecatrônico que apresenta características complexas, representa a minimização de tempo e custos para a fabricação do instrumento e aumento das possibilidades de sucesso do produto. É o ponto de partida para a concepção da lista dos materiais, dimensionamentos e outros aspectos necessários para a fabricação do instrumento.

CAPITULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

O objetivo traçado ao iniciar o projeto de pesquisa foi: “Conceber um novo instrumento de medição da umidade e a resistência à penetração do solo” focado no conceito de um dispositivo para realizar medições rápidas e que seja de baixo custo. Para atingir esse objetivo foi aplicada uma metodologia de projeto de produtos mecatrônicos que vem sendo empregada com sucesso em diferentes projetos de pesquisa no âmbito da mecatrônica. O objetivo foi alcançado satisfatoriamente tendo em vista a eficácia das metodologias aplicadas a fim de chegar ao conceito do instrumento a ser desenvolvido.

Embora ainda não tenha sido fabricado o protótipo do produto, os testes funcionais foram determinantes na verificação e avaliação dos módulos que apresentam maior risco para o sucesso da concepção do produto.

Neste capítulo é feita uma análise final dos resultados obtidos no projeto desenvolvido, apontando as principais contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 ANÁLISE DOS OBJETIVOS E RESULTADOS

A revisão da literatura sobre os métodos e técnicas de contexto laboratorial e de campo utilizados para avaliar a compactação do solo através da medição de umidade e resistência à penetração tem a necessidade de utilizar diversos equipamentos, máquinas e pessoas especializadas para realizar a tarefa, tornando esses procedimentos muitas vezes custosos e de difícil manuseio o que acarreta falhas no equipamento e fadiga física dos operários.

O método de avaliação da compactação do solo que apresenta maior precisão, confiabilidade na obtenção dos dados e menor tempo de resposta são de tipo nuclear, analisado por Laraia (2009). Contudo, esse método envolve elevados custos. Além disso, enfrenta dificuldades culturais e legais nas pesquisas de campo realizadas no Brasil. Há como exemplo, o equipamento ficar retido em aeroportos brasileiros, devido à legislação vigente, conforme foi registrado durante o trabalho de levantamento de necessidades junto ao cliente do produto, o que torna a pesquisa dos instrumentos de medição de umidade e resistência à penetração importante para tratar tais consequências.

O estado da arte de metodologias para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos sugere varias abordagens a serem empregadas, como os trabalhos de Montelisciani *et al.*, (2014) e Thompson (2013) que foram essenciais para a condução das atividades durante a fase do Projeto Informacional. Há também o modelo de 3-ciclos de Gausemeier (2011) que tem maior impacto na fase de Projeto Conceitual ao permitir visualizar o produto e o produto virtual. Outra metodologia é modelo V que é útil na definição das diretrizes para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos.

A análise das metodologias e modelos empregados demonstrou a importância da interação e integração para o desenvolvimento de produtos e de sistemas mecatrônicos, assuntos cujas principais referências para o processo de projeto de produto focam-se no projeto de sistemas mecânicos (*vide* Capítulo 3), destacando-se a possibilidade de realizar uma abordagem metodológica por meio da combinação de métodos e técnicas sugeridos na literatura para o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos, mostrando assim como os sistemas complexos podem ser desenvolvidos.

A primeira parte da pesquisa envolveu uma série de visitas a campo para conhecer os métodos de análises existentes, com intuito de compreender melhor o problema de projeto. As visitas a campo e conversas com especialistas que utilizam os equipamentos existentes geram um conjunto de necessidades que são tratadas. Essas atividades orientam o projetista a realizar o levantamento dos *stakeholders* de projeto durante o ciclo de vida do produto, essencial para definir os clientes do projeto, bem como a análise dos envolvidos que sofreram maior impacto com o desenvolvimento do instrumento.

Com o desenvolvimento do projeto conceitual, buscou-se transformar as especificações-meta do produto em um nível de informação mais adequado para os projetistas, no qual o produto adquiriu diferentes arquiteturas físicas que resultaram do preenchimento e análises da matriz DSM, e a combinação dos diferentes princípios de solução a partir da síntese funcional do produto, que foi desenvolvido no Capítulo 4.

A abordagem DSM baseada em componentes proporciona meios para conduzir o processo desenvolvimento da arquitetura do produto mecatrônico e direcionar as equipes de domínio, reduzindo a complexidade do produto no processo de desenvolvimento e

concepção do instrumento mecatrônico, em conformidade com o estudo realizado por Yassine (2004).

Os testes realizados no laboratório, nas instalações da Embrapa Cerrados, permitiram identificar que o modulo de umidade precisa de outro conjunto de testes que incluam solos de baixo teor de óxido de ferro, acompanhados de um teste estatístico de verossimilhança que conduza a maiores ajustes antes de se projetar o modulo final no protótipo físico. O objetivo do teste estatístico é comparar as equações obtidas por regressão com os diferentes tipos de solos, almejando que não haja diferença significativa, o que indicara que o sensor pode ser utilizado em diferentes tipos de solo. Não havendo diferença entre as equações, a verdadeira equação de calibração será ajustada para todos os tipos de solos. Havendo diferença, representará uma restrição a mais para o projeto, de acordo com o que foi relatado por Vuolo (2002): “Os critérios de avaliação da qualidade dos ajustes buscam determinar o grau de verossimilhança da equação ajustada em relação aos pontos experimentais”.

Apesar da restrição relacionada à indisponibilidade de recursos financeiros para aquisição de componentes mais sofisticados e precisos, os resultados dos testes com o modulo de umidade foram bons, pois na maioria dos solos coletados para esse proposito o sistema apresentou um erro de $\pm 5\%$, com exceção do solo RQ onde a faixa de erro foi de aproximadamente $\pm 10\%$, o que evidencia que a aquisição de módulos de baixo custo pode comprometer aspectos como a confiabilidade e acurácia do sistema (vide Capítulo 5).

O método do teste funcional é uma das técnicas do Projeto Preliminar utilizada para a verificação de aspectos técnicos das concepções do produto, utilizando as especificações do produto como requisito de sistema a ser testado. Esse método forneceu indicadores importantes sobre o produto, em conformidade com as conclusões de Back & Leal (1991), atestando que o objetivo principal do trabalho foi alcançado. Esse resultado conduzira projetos futuros a uma situação de custos reduzidos e menores tempos de fabricação.

Com os resultados dos testes realizados até o momento, já é possível afirmar que os princípios de solução adotados neste projeto são capazes de atender a função global do

produto mecatrônico – Medir Umidade e Resistência à Penetração. Mesmo sem que o protótipo ainda fosse construído.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Durante o desenvolvimento do projeto do produto, auxiliado por métodos e técnicas específicos, elicitaram-se ideias para trabalhos futuros.

- Desenvolvimento de um sistema computacional para o processo de estimativa de custos para as concepções geradas.
- Fabricação do protótipo visando realizar testes aprofundados de campo com o propósito de avaliar a concepção e o desempenho qualitativo e quantitativo do produto, buscando assim possíveis melhorias na concepção do instrumento.
- Submeter o protótipo a um regime de trabalho contínuo com objetivo de avaliar os requisitos do projeto que ainda não foram testados como: frequência de manutenção, custos de manutenção, durabilidade do instrumento que são requisitos medíveis em condições reais de operação com relação a um período de tempo prolongado (dias, meses ou anos).
- Desenvolvimento de um protótipo *alfa* do instrumento para realizar um estudo de caso com relação a fatores de usabilidade e ergonomia que possam acrescentar a pesquisa e melhorar a concepção do produto.
- Realizar um estudo focado em fatores metrológicos relacionados ao instrumento, como: calibração, precisão, acurácia e estabilidade.
- Desenvolver um modelo matemático para facilitar a calibração do instrumento em aspectos relacionados com a umidade nos diferentes solos de Brasil.
- Realizar um estudo sobre materiais leves, resistentes (principalmente a condições ambientais e desgastes) e de baixo custo para a fabricação mecânica do instrumento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARDUINO. *Arduino*. Acesso em 20 de 10 de 2015, disponível em Arduino: <https://www.arduino.cc/>,2015.

BACK, N., et al.. *Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem*. Barueri,SP: Manole, 2008.

BACK, N., & LEAL, L. D. Uma metodologia de planejamento de teste de produtos industriais. *Revista Produção*, v. 2, p. 61-69, 1991.

BELEI, R. A., et al. O uso de entrevista, observação e videogravação em pesquisa qualitativa. *Cadernos de educação*, v. 30, 2012.

BIANCHINI, A., et al. Penetrógrafo eletrônico automático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 2, p. 332-336, 2002.

BOLTON, W. *Mecatrônica: uma abordagem multidisciplinar*. Bookman, 2010.

BOUCHER, M., & HOULIHAN, D. System design: new product development for mechatronics. *Publication of Aberdeen Group*, 2008.

BREJO, E. G. *Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC*. Marcombo, 2012.

CAMARGO, O. A., & ALLENOI, L. R. "Reconhecimento e medida da compactação do solo". disponível em "Reconhecimento e medida da compactação do solo": http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2_C6, Acesso em 04 de 10 de 2014.

CARBONERA, L. *projeto de iniciação científica – PIBIQ (2005/2006) comparação entre diferentes penetrômetros para diagnósticos de compactação de solo*. Universidade de São Paulo escola superior de agricultura “Luiz de Queiróz”, departamento de engenharia rural, Piracicaba, 2007.

CAROLINO, M. A., & GOMES, J. D. *Considerações teoricas sobre o calculo da resistencia mecanica do solo à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos*. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 2007.

COSTA, M. J., et al. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 29, n. 5, p. 701-708, 2007.

D'AVILA, T., & D'AVILA, E. *Introdução ao desenho assistido por computador: noções de desenho e autocad*. Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo CEFET-SP, São Paulo, 2006.

DE AZEVEDO, J. A., & DA SILVA, E. M. *Tensiômetro: dispositivo pratico para controle da irrigacao*. Embrapa Cerrados, 1999.

de Cerqueira Silveira, et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

DEFINED, F. *Definição de open source hardware (OSHW) 1.0*. Acesso em 26 de 10 de 2015, disponível em Definição de open source hardware (OSHW) 1.0.: <http://freedomdefined.org/OSHW/translations/portuguese>, 2013.

Embrapa, E. B. (s.d.). *Tecnologias e Produtos*. Acesso em 07 de 07 de 2015, disponível em Tecnologias e Produtos: <http://portal.cnpdia.embrapa.br/tecnologias-e-produtos>

ENSSLIN, L., et al. Identificação das necessidades do consumidor no processo de desenvolvimento de produtos: uma proposta de inovação ilustrada para o segmento automotivo. *Produção (São Paulo. Impresso)*, v. 21, n. 4, p. 555-569, 2011.

Faria, C. (2009). *Método de Pugh*. Acesso em 15 de 07 de 2015, disponível em Método de Pugh: <http://www.infoescola.com/empresas/metodo-de-pugh/>

FARINA, E. *Desenvolvimento conceitual de um módulo de potência para agricultura*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

FERREIRA, E. A., & FRANZ, C. A. Notas Científicas Minipenetrômetro dinâmico para determinação da resistência à penetração em amostras de solo indeformadas.". *Pesq. agropec. bras.*, v. 42, n. 11, p. 1659-1662, 2007.

FERREIRA de ALMEIDA, F. (s.f.). *Circuitos Hidráulicos - Elementos*. Recuperado el 20 de 10 de 2015, de Circuitos Hidráulicos - Elementos: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABBqUAG/circuitos-hidraulicos-elementos>

GAUSEMEIER, J. et al. Integrative development of product and production system for mechatronic products. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 27, n. 4, p.772-778, 2011.

GAUSEMEIER, J., et al. Conceptual design of modularized advanced mechatronic systems. In *DS 58-4: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*. v. 4. Product and Systems Design, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08, 2009.

HEHENBERGER, P., & ZEMAN, K. Design activities in the development process of mechatronic systems. *Advanced intelligent mechatronics, 2007 IEEE/ASME international conference on. IEEE*, p. 1-6, 2007.

HEHENBERGER, P., et al. Hierarchical design models in the mechatronic product development process of synchronous machines. *Mechatronics*, v. 20, n. 8, p. 864-875, 2010.

ISERMANN, R. Mechatronic systems—innovative products with embedded control. *Control Engineering Practice*, v. 16, n. 1, p. 14-29, 2008.

LARAIA, M. L. *Proposta de monitoramento de um rejeito de minério visando seu aproveitamento como superfície de aterros sanitários*. Ouro Preto, 2009.

LEE, Y. C., SHEU, L. C., & TSOU, Y. G. Quality function deployment implementation based on Fuzzy Kano model: an application in PLM system. *Computers & Industrial Engineering*, v. 55, n. 1, p. 48-63, 2008.

MANIERI, J. M. *Utilização de um penetrômetro de impacto combinado com sonda de tdr para medidas simultâneas de resistência e de umidade do solo na avaliação da compactação em cana-de-açúcar*. Campinas, 2005.

MARCOLIN, C. D., & KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Sci. Agron*, v. 33, p. 349;354, 2011.

MARIBONDO, J. F.. *Metodologia de projeto de sistema modular*. Universidade Federal de Santa, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Florianópolis, 2000.

MIRANDA, E. E. (2006). *Modelagem e mapas de capacidade suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar*. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônomicas Campus de Botucatu, Botucatu - SP.

MONTELISCIANI, G., et al. Ordering the Chaos: a Guided Translation of Needs into Product. *Procedia CIRP*, v. 21, p. 403-408, 2014.

MORONI, I. T., & ARANTES, J. A. Aplicação do método pugh para a sistematização do pdp na cadeia de suprimentos numa empresa do segmento automotivo. *IX Congresso nacional de excelência em gestão*, 2013.

NADERI-BOLDAJI, M., et al. Use of a triple-sensor fusion system for on-the-go measurement of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, v. 128, p. 44 - 53, 2013.

NAIME, J. D., et al. Penetrômetro dinâmico automatizado: versão eletrônica. *Embrapa Instrumentação Agropecuária. Comunicado Técnico*, 2006.

NETO, V. M. *Metodologia para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos*. Universidade Federal de Santa Catarina, (Tese doctoral, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.), Florianópolis, 2002.

NICKEL, E. M., et al. Modelo multicritério para referência na fase de Projeto Informacional do Processo de Desenvolvimento de Produtos. *Gest. Prod., São Carlos*, v. 17, n. 4, p. 707-720, 2010.

PAHL, G., & BEITZ, W. *Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos, Métodos e Aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

PEREIRA, S., et al. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 306-314, 2006.

PIMMLER, T., & EPPINGER, S. D. Integration analysis of product decompositions. *ASME Design Theory and Methodology Conference*, p. 343-351, 1994.

PIRES, L. F., et al. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 33, p.161-170, 2011.

RAMOS, F. T., et al. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: Com e sem reuso de amostras. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 17, n. 2, p. 129-136, 2013.

ROCCO, A. M., & SILVEIRA, A. D. *Ferramental para eficiência em vendas*. UFSC, Santa Catarina, 2007.

RODRÍGUEZ, Y. B., et al. Modelo matemático para ajustar las lecturas de impactos del penetrómetro de impacto a valores de resistencia. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v. 18, n. 1, p. 37-40, 2009.

ROZENFELD, H. et al. *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria de processos*. São Paulo: Saraiva, 2006.

SÁ, M. D., & Santos Júnior, J. D. *Compactação do solo: conseqüências para o crescimento vegetal*. . Embrapa Cerrados , Planaltina, DF, 2005.

SANTANA, E. F. *Desenvolvimento do protótipo de uma máquina para lavagem de lanternas no cultivo de ostras*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SCALICE, R. K. *Desenvolvimento de uma família de produtos modulares para o*. Universidade Federal de Santa Catarina., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Florianópolis, 2003.

SCHUSTER, C. H., et al. Aplicação do diagrama de Mudge e QFD utilizando como exemplo a hierarquização dos requisitos para um carro voador. *Revista GEPROS*, v. 10, n. 1, p. 197, 2014.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., & BUDYNAS, R. G. *Projeto de Engenharia Mecânica* (7 ed.). Porto Alegre: Bookman, 2005.

SONEGO, M. *Métodos de modularização no projeto conceitual de desenvolvimento de produtos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p. 229-235, 1991.

STOLF, R., et al. Penetrômetro de impacto stolf-programa computacional de dados em Excel-VBA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 3, p. 774-782, 2014.

STOLF, R., et al. Incorporação de régua para medida de profundidade no projeto do penetrômetro de impacto Stolf. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 5, p. 1476-1482, 2012.

STONE, R., WOOD, K. L., & CRAWFORD, R. A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies*, v. 21, p. 5-31, 2000.

TAVARES FILHO, J., & RIBON, A. A. "Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem.". *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 32, n. 1, p. 487-494, 2008.

THOMPSON, M. K. Improving the requirements process in Axiomatic Design Theory. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 62, n. 1, p. 115-118, 2013.

TODIĆ, V., et al.. Manufacturability of product design regarding suitability for manufacturing and assembly (DfMA). *Journal of production engineering*, v. 16, n. 1, 2012.

TORMENTA, C. A., et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. . *Scientia Agricola*, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

TORRES, E., & SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. *Embrapa Soja*, 1999.

- ULLMAN, D. G. The mechanical design process. *McGraw-Hill*, 1992.
- ULRICH, K. T. The Role of Product Architecture in Manufacturing Firm. *Research policy*, v. 24, n. 3, p. 419-440, 1995.
- VAN BEEK, T. J., ERDEN, M. S., & TOMIYAMA, T. Modular design of mechatronic systems with function modeling. *Mechatronics*, v. 20, n. 8, p. 850-863, 2010.
- Vasić, V. S., & Lazarević, M. P. Standard industrial guideline for mechatronic product design. *FME Transactions*, v. 36, n. 3, p. 103-108, 2008.
- VÁSQUES GARCIA, I. *Prototipo de un penetrómetro cónico de impacto y su validación de uso en suelos forestales*. Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2010.
- VAZ, C. M., & HOPMANS, J. W. Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer–TDR moisture probe. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, n. 1, p. 4-12, 2001.
- VAZ, C. M., et al. *Validação de 3 equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a medida da umidade de solos*. Embrapa, São Carlos, 2004.
- VAZ, C. M., et al. Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto. *Embrapa Instrumentação Agropecuária. Comunicado Técnico*, 2002.
- VUOLO, J. H., Fundamentos da teoria de erros. 2a Edição, Ed. *Edgard Blücher Ltda., São Paulo*, 2002.
- Wendling, M. *Sensores*, 2012.
- XU, Y., ZOU, H., & LI, R. Research on conceptual design of mechatronic systems. *Sadhana*, v. 31, n. 6, p. 661-669, 2006.
- YASSINE, A. An introduction to modeling and analyzing complex product development processes using the design structure matrix (DSM) method. *Urbana*, v. 51, n. 9, p. 1-17, 2004.

ANEXOS

**ANEXO I - LEVANTAMENTO DAS NECESSIDADES DO CLIENTE
ATRAVÉS DE UMA ENTREVISTA.**

1 - Objetivo da Pesquisa

Esta pesquisa tem como objetivo realizar levantamentos de dados e informações, para justificar o projeto de automação do penetrômetro dinâmico, assim como levantar as necessidades dos clientes, para desenvolver um instrumento de medição da resistência à penetração do solo.

2 - Dados Gerais

A. Cooperativa ()

B. Produtor rural ()

C. Instituição Governamental ()

D. Instituição de Pesquisa ()

Outros (). Qual: _____

Nome:

Localização:

3 - Cargo ou função desempenhada pelo entrevistado:

A. Analista de lab. ()

B. Empresário/ Produtor ()

C. Operário ()

D. Funcionário de instituição ()

E. Pesquisador ()

F. Outros ()

Caso a resposta seja F especificar a função desempenhada _____

4 - Tempo de serviço na função

A. Menos de 5 anos ()

B. 5-10 anos ()

C. 11-15 anos ()

D. Acima de 16 anos ()

5 – Qual o nível de importância do uso de instrumento para determinar a Resistência à Penetração do solo para o seu trabalho? Utilize a escala de 1-5.

A. () 1 B. () 2 C. () 3 D. () 4 E. () 5

6 – Você possui/utiliza algum equipamento para determinar a Resistência à penetração do solo?

A. () Sim

B. () Não.

7 – Caso sua resposta sejam sim, quais equipamentos você possui?

8 – Das razões listadas. Quais foram as principais razões da escolha destes equipamentos?

A. Custo produção de peças ();

B. Precisão ();

C. Velocidade de resposta, custo e versatilidade ();

D. Precisão, baixo investimento inicial, baixo custo de manutenção ();

E. Confiabilidade do instrumento ()

F. Outros ()

9 – Você lembra algum inconveniente marcante que ocorreu com a utilização do equipamento?

10 – Você teria interesse em adquirir um novo instrumento de medição da Resistência à Penetração do solo?

A. () Sim

B. () Não.

11 – Você já tem alguma ideia em mente para o desenvolvimento do novo instrumento, ou melhora dos que já existem? Qual? O que fez você escolher esta ideia como sua solução?

12 – Dos problemas listados abaixo, quais você acredita que seriam os mais inconvenientes no uso de um novo equipamento?

A. Custo de operação/ fabricação ();

B. Manutenção ();

C. Pouco espaço disponível para o equipamento ();

D. Necessidade de treinamento/ conhecimento envolvido ();

- E. Ruído ();**
- F. Manuseio ();**
- G. Dificuldade para transportar o equipamento ();**
- H. Calibração do instrumento dificultosa ();**
- I. Ergonomia ();**
- J. Peso do instrumento ();**
- K. Inseguro para sua operação ()**
- L. Impreciso ();**
- M. Difícil montagem ();**
- N. Software não compatível com outros e com Excel ();**
- O. O instrumento não pode ser operado em condições ambientais tais como: vento, poeira, poluição, ambientes úmidos, sol (dificultando as leituras)();**

13 – Com relação à medição da Resistência à Penetração do solo, você prefere investir em:

- A. () Um instrumento com tecnologia e software fácil de usar, mas com menor numero de possibilidade para o resultado final da medição;**
- B. () Um instrumento com tecnologia e software complexa, mas com um maior numero de possibilidade para o resultado final da medição.**

14 – Com relação ao processo de desenvolvimento de um instrumento de medição da Resistência à penetração do solo, qual o posicionamento da sua empresa em relação à adoção de uma nova tecnologia?

- A. () Um instrumento com tecnologia e software fácil de usar, mas com menor numero de possibilidade para o resultado final da medição;**
- B. () Um instrumento com tecnologia e software complexa, mas com um maior numero de possibilidade para o resultado final da medição.**

15 – Com relação à importância da estrutura do solo na produção agrícola, qual a importância da medição da compactação do solo? Utilize a escala de 1-5.

- A. () 1 B. () 2 C. (X) 3 D. () 4 E. () 5**

16 – Como é realizada a medição e leitura da Resistência à Penetração do solo atualmente?

A. No Campo ()

B. Em laboratório como Penetrômetro de bancada ()

Si a resposta for B, qual é o tempo aproximado de espera envio das amostras e os resultados? Qual seria o tempo ideal?

17 – Qual é o nível de precisão nas medições Resistência à Penetração do solo? Utilize a escala de 1-5.

A. () 1 B. () 2 C. () 3 D. () 4 E. () 5

18 – Qual é o nível de importância do controle da umidade no processo de medição da Resistência à Penetração do solo? Utilize a escala de 1-5.

A. () 1 B. () 2 C. () 3 D. () 4 E. () 5

19 – Qual é o nível de falha das medições de penetrometria? Utilize a escala de 1-5.

A. () 1 B. () 2 C. () 3 D. () 4 E. () 5

20 – Quando se utiliza um instrumento para medir a Resistencia à penetração do solo, quais são as falhas mais prováveis nas medições?

21 – Desde o ponto de vista do instrumento (o Penetrômetro), que outras variáveis são importantes medir além da resistência à penetração?

22 – Qual é a importância do desenvolvimento de um instrumento capaz de medir a Resistência à Penetração do solo em tempo real?

23 – Sob Quais condições ambientais o instrumento estará sujeito?

24 – O instrumento necessita ser portátil? Por quê?

25 – Qual seria o peso razoável para um penetrômetro a ser utilizado em campo? E em bancada de laboratório?

26 – Como gostaria que fosse realizada a manutenção do equipamento?

A. Realizada pela sua empresa ()

B. Assistência técnica autorizada ()

27 – Dentro da tecnologia utilizada atualmente para a medição da Resistência à penetração do solo e o seu custo: Qual seria o valor máximo que você estaria disposto a pagar pelo instrumento?

28 – Quais são suas expectativas em relação ao instrumento? (Sugestões)

29 – Listem suas maiores necessidades em relação ao controle de qualidade no processo de armazenamento de dados obtidos nas medições para avaliar a compactação do solo (Sugestões).

ANEXO II - FLUXOGRAMA DE PROJETO POR ENCOMENDA PARA EMBRAPA.

Fluxograma de Projeto por encomenda para EMBRAPA		
Processo	Característica	Necessidades presentes
Levantar o instrumento do chão	Erguer instrumento do chão	1. Ser leve
Condução do instrumento até a unidade de armazenamento do instrumento	Deslocamento do instrumento até o carro e levado ao campo	2. Ser versátil e compacto
		3. Ser de fácil transporte
		4. Ser seguro pelo transporte
		5. Ser portátil
		6. Ser de fácil montagem e desmontagem
Montagens dos equipamentos	São preparados e montados os instrumentos que serão utilizados no estudo e colheita de amostras do solo.	1. Ser leve
		7. Não ter muitos cabos
		8. Ser seguro pelo operador
Transporte do equipamento por o operador	o operador necessita caminhar pela área a ser avaliada para fazer as medições. Normalmente, além do penetrômetro, carrega outros equipamentos, como trado para coleta de solo para avaliação de umidade, bolsa com amostras de solo coletadas, prancheta para anotar dados, cantil de água, entre outros.	5. Ser portátil
		2. Ser versátil e compacto
		3. Ser de fácil transporte
		1. Ser leve
Colheita e registro de dados	O operário ou pesquisador faz o levantamento das informações, colheita amostras e registra os dados na prancheta.	8. Ser seguro pelo operador
		9. Não utilizar mais de um operador o instrumento
		10. Ser de fácil manuseio
		11. Ser preciso
		12. Ter uma boa acurácia e confiabilidade
		13. Ter armazenamento de dados
		14. Ser confortável pelo uso do operário
		1. Ser leve
		15. Ser operável em condições ambientais (chuva, poeira, poluições)
		16. Ter medições de (umidade, RP)
		17. Ter perpendicularidade na penetração da haste
		18. Ter proteção contra atos inseguros
		19. Não causar intensa reação visual
		20. Ser de fácil remoção da haste do solo com esforço reduzido
		21. Estar normalizado e padronizado
		Estar de acordo com as normas técnicas

Continuação...

Estudos de laboratório	As amostras coletadas nos anéis volumétricos da área avaliada são levadas pelo laboratório para análises de penetrômetria, Umidade e Densidade em condições controladas	13. Ter armazenamento de dados
		10. Ser de fácil manuseio
		11. Ser preciso
		12. Ter uma boa acurácia e confiabilidade
		14. Ser confortável pelo uso do operário
		16. Ter medições de (umidade, RP)
		17. Ter perpendicularidade na penetração da haste
		18. Ter proteção contra atos inseguros
		19. Não causar intensa reação visual
		22. Ser de fácil remoção da haste do solo sem deformar a amostra
		Estar de acordo com as normas técnicas
Análise computacional de dados	Os dados obtidos no campo e/ou laboratório são levados pelo operário ao sistema (software) para determinar o cálculo da RP, Umidade gravimétrica, Umidade volumétrica e densidade.	21. Estar normalizado e padronizado
		23. Ter um sistema compatível com EXCEL
		13. Ter armazenamento de dados
		24. Ter aspecto visual agradável
		10. Ser de fácil manuseio

ANEXO III - MATRIZ DE APOIO AO LEVANTAMENTO DOS ATRIBUTOS E REQUISITES DO PROJETO

Ciclo de Vida	Classificação dos Stakeholders		Stakeholders	necessidades	Funcionamento	Ergonomia	Estética	Economicidade	Segurança	Confiabilidade	Legalidade	Patentiabilidade	Da normalização	Do Impacto Ambiental		
PROJETO	Externos	Diretos	13. Embrapa	A) Ser de custo de acessível				x								
				B) Não ser copia de nenhum produto já existente						x	x					
				C) Estar de acordo com as normas técnicas para geração de patentes.									x	x	x	
				D). Ter uma boa acurácia e confiabilidade	x							x				
				E) Ter custo acessível de fabricação e manutenção						x						
				1. Ser leve		x										
				2. Ser versatil e compacto		x					x					
				3. Ser de facil transporte		x				x	x					
				4. Ser seguro pelo transporte		x				x	x					
				5. Ser portatil		x					x					
				6. Ser de fácil montagem e desmontagem		x				x	x					
				7. Não ter muitos cabos		x				x						
				8. Ser seguro pelo operador		x						x				
				9. Não utilizar mais de um operador o instrumento		x	x									
				10. Ser de facil manuseio		x	x					x				
				11. Ser preciso		x							x			
				12. Ter uma boa acurácia e confiabilidade		x							x			
				13. Ter armazenamento de dados		x							x			
				14. Ser confortavel pelo uso do operario		x	x					x				
				15. Ser operável em condições ambientais (chuva, poeira, poluções)		x	x					x				
16. Ter medições de (umidade, RP)		x							x							
17. Ter perpendicularidade na penetração do haste		x							x							
18. Ter proteção contra atos inseguros								x								
19. Não causar intensa reação visual		x														
20. Ser de facil remoção da haste do solo com esforzo reducido		x	x					x		x		x				

Continuação...

Ciclo de Vida	Classificação dos Stakeholders		Stakeholders	necessidades	Funcionamento	Ergonomia	Estética	Economicidade	Segurança	Confiabilidade	Legalidade	Patentiabilidade	Da normalização	Do Impacto Ambiental			
				21. Estar normalizado e padronizado				x			x	x					
				F) Estar de acordo com as normas técnicas				x			x	x					
				22. Ser de fácil remoção da haste do solo sem deformar a amostra	x	x					x						
				23. Ter um sistema compatível com EXCEL	x					x		x					
				24. Ter aspecto visual agradável					x								
				25. Ter baixo consumo de energia	x					x							
				26. Ter uma vida útil longa							x		x				
				32. Ter produção limpa										x	x	x	
				33. Ser inovador	x										x		
				34. Ser de fácil descarte										x	x	x	
	35. Não gerar poluição										x	x	x				
	Indiretos		4. Cooperativas/Industria/Universidades/Agroindústria/Sector Civil	F) Estar de acordo com as normas técnicas e leis					x			x	x				
				14. Laboratórios de INMETRO	F) Estar de acordo com as normas técnicas e leis					x			x	x			
	Intermediários		6. INPI/ IBPI/ United States Patent/ Propriedade Intelectual (Inventores)	B) Não ser copia de nenhum produto já existente									x				
				11. Concorrentes	B) Não ser copia de nenhum produto já existente									x			
				20. Distribuidor do instrumento	36. Ter distribuição rápida, eficaz e segura					x	x				x		
				8. ABNT/ ISSO	F) Estar de acordo com as normas técnicas					x			x	x			
	Internos		15. Fornecedores de peças e componentes	F) Estar de acordo com as normas técnicas					x			x	x				
				17. Desenvolvimento de Fornecedores de componentes e serviços	F) Estar de acordo com as normas técnicas					x			x	x			
19. Laboratórios de Instituições de pesquisa e ensino				F) Estar de acordo com as normas técnicas					x			x	x				

Continuação...

Ciclo de Vida	Classificação dos Stakeholders		Stakeholders	necessidades	Funcionamento	Ergonomia	Estética	Economicidade	Segurança	Confiabilidade	Legalidade	Patentiabilidade	Da normalização	Do Impacto Ambiental	
	Externos	Indiretos													
FABRICAÇÃO	Externos	Indiretos	14. Laboratórios de INMETRO	F) Estar de acordo com as normas técnicas				x			x	x			
			Intermediários	20. Distribuidor do instrumento	21. Estar normalizado e padronizado			x				x	x		
				8. ABNT/ ISSO	36. Ter distribuição rápida, eficaz e segura			x	x					x	
	Internos		15. Fornecedores de peças e componentes	F) Estar de acordo com as normas técnicas				x			x	x			
				28. Ter componentes padronizados disponíveis no mercado				x					x		
			18. Fabricante do instrumento	21. Estar normalizado e padronizado						x			x	x	
				31. Ser de fácil fabricação						x				x	
				32. Ter produção limpa									x		x
				30. Utilizar de processos convencionais de fabricação						x				x	x
				6. Ser de fácil montagem e desmontagem	x	x									
29. Utilizar de peças padronizadas						x	x				x				
17. Desenvolvimento de Fornecedores de componentes e serviços	E) Ter baixo custo acessível de fabricação						x				x				
TRANSPORTE	Externos	Diretos	20. Distribuidor do instrumento	21. Estar normalizado e padronizado				x			x	x			
			13. Embrapa	27. Ter a possibilidade de fabricar subsistemas em diversas empresas				x				x	x		
			36. Ter distribuição rápida, eficaz e segura						x	x			x		
COMERCIALIZAÇÃO	Externos	Diretos	13. Embrapa	2. Ser versátil e compacto	x				x						
				3. Ser de fácil transporte	x				x						
USO	Externos	Diretos	13. Embrapa	4. Ser seguro pelo transporte					x						
				25. Ter aspecto visual agradável							x				
MANUTENÇÃO	Externos	Diretos	13. Embrapa	28. Ter componentes padronizados disponíveis no mercado									x		
				6. Ser de fácil montagem e desmontagem	x	x									
				1. Ser leve		x									
				37. Ter manutenção fácil	x					x	x				
				E) Ter custo acessível de manutenção	x					x					
				18. Ter proteção contra atos inseguros	x	x				x	x				
DESCARTE	Internos		18. Fabricante do instrumento	38. Ter facilidade de identificação de erros	x			x	x						
				32. Ser de fácil descarte								x	x	x	
			20. Distribuidor do instrumento	35. Não gerar poluição										x	
				6. Ser de fácil montagem e desmontagem	x	x									

ANEXO IV – CASA DA QUALIDADE

Alta resolução de sinal										
Alta estabilidade nas medições	+									
Medições múltiplas (umidade, RP)	++	++								
Resposta das medições em tempo real	+	+	++							
Alto nível de identificação de erros (%)	-	+	++	+						
Baixo consumo de potência/energia (Kwh)	+		++	+	+					
Alta resistência a condições ambientais e físicas	+		+			-				
Baixa exigência de esforço físico do operador (Kgf)	++				+		-			
Alta Segurança durante a operação			+		+	+	+	++		
Baixo número de componentes expostos (n°)						+			++	
Baixo custo de aquisição (R\$)							+			-
Baixa frequência de manutenção (n°)	+					-		+		
Alta facilidade de calibração			+		+			+	+	+
Altos n° de componentes normalizados e padronizados (n°)										
Durabilidade do Instrumento (anos)			-		-		+		+	-
Baixo custo de manutenção (R\$)	-		+		+					
Alto n° de componentes recicláveis (n°)										
Alto n° de componentes com geometria simples (n°)							+		+	+
Suporte para encaixe e apoio										
Alta facilidade de operabilidade do sistema	-	+	-				+		+	+
Baixo custo de fabricação (R\$)										
Direcionador de melhoria >>>>	>>>>	>>>>	>>>>	>>>>	>>>>	>>>>	<<<<	>>>>	<<<<	>>>>

		Alta resolução de sinal	Alta estabilidade nas medições	Medições múltiplas (umidade, RP)	Resposta das medições em tempo real	Alto nível de identificação de erros (%)	Baixo consumo de potência/energia (Kwh)	Alta resistência a condições ambientais e físicas	Baixa exigência de esforço físico do operador (Kgf)	Alta Segurança durante a operação	Baixo número de componentes expostos (n°)
RC: Requisitos do Cliente	RC1	Ter uma boa acurácia e confiabilidade	1	9	9	9	9	1	1	1	1
	RC2	Ser multifuncional	1	1	9	1	1	9	1	1	9
	RC3	Ser de fácil manuseio	1	1	9	1	3	1	1	1	9
	RC4	ser leve	1	1	1	1	1	1	1	9	9
	RC5	Ser confortável pelo uso do operário	1	1	9	1	1	1	1	3	1
	RC6	Estar de acordo com as normas técnicas e leis	3	1	9	1	1	9	1	1	1
	RC7	Ter proteção para atos inseguros.	1	1	1	1	1	9	9	1	9
	RC8	Ser de fácil montagem e desmontagem	1	1	1	1	1	1	1	3	3
	RC9	Ser inovador	1	3	1	1	3	1	3	1	1
	RC10	Ter distribuição rápida, eficaz e segura	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC11	Ter componentes padronizados disponíveis no mercado	1	1	1	3	1	1	1	1	1
	RC12	ser de fácil manutenção	1	1	1	1	9	1	1	3	3
	RC13	Ser de fácil fabricação	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC14	Não causar intensa reação visual	9	3	1	1	1	1	1	1	1
	RC15	Não ter muitos cabos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC16	Ter baixo consumo de energia	1	1	1	1	1	9	1	1	1
	RC17	Ser de custo acessível	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC18	Ter custo acessível de fabricação e manutenção	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC19	Ser portátil	1	1	1	1	1	1	1	9	1
	RC20	Ter facilidade de identificação de erros	1	1	3	1	9	3	1	1	1
	RC21	Ter uma vida útil longa	1	1	1	3	1	1	9	1	1
	RC22	Ter perpendicularidade na penetração do haste	1	1	1	1	3	1	1	1	1
	RC23	Utilizar processos convencionais de fabricação	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC24	Não gerar poluição	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC25	Ser de fácil descarte	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC26	Ter a possibilidade de fabricar subsistemas em diversas empresas	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RC27	Não necessitar intensa intervenção humana para sua operação	3	1	1	1	3	1	1	9	1
Grau de importância (req. produto)		145,3	144,7	258,2	144,7	218,8	228,6	167,0	211,4	211,4	129,9
Percentual		4,1	4,0	7,2	4,0	6,1	6,4	4,7	5,9	5,9	3,6
Unidade											
Bencharking Técnico de Produto	Nosso Produto (se existente)										
	Concorrente X										
	Concorrente Y										
Plano (valor meta)											
Dificuldade Técnica / Reutilização											
RP: Requisitos do Produto (Qualida											

Escala Likert	1	2	3	4	5
Critério de Kano	L	O	E		
Argumento de venda	1	1,2	1,5		

Continuação....

Direcionador de melhoria	
0	não importa a variação do valor
>>	quanto maior o valor melhor
<<	quanto menor o valor melhor

												Bechmarking de Mercado			qualidade planejada							
												Cliente	Kano (interno)	Grau de importância (geral)	Nosso Produto	Concorrente X	Concorrente Y	Plano	Índice de melhoria	Argumento de vendas	Peso absoluto	Peso relativo
Baixo custo de aquisição (R\$)	Baixa frequência de manutenção (n°)	Alta facilidade de calibração	Alto n° de componentes normalizados e padronizados (n°)	Durabilidade do instrumento (anos)	Baixo custo de manutenção (R\$)	Alto n° de componentes recicláveis (n°)	Alto n° de componentes com geometria simples (n°)	Suporte para encaixe e apoio	Alta facilidade de operabilidade do sistema	Baixo custo de fabricação (R\$)												
-	+	-	++	+																		
+	+	-	++	+																		
++	+	+	++	+																		
+	++		+	+																		
			+	-																		
	+		+	+	+																	
+			+	+																		
+	-		+			+	+	+														
<<	<<	>>	>>	>>	<<	>>	>>	>>	>>	<<												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	9	3	1	1	1	1	1	3	1												
1	9	1	1	1	1	1	1	3	9	1												
1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	3	9	3	1												
1	1	9	3	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	3	3	1	1	1	1	1	3	1	1												
1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1												
1	9	1	1	1	3	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1												
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
9	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	9	3	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3												
1	1	1	1	3	1	9	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
159,6	196,6	199,0	145,3	137,3	137,3	144,7	137,3	181,8	144,7	137,3	3581,2								27	100		
4,5	5,5	5,6	4,1	3,8	3,8	4,0	3,8	5,1	4,0	3,8	100,0											

As células marcadas dessa cor são calculadas automaticamente

de Projetada / Características Técnicas do Produto)

ANEXO V – PROGRAMAS UTILIZADOS NOS TESTES FUNCIONAIS

Módulo de Distância.

```
const int trigger = 12; //22;
const int echo = 13; //23;
void setup() {
  pinMode(trigger, OUTPUT);
  pinMode(echo, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  long duration, inches, cm;
  digitalWrite(trigger, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigger, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigger, LOW);
  duration = pulseIn(echo, HIGH);
  cm =
microsecondsToCentimeters(duration);
  inches = duration*0.034/2; // formula da
distancia
  Serial.print("medida instrumento:");
  Serial.print(inches);
  Serial.print("cm , ");
  Serial.print("      sensor calibrado: ");
  Serial.print(cm);
  Serial.println("cm ");
  delay(100);
}
long      microsecondsToCentimeters(long
microseconds)
{
  //return (microseconds / 29.4117647 / 2.);
// sensor calibrar
  return (microseconds / 29.4117647 / 2.-
1.697959)/1.257335; // sensor calibrado
}
```

Módulo de Umidade.

```
#include <Wire.h>
#include <LCD.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define I2C_ADDR  0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR,2, 1, 0,
4, 5, 6, 7);
int umidade;
int ativaSensor = 8;
void setup()
{
  lcd.begin(16, 2);
  pinMode(13, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ativaSensor, OUTPUT);
  lcd.setBacklightPin(3,POSITIVE);
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.clear();
  lcd.home ();
}
void loop()
{
  digitalWrite(ativaSensor, HIGH);
  digitalWrite(13, LOW);
  lcd.setCursor(0, 0);
  umidade = analogRead(A0);
  umidade = map(umidade, 1023, 0, 0, 200);
  lcd.print("Umidade solo:");
  lcd.print(umidade);
  lcd.print(" %");
  Serial.print("Umidade em:");
  Serial.print(umidade);
  Serial.println(" %");
  if(umidade < 20)
  {
    digitalWrite(13, HIGH);
  }
  delay(500);
  lcd.clear();
}
```

Módulo leitor de cartão SD

```
#include <Wire.h>
#include <LCD.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#define I2C_ADDR 0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR,2, 1, 0,
4, 5, 6, 7);
#include <SD.h>
File myFile;
const int chipSelect=10;
int dat1=A0;
int dat2=A1;
int data1=0;
int data2=0;
int i=0;
boolean present=0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(dat1,INPUT);
  pinMode(dat2,INPUT);
  lcd.begin(16,2);// lcd.begin(20,4);
  lcd.setBacklightPin(3,POSITIVE);
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.clear();
  lcd.home();
  checkSD();
  // Write label Excel
  myFile = SD.open("datalog.csv",
FILE_WRITE);
  if(myFile)
  {
    myFile.print("line");
    myFile.print(",");
    myFile.print("data1");
    myFile.print(",");
    myFile.println("data2");
    myFile.close();
  }
}
void loop()
{
```

```
  Serial.print("testando arquivo.txt...");
  if(present==1)
  {
    lcd.clear();
    i++;
    data1=analogRead(dat1);
    data2=analogRead(dat2);
    lcd.home();
    lcd.print("Val1 : ");
    lcd.print(data1);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Val2 : ");
    lcd.print(data2);
    writeSD();
  }
  delay(200);
}
void checkSD()
{
  lcd.print("AVALIANDO SD");
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    lcd.clear();
    lcd.print("SD card...erro");
    return;
  }
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("SD card OK");
  present=1;
  delay(2000);
}
void writeSD()
{
  myFile = SD.open("datalog.csv",
FILE_WRITE);
  if(myFile)
  {
    myFile.print(i);
    myFile.print(",");
    myFile.print(data1);
    myFile.print(",");
    myFile.println(data2);
    myFile.close();
  }
}
```