

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE
MOVIMENTOS INTEGRADO COM UM *SOFTWARE* DE
MODELAGEM E SIMULAÇÃO HUMANA**

SÃO CARLOS - SP

2014

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE
MOVIMENTOS INTEGRADO COM UM *SOFTWARE* DE
MODELAGEM E SIMULAÇÃO HUMANA**

WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE
MOVIMENTOS INTEGRADO COM UM *SOFTWARE* DE
MODELAGEM E SIMULAÇÃO HUMANA**

Dissertação de mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte do requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Luiz Menegon

SÃO CARLOS - SP

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

S237at

Santos, William Rodrigues dos.

Análise técnica de um sistema de captura de movimentos integrado com um software de modelagem e simulação humana / William Rodrigues dos Santos. -- São Carlos : UFSCar, 2014.
136 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Ergonomia. 2. Modelagem de ambientes virtuais. 3. Sistemas de captura de movimentos. 4. Manequins digitais.
I. Título.

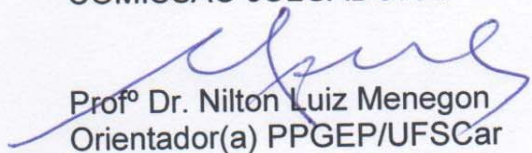
CDD: 658.542 (20^a)

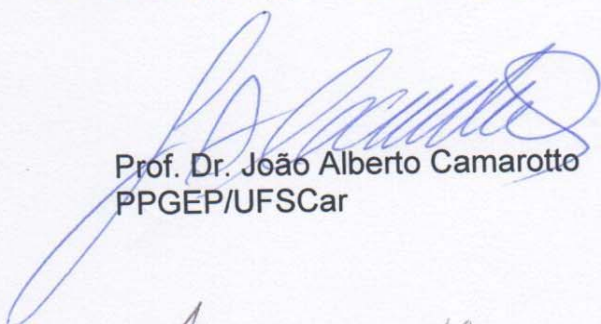


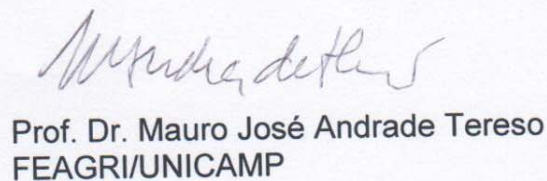
FOLHA DE APROVAÇÃO

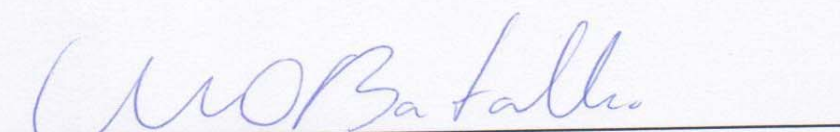
Aluno(a): William Rodrigues dos Santos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 17/02/2014 PELA
COMISSÃO JULGADORA:


Prof. Dr. Nilton Luiz Menegon
Orientador(a) PPGE/UFSCar


Prof. Dr. João Alberto Camarotto
PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Mauro José Andrade Tereso
FEAGRI/UNICAMP


Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE/UFSCar

Com amor, carinho e admiração

*à toda minha família,
em especial aos meus pais,
à Maria Fernanda e Icaro Gabriel,
pelo amor e apoio.*

AGRADECIMENTOS

Em poucas linhas, escrevo singelos agradecimentos às pessoas importantes no caminho de desenvolvimento deste trabalho.

Agradecimento, louvor e graças a Deus pela vida e oportunidades maravilhosas durante sua passagem.

Ao SimuCAD e aos professores, Menegon, Mian, Camarotto por proporcionar aprendizados e experiência para atuação profissional.

Ao meu orientador Menegon pela confiança no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos, em especial aqueles que me apoiaram emocional e operacionalmente: os professores Daniel Braatz e Luiz Tonin, aqueles que dedicaram parte do seu tempo para me ajudar na coleta de dados: Esdras Paraviso, Carlos Iwasaki, Giovanna Lessi e todos aqueles amigos do SimuCAD que contribuíram para modelagem do cenário explorado. **Muito obrigado!**

Aos meus pais, Silvania e Valdir, pela educação, valores ensinados e, acima de tudo, pela esperança de vida e carinho demonstrados no momento mais difícil da minha vida.

À toda minha família, avôs, avós, tios, tias, primos, aos meus irmãos, Rafael e Fernando, que todos nos unem em família, e me apoiam.

Por fim, um agradecimento mais que especial: a minha sogra, que junto a Deus, intercede por todos em minha casa, à minha esposa Maria Fernanda, pelo carinho e compreensão dos momentos de ausência, ao meu filho Icaro Gabriel, pela não compreensão desses momentos e, ao meu cachorro Duque, pela companhia durante as madrugadas e por nunca ter comido nenhum rascunho impresso.

RESUMO

A tecnologia de Captura de Movimentos é considerada potencial para superar as limitações da simulação humana tradicional, reduzindo o tempo despendido na criação de simulações e atribuindo maior realidade aos movimentos simulados. Esta pesquisa apresenta uma análise de um sistema técnico, formado pela integração de um Sistema de Captura de Movimentos com um *software* de modelagem e simulação humana, visando estabelecer formas de utilização do sistema no processo de projetos, contextualizados pela ergonomia. São analisadas diferentes configurações das principais etapas do processo de integração do Sistema de Captura de Movimentos Moven (Xsens), integrado com *software* CAD DELMIA (Dassault Systèmes), que possui um módulo de simulação humana (Human Builder), através de ensaios experimentais. Foram definidos quatro ensaios com delineamento fatorial para testar a combinação das diferentes configurações possíveis do sistema: i) posicionamento espacial de ambientes virtuais, ii) mitigação do *drift*, iii) cinemática do manequim digital e iv) compatibilidade antropométrica. A partir dos resultados obtidos em cada ensaio foram construídos procedimentos operacionais de configuração do sistema integrado, para equacionar as limitações e problemas de utilização destas tecnologias integradas. Os procedimentos mostram como configurar o sistema integrado, para posicionar um ambiente virtual em um sistema de coordenadas CAD conhecido, que possibilita a correção do posicionamento, devido ao *drift* do sistema de captura. Também foram criados procedimentos que relacionam as interações possíveis, entre o corpo de captura e o ambiente de trabalho, com as características da atividade e os objetivos da simulação. Além disso, foi elaborada uma sistemática iterativa para compatibilizar a antropometria entre o ser humano real, *avatar* do sistema de captura e o manequim digital. O desenvolvimento de formas de uso destas tecnologias proporciona melhoria das técnicas utilizadas para construção das simulações com manequins digitais, contribuindo para inserção da perspectiva da atividade futura no projeto das novas instalações.

Palavras-chave: ergonomia, modelagem de ambientes virtuais, sistemas de captura de movimentos, manequins digitais.

ABSTRACT

The Motion Capture technology is considered a potential to overcome the limitations of traditional human simulation, reducing the time spent on creating and assigning greater reality simulations the simulated movements. This research presents an analysis of a technical system, formed by integrating a Motion Capture System with a human model and simulation software, aiming to establish ways to use the system in project process, contextualized by ergonomics. Different configurations of the main steps of the integration of the Motion Capture System Moven (Xsens), integrated with CAD DELMIA (Dassault Systèmes) software, which has a module of human simulation (Human Builder), through four experimental tests. Four trials were defined with factorial design to test the combination of different possible system configurations: i) spatial positioning of virtual environments, ii) mitigation of drift, iii) digital human kinematics and iv) anthropometric compatibility. From the results obtained in each test operating procedures were constructed in order to solve the problems and limitations of using these integrated technologies. The following procedures show how to configure the integrated system for positioning a virtual environment in a CAD system known coordinates, which enables the correction of the position due to drift of the capture system. Procedures that relate to the possible interactions between the body and capture the workplace, with the characteristics of the activity and the objectives of the simulation were also created. In addition, it was elaborated a systematic iterative to match the anthropometry between real human being, avatar of the capture system and digital human. The development of ways to use these technologies provides improvement of techniques used to construct the simulation, contributing to integration the perspective of future activity in the design in the design of productive situations.

Keywords: *ergonomics, modeling virtual environments, motion capture systems, digital human model.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Articulação metodológica para processos de projeto de ergonomia	27
Figura 2-2: Representação de modelos em <i>wireframe</i>	31
Figura 2-3: Modelagem de sólidos CSG	31
Figura 2-4: Exemplo de modelagem por varredura.....	32
Figura 2-5: Modelagem por superfície utilizando curva NURBS.....	32
Figura 2-6: Translação de objetos em 3D.....	33
Figura 2-7: Esquema de funcionamento de projeções.....	35
Figura 2-8 - Classificação dos modelos de simulação humana computacional	36
Figura 2-9: Movimentos do corpo humano em um sistema de eixos.....	37
Figura 2-10: Representação do esqueleto humano em manequins digitais.....	39
Figura 2-11: Exemplos de interações com manequins digitais	41
Figura 2-12: Exemplo sistema MoCap eletromecânico	44
Figura 2-13: Funcionamento sistema de MoCap com tecnologia magnética.....	45
Figura 2-14: Esquema posicionamento de câmeras em um sistema de MoCap ótico.....	47
Figura 2-15: Marcadores de um sistema de MoCap ótico.....	47
Figura 2-16: Funcionamento do Kinect.....	48
Figura 2-17: Captura de movimentos com iPi Motion Capture	49
Figura 2-18: Sensor inercial mecânico	50
Figura 2-19: Diagrama de funcionamento de sensor inercial do tipo <i>strapdown</i>	51
Figura 2-20: Sistema de referência de navegação e de aplicações clínicas.....	51
Figura 2-21: Efeito dos erros (<i>drift</i>) ao longo da captura	52
Figura 2-22: Estrutura do filtro de <i>Kalman</i>	53
Figura 2-23: Técnica do ponto de contato para correção dados de captura	53
Figura 2-24: Processo de <i>retargeting</i> de arquivo C3D	55
Figura 2-25: Processo de <i>retargeting</i> de arquivos BVH	56

Figura 3-1: Edição de medidas antropométricas	61
Figura 3-2: Estrutura do manequim do Human Builder	62
Figura 3-3: Utilização de cinemática inversa no HB2.....	62
Figura 3-4: Bibliotecas de posturas no HB2.....	63
Figura 3-5: Configuração do <i>suit</i>	65
Figura 3-6: Processo de <i>setup</i> do sistema de MoCap	65
Figura 3-7: Estruturas do <i>avatar</i> do MVN	66
Figura 3-8: Posições de calibração	67
Figura 3-9: Processo de calibração dos marcadores.....	68
Figura 3-10: Presença de materiais ferromagnéticos na etapa de calibração	68
Figura 3-11: Origem do MVN Studio	69
Figura 3-12: Etapas de integração do sistema no <i>plugin</i> RTI e DELMIA	70
Figura 3-13: Processo de integração do MVN com DELMIA.....	71
Figura 3-14: Prédio PSPLab modelado em ambiente virtual	73
Figura 3-15: Sistema de coordenadas para movimentação do corpo de captura (sistema R) ..	74
Figura 3-16: Sistema de coordenadas para movimentação do avatar do MVN Studio (sistema MVN)	74
Figura 3-17: Sistema de coordenadas para movimentação no ambiente virtual (sistema V)...	74
Figura 3-18: Trajeto desenvolvido pelo corpo de captura durante o ensaio.....	77
Figura 4-1: Diferença de movimentação do avatar com a calibração do cenário.....	86
Figura 4-2: Origem dos dados provenientes do MVN	87
Figura 4-3: Origem dos dados do MVN utilizando manequim como base.....	87
Figura 4-4: Origem dos dados do MVN utilizando o <i>carpete mágico</i>	88
Figura 4-5: Movimentação calibrando o cenário e configuração padrão RTI.....	89
Figura 4-6: Correção para sobreposição dos eixos coordenados.....	90
Figura 4-7: Movimentação do avatar do MVN e do Human no mesmo sistema de coordenadas	91
Figura 4-8: Relação entre o eixo x dos dois sistemas de coordenadas	91

Figura 4-9: Regra da mão direita para eixos coordenados	92
Figura 4-10: Movimentação do avatar do MVN e do Human no sistema de coordenadas da Terra	93
Figura 4-11: Relação entre sistema de coordenadas da Terra e sistema de coordenadas Virtual	94
Figura 4-12: Correção do sistema de coordenadas da Terra com o Virtual	94
Figura 4-13: Movimentação calibrando o cenário e utilizando “carpete mágico”	95
Figura 4-14: Movimentação não calibrando o cenário e utilizando carpete mágico.....	95
Figura 4-15: Movimentação não calibrando o cenário e configuração padrão RTI.....	96
Figura 4-16: Erros de captura ao longo das 7 voltas para cada modo magnetômetro.....	98
Figura 4-17: Resultados do ensaio realizando tratamento dos dados para as configurações dos magnetômetros	99
Figura 4-18: Erros de captura ao longo das 7 voltas com a reinicialização dos sensores	100
Figura 4-19: Resultados cinemáticos para os cenários padrão, piso flexível e vários níveis com corpo de captura andando	103
Figura 4-20: Resultados cinemáticos para os cenários pélvis fixa e pélvis fixa apertada, com corpo de captura andando	104
Figura 4-21: Cinemática para os cenários, padrão, piso flexível e vários níveis, com corpo de captura sentado	104
Figura 4-22: Resultado cinemático dos cenários com pélvis fixa para corpo de captura sentado	105
Figura 4-23: Cinemática do Human com o cenário vários níveis	106
Figura 4-24: Resultados cinemáticos de diferentes cenários com atividade de movimentar-se em escada.....	107
Figura 4-25: Desvios em diferentes posturas do protocolo	111
Figura 4-26: Pequena diferença observada entre posturas semelhantes.....	113
Figura 4-27: Diferença de alcance para dois percentis.....	120
Figura 5-1: Modelo de transformação de sistemas técnicos.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1: Problemas de pesquisa e variáveis experimentais.....	72
Quadro 3-2: Delineamento fatorial para posicionamento espacial em ambiente virtual.....	75
Quadro 3-3: Delineamento fatorial para mitigação do <i>drift</i>	76
Quadro 3-4: Delineamento fatorial para cinemática do Human.....	78
Quadro 4-1: Comparação do <i>drift</i> para os três modos dos magnetômetros	101
Quadro 4-2: Resultados do <i>drift</i> com tratamento dos dados	101
Quadro 4-3: Resultado do <i>drift</i> gerado com a reinicialização do sensores	102
Quadro 4-4: Cinemática dos avatar do MVN para cada tipo de cenário.....	108
Quadro 4-5: Resultados obtidos utilizando as medidas antropométricas obtidas com sistema de MoCap	109
Quadro 4-6: Resultados obtidos utilizando as medidas antropométricas obtidas com trena..	110
Quadro 4-7: Procedimentos operacionais para posicionamento espacial de ambientes virtuais	115
Quadro 4-8: Procedimentos para configuração dos magnetômetros.....	116
Quadro 4-9: Escolha do cenário com base no tipo de interação desejado.....	118
Quadro 4-10: Procedimentos operacionais para compatibilização antropométrica	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AET	Análise Ergonômica do Trabalho
BVH	<i>Biovision Hierarchy Animation</i> -extensão de arquivo de captura de movimentos
C3D	<i>Coordinate 3D</i> - extensão de arquivo de captura de movimentos
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Ergonomics</i> ou <i>Computer Aided Engineer</i>
CSG	<i>Constructive Solid Geometry</i>
CSV	<i>Comma Separated Values</i> - extensão de arquivo
DEP	Departamento de Engenharia de Produção
DHM	<i>Digital Human Model</i>
DHMS	<i>Digital Human Model and Simulation</i>
FAI	Fundação de Apoio Institucional ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
IMUs	<i>Inertial Measurement Units</i>
IV	Infravermelho
KiC	<i>Kinematic Coupling Algorithm</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MoCAP	<i>Motion Capture</i>
MVN	<i>Moven</i> - Sistema de Captura de Movimentos Inercial
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health - EUA</i>
NURBS	<i>Non Uniform Rational Basis Spline</i>
OWAS	<i>Ovako Working Posture Analysing System</i>
PSPLab	Laboratório de Ergonomia, Simulação e Projeto de Situações Produtivas
RGBD	<i>Red-Green-Blue+Depth</i>
RTI	<i>Real Time Interaction for Delmia</i>
RULA	<i>Rapid Upper Limb Assessment</i>
SimuCAD	Grupo de Pesquisa Simulação & CAD
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
XKF-3	<i>Xsens Kalman Filter</i> -tecnologia de processamento dos dados dos sensores inerciais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Antecedentes da pesquisa	16
1.2	Problema e questões para pesquisa.....	17
1.3	Justificativa e objetivos de pesquisa.....	19
1.4	Aspectos metodológicos	20
1.5	Estrutura do trabalho	23
1.6	Definições.....	23
2	REFERENCIAIS TEÓRICOS.....	24
2.1	Ergonomia de concepção: conceitos, métodos e abordagens	24
2.1.1	Conceitos.....	24
2.1.2	Métodos e abordagens.....	26
2.2	Modelagem e simulação humana	30
2.2.1	Ambientes CAD	30
2.2.1.1	Sistemas de projeção e vistas.....	34
2.2.2	Manequins digitais	35
2.2.3	Biomecânica e antropometria.....	37
2.2.3.1	Modelagem e antropometria dos DHMs.....	39
2.2.4	Interação dos manequins digitais com o ambiente CAD	40
2.2.5	Técnicas de simulação dos movimentos humanos com DHM	42
2.3	Sistemas de Captura de Movimentos	43
2.3.1	Sistemas de MoCap eletromecânicos.....	44
2.3.2	Sistemas de MoCap magnéticos	45
2.3.3	Sistemas de MoCap óticos	46
2.3.4	Sistemas de MoCap <i>markerless</i>	48
2.3.5	Sistemas de MoCap inercial.....	49

2.3.6 Resultados da captura de movimentos	54
2.4 Conclusão a partir dos referenciais teóricos	57
3 METODOLOGIA	59
3.1 Introdução.....	59
3.2 Materiais	59
3.2.1 <i>Hardware e software</i>	59
3.2.2 <i>Software Human Builder (DELMIA)</i>	60
3.2.3 Processo de integração do sistema	64
3.3 Delineamento experimental.....	72
3.3.1 Variáveis de pesquisa.....	72
3.3.2 Metodologia dos ensaios	73
3.3.2.1 Ensaio 1: posicionamento espacial de ambiente virtual	74
3.3.2.2 Ensaio 2: mitigação do drift.....	75
3.3.2.3 Ensaio 3: cinemática do manequim digital	77
3.3.2.4 Ensaio 4: compatibilidade antropométrica	79
3.3.3 Considerações sobre os ensaios	84
4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS	86
4.1 Posicionamento espacial de ambientes virtuais.....	86
4.1.1 Configuração do MVN.....	86
4.1.1.1 Calibração do cenário	86
4.1.2 Configurações do RTI.....	87
4.1.2.1 Configuração padrão.....	87
4.1.2.2 Manequim como base	87
4.1.2.3 Carpete Mágico.....	88
4.1.3 Combinação de configurações	89
4.1.3.1 Configuração padrão RTI e com calibração do cenário	89
4.1.3.2 Utilizando manequim como base e calibrando a cenário	90

4.1.3.3 Utilizando o manequim como base e não calibrando a cenário.....	92
4.1.3.4 Calibrando o cenário e utilizando “carpete mágico”	95
4.1.3.5 Não calibrando o cenário e utilizando “carpete mágico”	95
4.1.3.6 Não calibrando o cenário e configuração padrão RTI	96
4.1.4 Análise ensaio de posicionamento espacial de ambientes virtuais	96
4.2 Mitigação do <i>drift</i>	97
4.2.1 Modo dos magnetômetros	97
4.2.2 Tratamento dos dados de captura	99
4.2.3 Reinicialização dos sensores	100
4.2.4 Análise ensaio de mitigação do <i>drift</i>	101
4.3 Cinemática do manequim digital	103
4.3.1 Corpo de captura andando	103
4.3.2 Corpo de captura movimentando as pernas	104
4.3.3 Corpo de captura movimentando-se em escada	105
4.3.4 Análise ensaio de cinemática manequim digital	107
4.4 Compatibilidade antropométrica	108
4.4.1 Compatibilidade antropométrica utilizando sistema de MoCap	109
4.4.2 Compatibilidade antropométrica utilizando trena	109
4.4.3 Desvios posturais	111
4.4.4 Análise ensaio de compatibilidade antropométrica	112
4.5 Sistematização do sistema integrado	114
4.5.1 Posicionamento espacial de ambiente virtual	114
4.5.2 Qualidade dos dados capturados	115
4.5.3 Cinemática manequim digital	117
4.5.4 Compatibilidade antropométrica	118
4.6 Considerações finais sobre os resultados experimentais	121

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
5.1	Reflexão sobre o problema e questões de pesquisa.....	123
5.2	Conclusões acerca dos objetivos de pesquisa.....	125
5.3	Contribuições do sistema integrado para o projeto de situações produtivas	126
5.4	Limitações tecnológicas e dificuldades operacionais.....	127
5.5	Continuidades da pesquisa	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	APÊNDICE A – Descrição medidas antropométricas do MVN	135
	APÊNDICE B – Dimensões corporais funcionais no ambiente virtual	136

1 INTRODUÇÃO

1.1 Antecedentes da pesquisa

As aplicações com modelagem e simulação de manequins digitais foram introduzidas na indústria como ferramenta para facilitar processos de projetos industriais, acelerando seu desenvolvimento e eficiência em custos (Lämkkull, Hanson, & Örtengren, 2009). Diversos autores afirmam a ferramenta como uma forma de integrar e analisar os aspectos de ergonomia possíveis de estarem presentes na atividade futura de trabalho, em fases iniciais da concepção (BRAATZ et al., 2012; MAGISTRIS et al., 2013; KANG et al., 2012).

Os sistemas de *Motion Capture* (MoCap) ou captura de movimentos, são considerados como tecnologia potencial para complementar os *softwares* de modelagem e simulação humana, na superação dos problemas de posicionamento dos manequins digitais de forma manual, utilizando-se “mouse e teclado” (MENEGON, BRAATZ e TONIN, 2011; SUNDIN e ÖRTENGREN, 2006). Estes sistemas permitem gravar, editar e reproduzir os movimentos humanos reais, através de *avatars* ou manequins digitais em ambientes virtuais.

A captura de movimentos já é largamente utilizada na indústria cinematográfica e no desenvolvimento de jogos digitais, com o objetivo de proporcionar maior realidade aos personagens e ao mesmo tempo reduzir o tempo de criação, edição e processamento dos movimentos em *softwares* de animação digital. Exemplos recentes são: o filme Planeta dos Macacos, que utilizou tecnologia de MoCap para capturar movimentos do corpo e do rosto humano para atribuir à animais e, o jogo digital FIFA 14, que capturou os movimentos de um jogador de futebol real (condução de bola, passes e dribles) para atribuir ao seu avatar dentro do *game*. Essa difusão é facilitada pelas características de tais indústrias, que possuem laboratórios e estúdios com condições controladas para utilização dos sistemas. Além disso, existem diversos *softwares* comerciais que permitem editar os dados capturados.

No contexto industrial a utilização dos sistemas de MoCap ainda é um desafio. As condições do ambiente de trabalho (iluminação, temperatura, materiais e outros) e as características das operações de trabalho realizadas limitam a qualidade dos movimentos capturados e o espaço (volume) disponível para a captura. Outro aspecto limitador é a falta de interação dos dados capturados com *softwares* de projeto, como os *Computer Aided Design* (CAD) e os *Digital Human Models and Simulation* (DHMS), utilizados para modelagem e simulação no desenvolvimento de projetos industriais.

Buscando uma solução para este problema, Wu et al. (2010) realizaram uma pesquisa técnica, com sistemas de captura de movimentos comerciais que utilizam diferentes tecnologias, comparando-os em quatro critérios: i) interação com software de modelagem e simulação humana, ii) liberdade de movimentos, iii) flexibilidade do ambiente de uso e iv) custo. Os resultados desta comparação apontaram para testes reais com dois sistemas de MoCap, o Moven (tecnologia inercial) e o iPi DMC (sem marcadores), para avaliar a integração de cada sistema com diferentes softwares de modelagem e simulação humana. Os resultados mostraram que o Moven possui integração com três *softwares*, Jack (Siemens), CATIA e DELMIA (Dassault Systèmes), pelo desenvolvimento recente de *plugins* específicos. Já o iPi DMC não possui integração direta com nenhum *software*, sendo necessários procedimentos para exportação/importação dos arquivos de captura.

A conclusão da pesquisa indicou para o sistema de MoCap Moven integrado com o software CAD DELMIA como possível solução para o problema de integração com *software* de manequins digitais. A escolha deste *software* especificamente, devido ao contexto e aplicações no qual a pesquisa ocorreu.

Entretanto, mesmo com a integração, novas dificuldades surgem com o uso desses sistemas, podendo-se citar como dificuldades relativas à correspondência antropométrica entre o corpo de captura e o manequim virtual, o posicionamento dos marcadores e as necessidades de calibração que em geral podem gerar desvios na representação do movimento em ambiente virtual (WU et al., 2010).

1.2 Problema e questões para pesquisa

Pela constatação da utilização de ferramentas de modelagem e simulação humana em projetos de concepção, como forma de melhorar o desempenho de projeto e, pela necessidade de melhorar a inserção da perspectiva do trabalho, materializada nos manequins digitais, é necessário compreender **como um sistema de captura de movimentos integrado com um *software* de modelagem e simulação humana pode ser utilizado para analisar as questões de ergonomia em ambientes virtuais?**

O objeto de pesquisa envolve um conjunto de *hardware e software*, constituídos de diferentes tecnologias computacionais utilizadas de em conjunto para a criação de ambientes virtuais em *software* CAD. Para esta pesquisa foi definido explorar a utilização do sistema de captura de movimentos que utiliza tecnologia inercial Moven (Xsens), integrado com módulo de manequins digitais Human Builder do *software* DELMIA

(Dassault Systèmes), através do *plugin* RTI Delmia (Haption). O estudo visa compreender o funcionamento de tais tecnologias isoladamente e combinadas formando um processo de integração, que se inicia com a tarefa de capturar movimentos de um humano real, até a atribuição destes movimentos a um manequim digital. Este processo possui uma série de procedimentos e operações nas diferentes tecnologias.

O resultado desejado para este processo é um ambiente virtual onde possam ser realizadas interações do manequim digital com ambiente, como realizar atividades andando, correndo, em posição sentada, subir/descer obstáculos, além de possibilitar análises ergonômicas. Portanto é necessário conhecer **quais as possibilidades de interação em ambientes virtuais?**

O sistema é formado por três ferramentas que funcionam isoladamente ou integradas. O efeito de cada configuração resulta em diferentes resultados na simulação. Neste ponto três aspectos relacionados com *software* de modelagem e simulação humana e um com relação ao sistema de MoCap. Com relação ao *software* de modelagem e simulação humana são importantes destacar: o posicionamento espacial do manequim digital no ambiente virtual, a cinemática dos movimentos e a antropometria. O quarto aspecto é referente à qualidade dos dados capturados no sistema de MoCap, que influenciam diretamente o resultado da simulação integrada.

O sistema de MoCap inercial desta pesquisa não possui sistemas de coordenadas absolutas, sendo referenciados pelo sistema de coordenadas da Terra, dificultando o *posicionamento espacial de objetos modelados para interação no ambiente virtual*, sendo necessário investigar **quais as possibilidades para posicionar um ambiente virtual?** Outro problema causado pela ausência de sistema de coordenadas absoluto, é a necessidade de manter segmentos fixos do *avatar* do Moven, como ponto de referência para reprodução dos movimentos capturados, influenciando na *cinemática do manequim do Human Builder (DELMIA)*. Logo, é necessário determinar **quais as restrições de movimentos colocadas pelo sistema?**

A qualidade dos movimentos capturados é um dos aspectos mais importantes para possibilitar o uso do sistema integrado. Existem diversas tecnologias utilizadas nos sistemas de MoCap. É possível destacar cinco tecnologias de sistemas de MoCap: eletromecânico, magnético, ótico, *markerless* e inercial. Cada tecnologia possui diferentes características, processos e limitações para realizar a captura dos movimentos. O sistema de Moven (Xsens) utiliza sensores inerciais, com giroscópio e acelerômetro, para rastrear o posicionamento do objeto capturado. Também é possível utilizar magnetômetros para

diminuir os erros da tecnologia inercial tradicional. Este conjunto de dispositivos podem causar *erros nos dados capturados*, diminuindo a acurácia dos movimentos capturados com relação aos movimentos reais. Portanto, é necessário entender **como estes dispositivos podem afetar a qualidade dos movimentos capturados?**

Com relação à antropometria, o processo de integração envolve três “atores” que possuem lógicas de funcionamento e medidas antropométricas diferentes: i) o ser humano real, que utiliza os sensores do sistema de MoCap, ii) o *avatar* criado no *software* de MoCap para representar o humano real e iii) o manequim digital criado no Human Builder (DELMIA). Isto demanda investigar **como compatibilizar as medidas antropométricas entre os diferentes atores envolvidos?**

Para aprofundar na investigação destas questões, é necessário recortar as tecnologias que formam o sistema integrado, em suas diferentes características técnicas e operacionais, analisando-se as configurações existentes e o efeito combinando destas nos resultados da simulação.

1.3 Justificativa e objetivos de pesquisa

A principal funcionalidade na simulação com manequins digitais é o posicionamento do manequim nas posturas de trabalho assumidas pelos operadores (ZIOLEK & KRUITHOF, 2000). No entanto, a postura final obtida pelo usuário do *software* é resultado de uma representação de como será realizado o trabalho (BRAATZ et al., 2012; ZÜLCH, 2012). Em contrapartida, as posturas adotadas em situações reais de trabalho são uma forma encontrada pelo operador em dispor seu corpo no espaço, frente às exigências da tarefa, que são resultantes da organização dos postos de trabalho, dos equipamentos e das ferramentas a serem utilizadas e as exigências de ritmo de trabalho, colocadas pela organização (ABRAHÃO et al., 2009).

Diversos autores propõem abordagens de concepção contextualizadas pela ergonomia e argumentam sobre a necessidade de técnicas e ferramentas para inserir os aspectos relacionados à atividade de trabalho (DANIELLOU, 2002; GARRIGOU, 2001; MENEGON, 2008). Para Folcher (2003) encontrar soluções operacionais é um dos maiores desafios no desenvolvimento de metodologias antropocentradas.

Neste contexto, a pesquisa sobre a integração de um conjunto de tecnologias, voltada para construção de ambientes virtuais para projeto e análise de ergonômicas com manequins digitais justifica-se: i) pelo aperfeiçoamento na utilização das ferramentas de

modelagem e simulação humana, ii) pelo conhecimento das limitações de utilização da tecnologia em ambientes reais de trabalho e iii) das possibilidades de aplicação do sistema integrado em projetos de concepção, contextualizados pela ergonomia.

Com base nas proposições apresentadas, define-se o objetivo geral deste estudo: *explorar as funcionalidades de um sistema integrado MoCap-CAD, visando construir uma análise crítica e comparativa, das diferentes configurações possíveis, para definir sua potencialidade como ferramenta de suporte em projetos de situações produtivas*. De maneira específica, os seguintes objetivos são direcionadores da pesquisa:

- i) disponibilizar conhecimentos sobre um ferramental tecnológico pouco desenvolvido no campo da ergonomia;
- ii) demonstrar as diferentes possibilidades de configuração do sistema, com base nas características da atividade a ser simulada;
- iii) elaborar procedimentos operacionais para utilização do sistema integrado.

1.4 Aspectos metodológicos

Os métodos e técnicas utilizados nesta pesquisa são justificados pela racionalidade técnica de abordagem do objeto de pesquisa. A **Ciência do Design** proposta por HUBKA e EDER (1995) postula que os sistemas técnicos são constituídos por conhecimentos sobre o objeto de projeto e, por conhecimentos sobre o processo de *Designing*, termo definido como verbo, ato (ação) de projetar (tradução para projeção). Cada tipo de conhecimento emerge de teorias específicas que definem, tanto o projeto do objeto como do processo, para apresentar informações que explicam e justificam o objeto técnico real projetado e o processo de concepção. A teoria para definição do objeto surge da combinação entre os fenômenos (físicos, químicos, biológicos) com as interações organizacionais e sociais, para conceber sistemas técnicos, que incorporam conhecimentos científicos e uma série de tecnologias para atender as especificações e necessidades, técnicas e sociais, demandadas por um conjunto de atores sociais. Já o processo advém de teorias sobre o comportamento humano, como psicologia, cognição, criatividade, relacionamento interpessoal, que explicam as ações, resultados e sucessos de transformação das necessidades de entrada para garantir os resultados do objeto em concepção. Os agentes atuantes que deliberam neste processo de transformação estão relacionados com os operadores no contexto sócio técnico que atuam. Conhecimentos sobre os valores e manifestações pessoais de caráter heurístico para que o processo técnico seja capaz de ser operado como esperado.

As informações práticas do sistema técnico são conjunto de conhecimentos específicos sobre o objeto projetado (sistema técnico real) de forma normativa: aplicações pré-determinadas, os elementos que formam o sistema, dimensões, natureza dos materiais e procedimentos de montagem. No quadrante prescritivo do Processo de Design estão as informações sobre procedimentos dos *designers* em tarefas concretas de projeto. Práticas relacionadas com atividade humana com relação ao objeto real relacionados às *estratégias, táticas, métodos aplicados para atender uma necessidade específica de aplicação*, levando-se em consideração aspectos normativos (formais e explícitos) e aspectos da intuição e criatividade (pessoal, informal, implícito e não reconhecidos por outros agentes).

Estabelecendo o conjunto de tecnologias integradas (objeto de pesquisa), como um sistema técnico, esta pesquisa possui a seguinte estrutura:

- **referenciais teóricos** (conhecimento teórico-descritivo): caracterizada pela pesquisa bibliográfica e em dados secundários, contendo a caracterização tecnológica, estrutura e processo de integração do sistema. Para compressão específica dos objeto de pesquisa, foram explorados os materiais disponibilizados pelos fornecedores, bem como informações de reuniões e treinamentos. Este conhecimento foi utilizado para esclarecer o funcionamento do sistema e formar as variáveis a serem analisadas;
- **ensaios com sistema integrado** (conhecimento prático-prescritivo): testes com o sistema para determinar os efeitos de diferentes configurações na realização das simulações. Os ensaios foram realizados observando-se o comportamento de diferentes configurações possíveis do sistema integrado. Estes testes foram abordados de forma analítica, ou seja, para cada ensaio foram definidos objetivos específicos (conforme o problema de pesquisa) ao logo do processo de integração e recortadas as variáveis que influenciam o objetivo. Posteriormente, cada resultado foi sintetizado com as devidas considerações. Com isso, foram elaborados quadros com procedimentos práticos para utilização do sistema para diferentes situações de simulação.

Esta pesquisa possui características experimentais, pois visa estabelecer relações de causa-efeito, entre variáveis independentes e dependentes (BAPTISTA e CAMPOS, 2010). No objeto de pesquisa, as variáveis independentes são as configurações existentes no sistema de MoCap, *plugin* de integração e no *software* DHMS, que afetam diferentes aspectos ao longo do processo de integração (variáveis dependentes). A manipulação das variáveis ocorreu dentro de um laboratório onde as condições ambientais (iluminação, temperatura, calor) não foram controladas. Além disso, não se buscou meios de eliminar o efeito da presença de materiais ferromagnéticos que podem causar erros no

rastreamento dos movimentos pelos sensores inerciais. Com isso esta metodologia possui delineamento definido na literatura como sendo *quase experimental* (BAPTISTA e CAMPOS, 2010). Para evitar confusões com nomenclaturas e facilitar a escrita, será utilizado o termo *ensaio* como sinônimo de *quase experimental*.

O planejamento dos ensaios partiu do processo de integração do sistema, com a descrição das configurações existentes e suas funcionalidades em cada etapa (conforme a documentação das ferramentas e procedimentos exploratórios). Em seguida, as configurações foram tomadas como variáveis independentes e segmentadas conforme suas interações e funcionalidades e classificadas com base nos problemas de pesquisa apresentados na secção 1.2. Os ensaios foram realizados em laboratório, que foi modelado, para representar o ambiente virtual de interação com manequim digital. Para demonstrar os efeitos de combinação das diferentes variáveis foi estipulado um delineamento fatorial. O delineamento fatorial é útil para estudar o efeito isolado de variáveis e descobrir os efeitos de interação entre elas (TURRIONI e MELLO, 2012).

Os resultados desta etapa mostraram os diferentes resultados possíveis de se obter durante a simulação, conforme as escolhas de configurações determinadas pelo usuário do sistema integrado. Foram definidos quatro conjuntos de experimentos: i) posicionamento espacial de ambientes virtuais, ii) gerenciamento do *drift* (erros da captura), iii) cinemática do manequim digital do *Human Builder* e iv) compatibilidade antropométrica entre os manequins do sistema.

A última etapa é a construção dos procedimentos técnicos para diferentes características de simulação. Nesta etapa, os resultados dos diferentes ensaios isolados foram sistematizados para validar diferentes configurações com base nas interações desejadas durante a simulação com o ambiente real. A coleta de dados foi realizada com câmeras fotográficas e filmadoras pra registrar os movimentos e pontos de referência criados no ambiente real do laboratório. No ambiente virtual, foram geradas imagens das telas dos *softwares*.

Desta forma, esta pesquisa é definida como de natureza aplicada, por gerar conhecimentos voltados à aplicação. Do ponto de vista da abordagem ela é quantitativa, devido aos aspectos objetivos, analíticos e relacionais dos fatores que configuram o sistema integrado. Por fim, quanto aos objetivos, a pesquisa é descritiva, envolvendo levantamento bibliográfico dos fundamentos que circundam o problema de pesquisa e, procedimentos experimentais para emergir métodos de aplicar o sistema integrado em processos de projeto.

1.5 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. No capítulo 1 é introduzido o problema de pesquisa, juntamente com seu contexto e uma breve descrição dos procedimentos metodológicos. No capítulo 2 são apresentados os referenciais teóricos que embasam as questões de pesquisa e os delineamentos tomados para o objeto de pesquisa. No capítulo 3 são discutidos os aspectos relacionados ao método de pesquisa, com uma descrição pormenorizada dos fatores de configuração do sistema integrado e suas possibilidades de interação. Por fim é apresentado o planejamento dos ensaios a serem realizados com o sistema e as variáveis envolvidas em cada um. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com as diferentes configurações do sistema com a discussão e sistematização dos conhecimentos em formato de procedimentos operacionais. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões da pesquisa, suas contribuições, limitações e continuidade.

1.6 Definições

Para proporcionar maior esclarecimento sobre os diferentes “atores” envolvidos nos ensaios e evitar possíveis confusões, nesta pesquisa será adotada os seguintes termos para os diferentes “atores”:

- corpo de captura: é o ator humano real, que utiliza os sensors dos sistemas de MoCap e realiza os movimentos a serem capturados;
- *avatar*: é definido por Badler (1997, p. 6) como sendo um “humano virtual controlado por um participante vivo”. No contexto desta pesquisa, o *avatar* é manequim do *software* do sistema de MoCap, que é controlado pelo corpo de captura (participante “vivo”);
- manequim digital: são os modelos humanos utilizados para análise e desenvolvimento. (ZIOLEK & KRUTHOF, 2000). Estes modelos buscam representar a forma humana de maneira realística com o funcionamento biomecânico do ser humano. Estes são os modelos presentes nos softwares denominados de modelagem e simulação humana (DHMS – Digital Human Model and Simulation).

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

Neste capítulo serão abordados os referenciais conceituais que circundam o objeto de pesquisa. Primeiramente são apresentados os fundamentos sobre ergonomia da atividade e as abordagens da ergonomia que utilizam a simulação como meio de discussão em projetos de situações produtivas e as aplicações com manequins digitais nestes contextos. Tomando como ponto de partida o processo de construção da modelagem e simulação humana, proposto por Ziolk e Kruithof (2000): a interação de manequins digitais em ambientes CAD, são apresentados os referenciais teóricos e tecnológicos que formam esse triângulo (manequim-CAD-interação).

A integração de *softwares* de modelagem e simulação humana, com sistemas de captura de movimentos, demanda a apresentação dos conceitos referentes aos sistemas envolvidos, bem como as tecnologias, existentes e atuais, que são utilizadas. Além disso, deve ser posicionado o contexto no qual o sistema integrado será utilizado para suportar as exigências solicitadas ao sistema. Partindo-se da classificação e descrição dos sistemas de MoCap, é descrito o funcionamento das diferentes tecnologias utilizadas nos sensores para rastrear as posições o objeto capturado. Em especial, é detalhado tecnicamente o funcionamento dos sensores inerciais, complementados com sistemas que utilizam magnetômetros. Para finalizar este tema são apresentados os métodos que possibilitam a interação de manequins digitais com sistemas de captura de movimentos.

2.1 Ergonomia de concepção: conceitos, métodos e abordagens

2.1.1 Conceitos

A ergonomia centrada na atividade ou “ergonomia da atividade” está preocupada na atividade de trabalho e sua análise (DANIELLOU, 2004). Em comparação com a abordagem dos fatores humanos, os elementos que compõem o trabalho não são mais considerados isoladamente, além de considerar a contextualização temporal como fundamental (MONTMOLLIN, 2005).

Os fundamentos que caracterizam a ergonomia da atividade são apresentados por Guérin e Tersac e Maggi: variabilidade dos contextos e indivíduos, distinção entre tarefa e atividade e regulação. Para Guérin et al. (2001) existem duas grandes classificações de **variabilidade**: a primeira relacionada com a variabilidade das empresas; e a segunda da

variabilidade humana. A variabilidade nas empresas são as que ocorrem no contexto do trabalho e estão relacionadas com as questões de produção. Já a variabilidade humana está relacionada com os aspectos individuais os trabalhadores.

A distinção entre tarefa e atividade. A tarefa indica o que o operador deve fazer. Já atividade é a o que operador realmente faz. Tersac e Maggi apresentam sua visão sobre o conceito de tarefa e atividade:

(...) duas perspectivas podem ser evidenciadas desde o início na análise do trabalho: a perspectiva do quê e a do como. O que deve ser feito e como os trabalhadores o fazem? De um lado a perspectiva das exigências da tarefa e, de outro, a das atitudes, das sequencias operacionais pelas quais os indivíduos observados respondem realmente à tarefa” (TERSAC e MAGGI, 2004, p. 92).

O terceiro fundamento é a regulação da atividade. Para Tersac e Maggi (2004, p.70) “Os resultados só podem ser obtidos graças à capacidade de regulação da atividade desenvolvida pelos indivíduos agindo, de um lado, para gerenciar as variações das condições externas e internas da atividade e, por outro lado, para levar em conta os efeitos da atividade”. Esta capacidade de regulação está ligada com dois conceitos: representação mental e competência. O primeiro está relacionado com a capacidade do operador de simular mentalmente o que é necessário mobilizar para atender a tarefa, Guérin et al (2001) apresenta que a representação mental está ligado com a formação e experiência. A competência vai além da experiência e formação do indivíduo, “é o conjunto de conhecimentos, de saber-fazer, de heurísticas, de modelos (esquemas-tipo), ou seja, tudo que permite atingir o resultado sem nova aprendizagem”.

Da preposição apresentada no parágrafo anterior, o autor discute o conceito de modo operatório. Para o autor o modo operatório é um compromisso, do operador, que leva em consideração uma relação entre, os resultados produzidos e o seu estado interno. Neste modelo a regulação ocorre em uma relação onde o operador possui a capacidade de alterar entre os objetivos exigidos e os meios de trabalho. O autor também apresenta o conceito sobre carga de trabalho que está relacionado com “*margem de manobra* da qual dispõe um operador num dado momento para elaborar modos operatórios tendo em vista atingir os objetivos exigidos sem efeitos desfavoráveis sobre seu próprio estado” Guérin et al., 2001 p.67).

Os pressupostos apresentados formam a base de conhecimentos sobre a atividade de trabalho e que serão mobilizados na Análise Ergonômica do Trabalho (AET). Esta metodologia apresenta cinco etapas: (i) análise da demanda e do contexto, (ii) análise do

processo técnico e do ambiente, (iii) análise da tarefa, (iv) diagnóstico e (v) processo de transformação.

A partir da identificação dos determinantes do trabalho (fase de diagnóstico) inicia-se o processo de concepção dos novos dispositivos de trabalho levando em consideração os conhecimentos adquiridos nas análises do trabalho.

2.1.2 Métodos e abordagens

A intervenção ergonômica em projetos de concepção demanda uma dupla construção: social e técnica (DANIELLOU, 2007). O processo de construção social consiste em colocar o ponto de vista do trabalho como fator principal na confrontação entre as diferentes lógicas existentes entre os atores (ergonomistas, projetistas, operadores, gerentes e diretores). Já a construção técnica busca métodos e instrumentos que permitam analisar a atividade futura. Para implementar a Abordagem da Atividade Futura (AAF) no processo de concepção, são realizadas análises de situações de referência. As situações de referência são situações de trabalho já existentes que são próximas dos condicionantes da futura situação de trabalho. O objetivo destas análises são identificar as variabilidades existentes na situação analisada (referência) e que serão características da situação futura (BÉGUIN, 2007). As variabilidades apontadas, nestas análises, são as *situações de ações características* que serão levadas em consideração durante o processo de concepção. Neste ponto é necessária a presença do ergonomista para identificar as situações de ações características e simulação do trabalho futuro. Estas simulações podem ser através de plantas, maquetes, protótipos, *softwares* de simulação e outros. Para realização da simulação Daniellou (2002) pontua que são necessárias três condições:

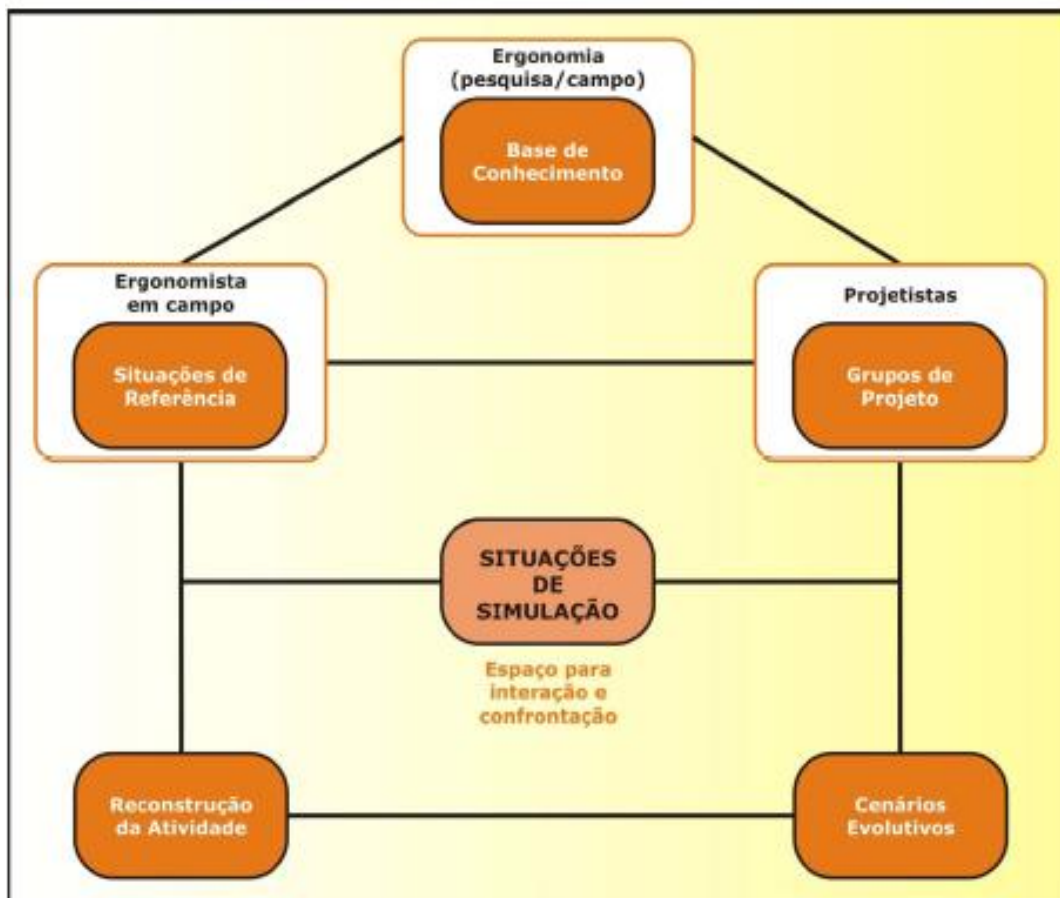
- i) definição das situações de referência;
- ii) que existam formas de representar a futura situação produtiva (plantas, maquete, protótipos, *softwares* de simulação);
- iii) que pessoas com competências semelhantes daquelas que irão operar a futura situação.

As simulações do trabalho futuro possuem o objetivo de avaliar soluções técnicas e organizacionais em fases iniciais do projeto (DANIELLOU, 2013). O mesmo autor aponta especificamente os benefícios da simulação: antever os aspectos físicos (acessos, deslocamentos, esforços físicos e posturas), as necessidades de informações, comunicação e as competências para realização do trabalho (DANIELLOU, 2002). Outros autores, como Garrigou (2001) e Menegon (2008) propõem articulações metodológicas que utilizam a

simulação como meio de confrontação de diferentes abordagens (descendente e ascendente) Garrigou (2001) destaca a abordagem por simulação humana, que utiliza manequins digitais e maquetes virtuais para confrontar tais abordagens. Para o autor a simulação possui objetivo de produzir prognósticos sobre dificuldades que os operadores poderão enfrentar na situação futura.

Na articulação proposta por Menegon (2008) apresentada na Figura 2-1, a *Base de Conhecimento* contém os conhecimentos dos ergonomistas adquiridos durante suas intervenções na indústria. Os *Grupos de Projeto* são os diferentes atores sociais, oriundos de diversas áreas da organização (desde engenheiros, até os operadores). As *Situações de Referência* são os conhecimentos que os ergonomistas possuem de situações existentes e que potencialmente continuarão existindo na situação da futura. A partir destas situações, é realizada a *Reconstrução da Atividade*, buscando recompor suas condicionantes para construção dos *Cenários Evolutivos*, a partir da utilização da simulação humana em cenários digitais. O objetivo da reconstrução da atividade e construção de cenários evolutivos é proporcionar um espaço de discussão entre os atores, ao longo do processo de projeto.

Figura 2-1: Articulação metodológica para processos de projeto de ergonomia



Fonte: Menegon (2008)

Béguin e Duarte (2008) propõem em discutir a inovação como uma necessidade de requalificar as abordagens de concepção. Os autores apresentam três aspectos para entender a dinâmica de concepção:

- i) a *invenção* que surge como ato misterioso, fruto das representações mentais do criador;
- ii) o *desenvolvimento* que é caracterizado como coletivo e social, visando a elaboração e análise de modelos;
- iii) a inovação como um processo de reinterpretação e reconcepção de uma novidade, durante a avaliação de uma nova técnica (artefato, produto, processo) em situações concretas.

Logo a inovação está colocada nas relações de recomposição entre as atividades que ocorrem em diferentes meios de vida e uma novidade técnica, seja esta um novo artefato, um novo processo ou um novo produto. Nesta linha, Béguin (2008) propõe uma abordagem de projeto que seja possível integrar as necessidades dos usuários e projetistas. Segundo ele os usuários (futuros operadores) são fontes de inovação para o projeto, onde a consideração da atividade de trabalho é a forma na qual é possível diminuir as incertezas sobre as soluções apresentadas por projetistas. Essa abordagem é caracterizada como dialógica, que reúne em um mesmo espaço as necessidades dos usuários com as necessidades dos projetistas, permitindo que os “projetistas dialoguem com a situação” na busca de diminuir essas incertezas. O fato dos operadores não utilizarem os dispositivos técnicos como se poderia esperar e que eles os modificam momentaneamente ou permanentemente pode ter diversas origens, baseado nas abordagens existentes em ergonomia de concepção:

- *crystalização*: quando no projeto de um dispositivo técnico, os projetistas usam seu modelo de uso (representações) que são inerentes a cada projetista e os “cristaliza” nos artefatos. Para construir modelos que represente o trabalho futuro o ergonomista utiliza da Análise Ergonômica do Trabalho (AET) ou abordagem por simulação.
- *plasticidade*: a segunda origem da inventividade dos operadores é a variabilidade intrínseca ao trabalho. Os operadores modificam os espaços projetados em face de situação enfrentada. Esta abordagem mostra a limitação da *crystalização*: “a realidade do trabalho sempre ultrapassa o modelo que é construído” (BÉGUIN, 2008, p. 73). A questão é conceber situações de trabalho que possuam margem de manobra quanto as possibilidade de ações dos operadores.
- *desenvolvimento da Atividade*: apresenta crítica às duas abordagens anteriores, justificando que a inventividade dos operadores ocorre devido a causas externas ou por

fontes intrínsecas a atividade. Nesta linha o autor apresenta três ideias. A primeira oriunda da antropologia das técnicas. Todo artefato para ser operado são necessárias maneiras de agir, formas de pensar e valores associados à sua utilização. A segunda é derivada de Schwartz (2004) mostrando que as maneiras de agir dos operadores são oriundas de normas anteriores e valores que são mobilizados durante a ação. A terceira ideia é postulada sobre as gêneses instrumentais. A instrumentalização é definida como:

“uma assimilação do artefato às normas antecedentes, os operadores adaptam, modificam, re-interpretam, até mesmo transformam (temporariamente ou permanentemente) os dispositivos para conformá-los às suas próprias maneiras de pensar e de agir. Os argumentado que a introdução de uma novidade técnica resolve antigos problemas e ao mesmo tempo modifica a natureza da tarefa e cria novos problemas para os quais são necessárias novas formas de ação” (BÉGUIN, 2008. p. 74).

Com os argumentos apresentados, o autor apresenta o modelo dialógico, como uma visão diferente da abordagem clássica da engenharia. Na abordagem clássica a concepção é vista como um processo em que mudanças vão ocorrendo para resolução dos problemas. Já na abordagem dialógica a concepção parece ocorrer sem começo e fim: *“trata-se antes de um processo cíclico, no qual o trabalho de um, projetista ou operador, fecunda o trabalho do outro e no qual a última palavra, não é, provavelmente, jamais pronunciada”* (BÉGUIN, 2008. P. 76). Apoiando a concepção nas “hipóteses instrumentais” são apresentadas três vias de organizar uma concepção dialógica que apresenta diferentes movimentos temporais:

- i) objetivar hipóteses instrumentais dos operadores: nesta primeira via a atividade dos operadores são tomadas como hipótese instrumental, fornecendo informações para atividade dos projetistas;
- ii) conceber as hipóteses instrumentais: o artefato é concebido focando as hipóteses instrumentais, cujas características podem ser modificadas posteriormente. Nesta via a atividade do projetista é temporalmente primeira;
- iii) colocar em ressonância as hipóteses instrumentais dos operadores e dos projetistas durante a concepção: o processo de concepção ocorre de maneira síncrona: a atividade do projetista ocorre ao mesmo tempo em que atividade dos operadores. Nesta via as trocas dialógicas entre projetistas e usuários são motor da concepção.

As abordagens de concepção apresentadas acima são direcionadas para análise do trabalho futuro, necessitando de instrumentos e ferramentas que permitam colocar em prática estas abordagens antropocentradas, como colocado por Daniellou (2002). Na próxima

secção serão introduzidos os conceitos de modelagem e simulação com manequins digitais, juntamente com as técnicas para simulação dos movimentos em ambientes virtuais, visando estabelecer um referencial conceitual sobre o tema.

2.2 Modelagem e simulação humana

Segundo Ziolk e Kruithof (2000) o processo de construção da simulação com manequins digitais, parte da construção de um ambiente em sistemas CAD, representando o espaço de interações, modelagem do manequim que representa o humano e análise deste com os artefatos, sua interação com o ambiente modelado. Os ambientes modelados CAD representam um conjunto de decisões, tomadas pelos projetistas, que levam em consideração aspectos humanos relacionados aos futuros operadores do sistema projetado, para avaliar o desempenho dos ambientes conceituais frente aos objetivos especificados. Logo o encontro do modelo humano com o ambiente conceitual proporciona ao projetista um espaço para visualizar, medir e confrontar variáveis.

Nesta perspectiva, os Manequins Digitais ou DHMs são os mais apropriados para o contexto de desenvolvimento de situações produtivas por possuírem estrutura, funcionamento e aparência semelhante ao ser humano real e, ao mesmo tempo possibilitam a inserção e interação com ambientes modelados CAD. Existem duas denominações para *softwares* CAD que possuem aplicações com manequins digitais: *Computer Aided Ergonomics* ou *Computer Aided Engineer*. Nesta pesquisa, estes *softwares* serão denominados como *softwares de modelagem e simulação humana*.

2.2.1 Ambientes CAD

As possibilidades de modelagem nos sistemas CAD são baseadas em computação gráfica, especificamente na modelagem geométrica (Agoston, 2005). Em modelagem geométrica são utilizados fundamentos e equações matemáticas da geometria analítica para representar elementos geométricos vetoriais. Podemos classificar os tipos de modelos em cinco categorias: modelos bidimensionais, modelos em *wireframe*, modelos de sólidos, modelagem de superfícies e modelagem paramétrica.

Os modelos *bidimensionais* são criados a partir de equações que representam geometrias básicas como ponto, reta, circunferência, arco de circunferência, curva composta, curvas cônicas, elipse, parábola e hipérbole (TOZZI, 1986). Estas equações podem ser

combinadas para criar novas possibilidades de desenho bidimensionais e servem de base para criação de modelos tridimensionais.

Os modelos em *wireframe* são modelos em três dimensões (3D) que utilizam os mesmos elementos geométricos utilizados nos modelos bidimensionais para representar as arestas e os vértices do modelo (Figura 2-2).

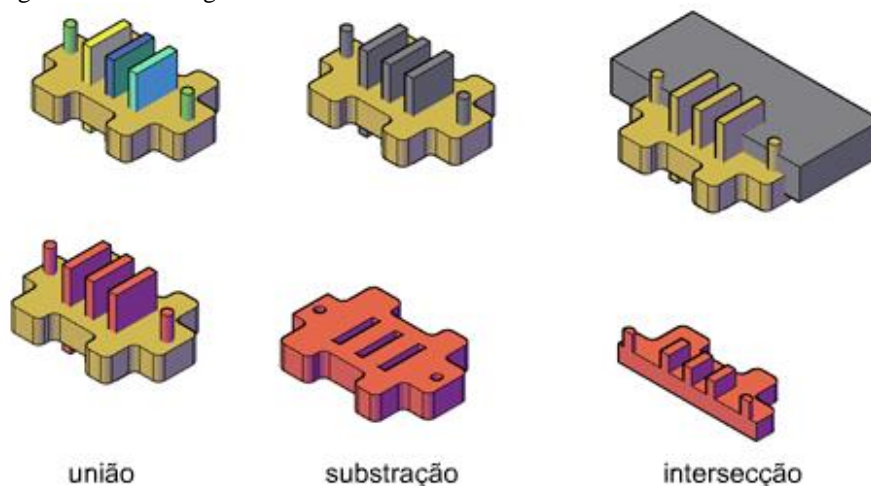
Figura 2-2: Representação de modelos em *wireframe*



Fonte: Leake e Borgerson (2010)

A modelagem de sólidos é realizada a partir de *sólidos* primitivos, como cubo, cilindro, esfera, cone, toro e cunha. Este tipo de modelagem é utilizado para obter objetos com geometrias mais complexa com a utilização de funções *booleanas* (união, subtração e intersecção). Os modelos formados não possuem representação matemática, sendo representados pelos sólidos primitivos que possuem geometria descritível. Este processo de modelagem é chamado de *Constructive Solid Geometry* (CSG). Esta técnica predominante de modelagem no *software* AutoCAD (Autodesk). A Figura 2-3 ilustra a modelagem de sólidos CSG no AutoCAD.

Figura 2-3: Modelagem de sólidos CSG

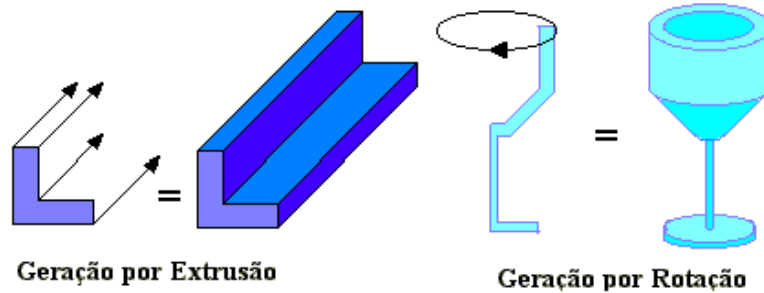


Fonte: Autodesk (2012)

A modelagem de sólidos também pode ser realizada por processo de *sweep* ou “varredura”. Esta técnica consiste em obter um sólido através do deslocamento de um perfil fechado, ao longo de uma trajetória definida (LEAKE e BORGERSO, 2010). Esta trajetória

pode ser: linear, circunferência ou um arco de circunferência com o eixo de revolução; e uma trajetória específica, definida para varredura. Um exemplo de modelagem por varredura é apresentado na Figura 2-4.

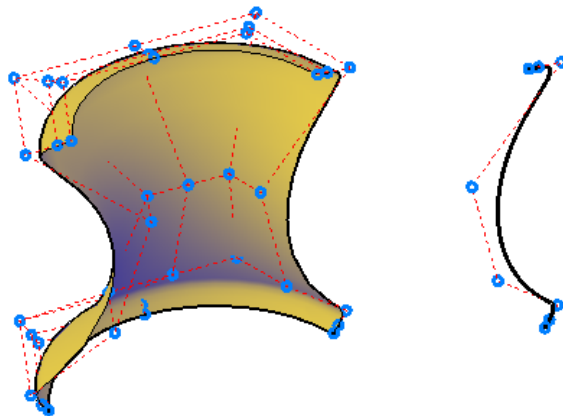
Figura 2-4: Exemplo de modelagem por varredura



Fonte: Pinto (1990)

A criação de modelos a partir de *superfícies* é realizada a partir de curvas chamadas de *spline*. Estas curvas podem ser descritas, matematicamente, por polinômios de terceiro grau para representar as curvas: cúbica, *Bézier*, *B-Spline* e as *B-Spline não uniformes (NURBS)*. As superfícies modeladas possuem um conjunto de pontos (oriundos do polinômio), que formam a curva desejada (malha de pontos). Estes modelos não possuem estrutura sólida, como os modelos apresentados anteriormente. Sua estrutura é formada pela “casca” formada pela superfície (Figura 2-5). Este tipo de modelagem é utilizado em indústrias que trabalham com formas complexas como automobilísticas, aeroespacial, naval, eletroeletrônica e a indústria de jogos e cinema.

Figura 2-5: Modelagem por superfície utilizando curva NURBS



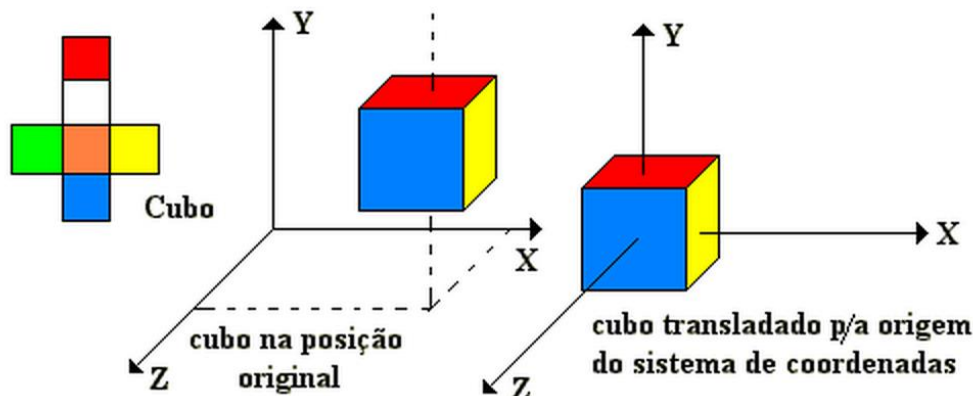
Fonte: Autodesk (2011)

A técnica mais recente de modelagem, presente nos *softwares*, é a *modelagem paramétrica*. Este tipo de modelagem possui modelos que possibilitam rápida mudança das características (parâmetros) que formam o modelo: dimensões, espessuras e raios de curvatura. Os *softwares* CAD atuais apresentam possibilidades de modelagem paramétrica, como o Autodesk Inventor (Autodesk), Solid Works (Dassault Systèmes), Solid Edge (UGS), CATIA/DELMIA (Dassault Systèmes) Pro/ENGINEER (PTC) e o NX (UGS). Esta técnica de modelagem proporciona ao projetista, uma ferramenta iterativa de avaliação de modelos, principalmente quando o objeto CAD final é formado por diferentes desenhos, modelado separadamente, para posteriormente serem reunidos.

Os sistemas CAD possuem uma série de opções de manipulação dos modelos desenhados (mover, rotar, copiar). Estas opções são representadas matematicamente por transformações matriciais de translação, rotação e escalonamento (BESANT, 1986). Estas três transformações são consideradas primitivas. Existem mais opções de manipulação pela combinação das matrizes de transformação. Tozzi (1986) apresenta essas opções como operadores de manipulação, apresentando seis operadores (transladar, rotar, duplicar, escalar, refletir e alongar). Estas opções de manipulação podem ser realizadas em modelos bidimensionais ou em modelos tridimensionais, com a diferença de incluir uma linha adicional na matriz para incluir as transformadas no eixo Z. Desta forma, nesta pesquisa serão descritas as opções primitivas ou principais (mover, rotar e mudar escala) dos *softwares* CAD em 3D e a relação com as transformações geométricas de cada uma.

A opção de mover está relacionada com a transformação de translação. Um objeto pode ser movido (transladado) a partir de um ponto de referência $P(x,y,z)$ para outro local no espaço $P(x',y',z')$, por um vetor que possua a distância e a direção desejada $D(dx, dy, dz)$. A Figura 2-6 mostra o funcionamento da translação.

Figura 2-6: Translação de objetos em 3D



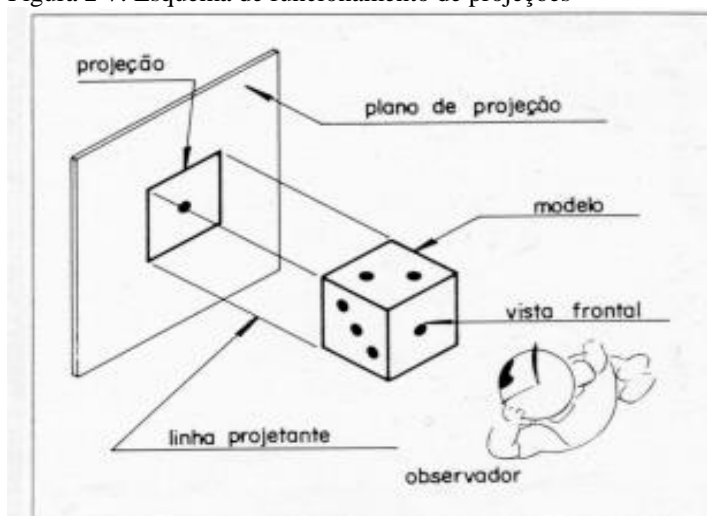
A rotação pode ser realizada em torno de algum dos eixos coordenados (x,y,z). Primeiramente, define-se um ponto no objeto, na qual deseja ser base (pivô), em seguida define-se o eixo de giro e os graus de rotação. Em sistemas 3D é possível realizar rotação a partir de um eixo arbitrário, definido pela combinação em (x,y,z). A

A mudança de escala (ou escalonamento) pode ser realizada de forma independente em cada direção dos eixos coordenados, multiplicando o valor de uma dimensão por um fator (um número escalar), que pode aumentar ou diminuir a dimensão causando distorções no modelo. Este tipo de mudança de escala é denominado de escalonamento diferencial. Existem softwares CAD que não permitem esse tipo de escalonamento, como o AutoCAD (Autodesk). Já o CATIA e DELMIA exigem a escolha do eixo coordenado que será utilizado para escalonamento. A mudança de escala pode ser realizada a partir de um ponto específico, escolhido pelo usuário ou em relação à origem (0,0) do sistema de coordenadas global.

2.2.1.1 Sistemas de projeção e vistas

As projeções compreendem o mapeamento de um espaço tridimensional em um subespaço bidimensional (LEAKE e BORGERSON, 2010). Este mapeamento é realizado pela reprodução de pontos do objeto em 3D em um plano de projeção. Os autores apresentam que toda projeção contém quatro elementos: (i) o objeto tridimensional a ser projetado, (ii) as projetantes (ou linhas) que passam pelos pontos do objeto, (iii) um plano de projeção e (iv) a imagem (projeção) formada no plano de projeção. Tomando como referência a Figura 2-7, a *projeção* é formada plotando os pontos, do *objeto tridimensional*, que possuem intersecção das *projetantes* com o *plano de projeção*. A imagem reproduzida no plano de projeção é, denominada em *softwares CAD*, como uma vista do objeto.

Figura 2-7: Esquema de funcionamento de projeções



Fonte: Adaptado de Rosado (2005)

As projeções podem ser classificadas como projeções perspectivas ou projeções ortogonais paralelas (BESANT, 1986; LEAKE e BORGERSON, 2010). Esta classificação refere-se à posição do observador (centro de projeção), na cena de projeção. Nas projeções perspectivas, as linhas projetantes convergem para um único ponto. Já nas projeções ortogonais o centro de projeção está posicionado em uma distância infinita do objeto em 3D, fazendo com que as projetantes sejam paralelas entre si. As projeções perspectivas possibilitam maior realismo à projeção criada, preservando a forma do objeto, porém causa distorção nas dimensões do objeto. Já as projeções ortogonais são utilizadas em projetos de engenharia, pois mantém a proporção entre as dimensões do desenho (LEAKE e BORGERSON, 2010). *Este tipo de projeção será utilizado na apresentação dos resultados desta pesquisa.*

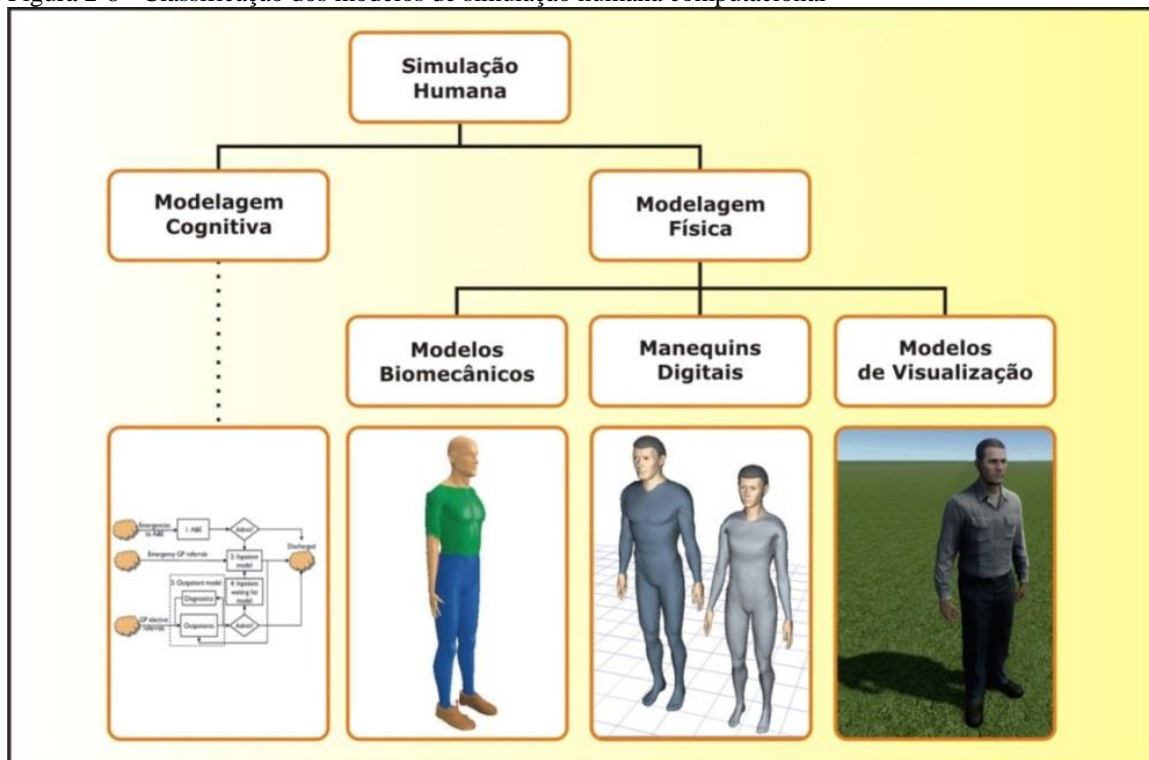
2.2.2 Manequins digitais

Os modelos humanos computacionais (simulação humana) podem ser criados conforme seus objetivos de análise. Menegon, Braatz e Tonin (2011) classificam a modelagem humana computacional como: modelagem cognitiva e modelagem física. A modelagem cognitiva cria modelos que representa os aspectos relacionados com a competência (habilidade, conhecimento e experiência). Este tipo de modelagem busca representar os processos heurísticos para tomadas de decisão em situações características. Já a modelagem física está preocupada em construir modelos que represente a estrutura e funções biomecânicas do ser humano. O foco da modelagem são os aspectos de aparência,

movimentação e as forças aplicadas no manequim. Nesta classificação, os autores subdividem a modelagem física em três tipos de manequins:

- i) modelos biomecânicos: interessados em reproduzir a estrutura músculo esqueléticos do corpo humano e realizar análises dos esforços físicos nas articulações. Estes modelos possuem visualização gráfica e interação com ambientes CAD limitada;
- ii) manequins digitais: Digitais Human Models (DHMs) possuem representação gráfica semelhante ao ser humano, tanto na aparência como na movimentação. São modelos que apresentam aparência mais próxima do real e permitem realizar análises e interação com ambiente (movimentação e de força) por possuírem estrutura biomecânica (como os modelos biomecânicos);
- iii) modelos de visualização: São modelos preocupados com a representação gráfica idealística à aparência humana, sem preocupação com a estrutura real do corpo humano. Em comparação com os DHMs, este tipo de modelo não permite modificar aspectos do corpo humano com facilidade, demandando programação e utilização de softwares adicionais. Além disso, não possuem aplicações para realização de análises com ambiente e biomecânicas como os DHMs (SANTOS et al., 2013). A hierarquia de classificação dos modelos é apresentada na Figura 2-8.

Figura 2-8 - Classificação dos modelos de simulação humana computacional



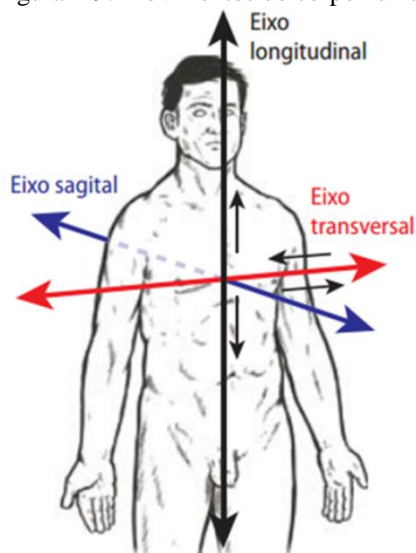
Fonte: Menegon, Braatz e Tonin (2011)

2.2.3 Biomecânica e antropometria

O corpo humano pode ser dividido em uma estrutura biomecânica, conforme os campos de estudo da mecânica (MÁSCULO, 2011). O primeiro campo é a mecânica estática, onde o sistema esquelético do corpo é apresentado como estrutura óssea, com a função principal de sustentar o corpo. Já a mecânica dinâmica apresenta o corpo humano como uma estrutura formada por articulações em um sistema de alavancas, responsáveis por descrição dos movimentos humanos.

O esqueleto humano possui cerca de 208 ossos (MÁSCULO, 2011). O encontro entre eles forma estruturas cartilaginosas articuladas, com grau de liberdade específico que definem sua possibilidade de movimentos. A combinação do ângulo assumido por cada articulação define o movimento realizado pelo ser humano em um dado momento (PANERO e ZELNIK, 2002). Os autores apresentam as articulações divididas em três tipos. O primeiro tipo são as articulações do tipo dobradiça, que permitem movimentos somente em um plano (um grau de liberdade) a partir da posição inicial. Os principais exemplos são as articulações do cotovelo e joelho. O segundo tipo são as articulações em pivô, onde os movimentos podem ser realizados em dois planos (dois graus de liberdade), a partir de uma posição zero. Exemplo típico é a articulação do pulso. O último tipo são as articulações do tipo esferoidal (três graus de liberdade), que permitem movimentos tridimensionais ou rotações, sendo a articulação do ombro e do quadril as principais. Desta forma todos os movimentos humanos podem ser classificados em torno de um sistema de eixos, conforme apresentado na Figura 2-9.

Figura 2-9: Movimentos do corpo humano em um sistema de eixos



Fonte: Duarte (2009)

Os movimentos realizados paralelos ao eixo sagital são classificados como flexão (quando ocorre a diminuição do ângulo formado entre o segmento que se desloca e aquele que permanece fixo) e extensão (quando ocorre aumento do ângulo). Já os movimentos realizados paralelos ao eixo transversal são classificados como adução (quando os movimentos ocorrem em direção ao eixo longitudinal) e como abdução (quando os movimentos se afastam do eixo longitudinal). A rotação pode ser denominada como rotação medial quando a face anterior do membro se aproxima do eixo mediano do corpo (eixo longitudinal) e rotação lateral no sentido oposto. O último tipo de movimentos é a pronação e supinação, que é resultante da combinação entre os tipos anteriores.

A antropometria é “a ciência que trata especificamente das medidas do corpo humano para determinar diferenças em indivíduos e grupos” (PANERO e ZELNIK, 2002 p. 23). Os autores apresentam dois tipos de dimensões corporais para projeto de espaços interiores: antropometria estrutural (ou estática) e a antropometria dinâmica (ou funcional). Na antropometria estática as medidas do corpo são obtidas em posições padronizadas com o corpo em repouso ou com poucos movimentos (IIDA, 2005). Já na antropometria funcional são obtidas medidas corporais em posições de trabalho ou associadas a movimentos específicos de uma tarefa.

A maioria das pesquisas antropométricas é realizada para especificar o comportamento das medidas corporais da população de determinado país ou região. Estudos apontam que as medidas antropométricas de uma população pode variar acordo com a idade, sexo, raça e grupo ocupacional (IIDA, 2005). Os resultados das pesquisas antropométricas de uma população são apresentados em tabelas no formato de distribuições estatísticas, organizadas por sexo e percentis. A diferença entre as medidas corporais entre o sexo masculino e feminino é um fato verificado na maioria das pesquisas. O percentil é um conceito retirado a partir da distribuição estatística que representa determinada medida antropométrica. Panero e Zelnik (2002) explicam percentil da seguinte forma:

“O primeiro percentil de estatura ou altura, por exemplo, indica que 99% da população estudada teriam alturas maiores. Da mesma forma o percentil 95 indicaria que somente 5% da população estudada teriam alturas maiores e que 95% dessa população teriam a mesma altura ou menores” (PANERO e ZELNIK, 2002, p. 34).

A lógica dos percentis no contexto de projetos é uma forma de avaliar as questões corporais no desenvolvimento de um novo produto. Menegon et al. (2002) considera dois princípios de aplicação de dados antropométricos. No primeiro princípio as variáveis

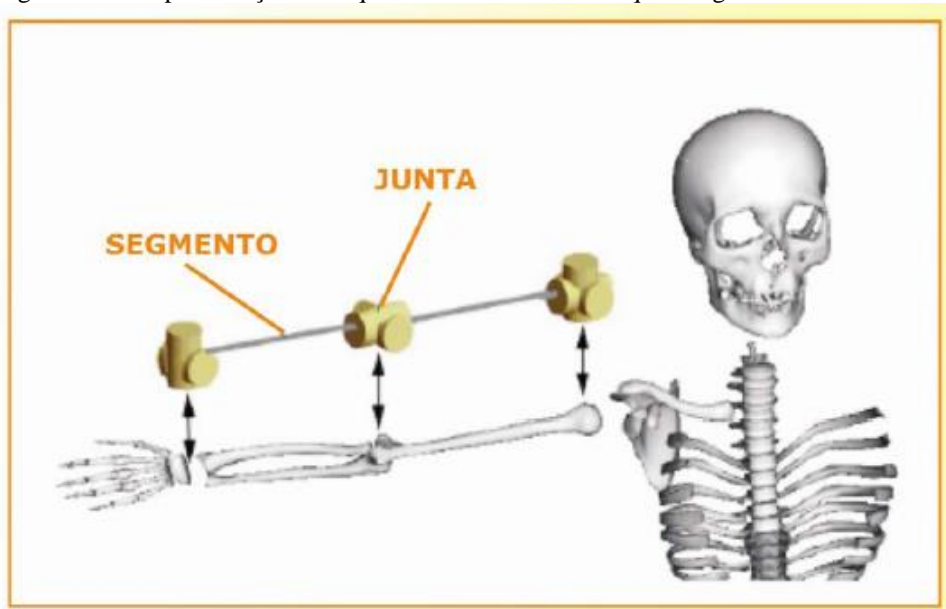
relacionadas aos dispositivos projetados devem ser capazes de atender a 90% da população de usuários, situados entre o percentil 5% e 95%. No segundo princípio, as variáveis que não forem possíveis de serem resolvidas pelo primeiro princípio, devem possuir regulagens para atender a 90% da população.

Estes conceitos relacionados ao funcionamento biomecânico e antropométrico do ser humano são utilizados pelos *softwares* de modelagem e simulação humana para criação de simulações, buscando reproduzir a realidade humana.

2.2.3.1 Modelagem e antropometria dos DHMs

Os DHMs são construídos por estruturas semelhantes ao do corpo humano por um conjunto de segmentos e juntas (FARREL, 2005). Esta estrutura é utilizada como modelo de representação óssea estática e articulada dinâmica e funcional do corpo humano. O conjunto de segmentos e articulações formam os membros do corpo, por exemplo, os segmentos que representam o braço, antebraço, mão e os dedos, juntamente com as articulações do ombro, cotovelo, punho e dos dedos formam os membros superiores (direito e esquerdo). Na Figura 2-10 é ilustrada a estrutura proposta pelo autor.

Figura 2-10: Representação do esqueleto humano em manequins digitais



Fonte: Braatz (2009)

A antropometria dos DHMs é definida com base nas distribuições antropométricas. Cada *software* possui dados antropométricos de diferentes populações, que

são definidas conforme pesquisas existentes e acordos comerciais entre os envolvidos no desenvolvimento (desenvolvedores, fornecedores, clientes).

A utilização destes dados nos *softwares* está baseada nos conceitos sobre percentis. Ao definir uma população e percentil desejado, o DHM é criado automaticamente. Os *softwares* também permitem criar manequins com medidas customizadas. Porém, devido aos algoritmos matemáticos utilizados para criação das bases, não é possível personalizar todas as medidas. Estes algoritmos não estão descritos nos manuais do *software*. Isto representa uma dificuldade em utilização dos manequins, principalmente no contexto brasileiro (BRAATZ et al., 2012).

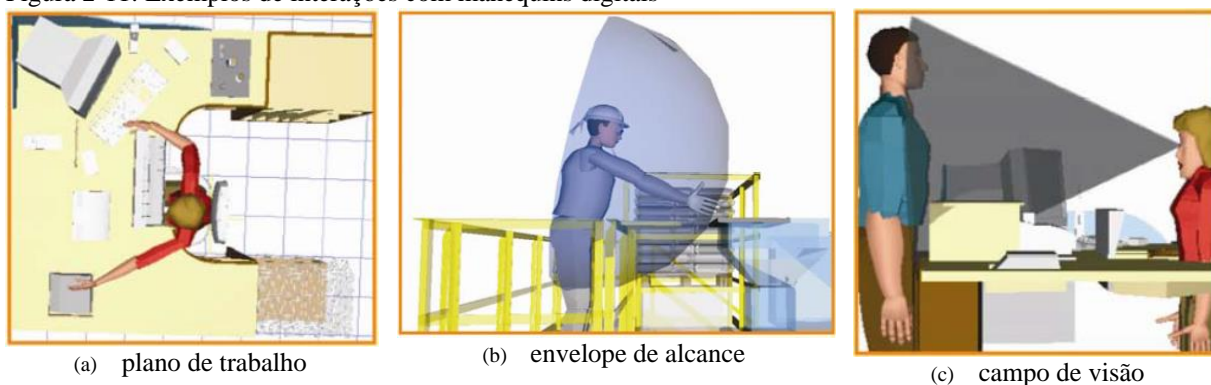
Visando solucionar esse problema, podem ser citadas duas pesquisas que buscaram criar manequins digitais que representem a população brasileira. Na primeira pesquisa, Menegon et al. (2002) buscaram representar a população brasileira, representada pela população de trabalhadores da Embraer, no *software* de modelagem e simulação humana Jack (Siemens). Neste estudo foram realizadas medições em humanos reais e criadas distribuições estáticas da população brasileira. Em seguida, essas medidas foram colocadas no *software* e testadas em processo de iteração até atingir resultados consideráveis. Na segunda pesquisa, realizada por Tosetto e Menegon (2008), foi criado um modelo matemático que relacionava diferentes populações antropométricas, presentes no módulo de manequins digitais Human Builder dos *softwares* CATIA/DELMIA (Dassault Systèmes). Com isto foi possível criar manequins que representam a população brasileira, para construção de bibliotecas de posturas.

Estabelecida a modelagem e antropometria dos DHMs faz-se necessário criar o processo de simulação humana através da criação de simulações para interação e análise em ambiente virtual.

2.2.4 Interação dos manequins digitais com o ambiente CAD

O posicionamento dos manequins digitais em posturas é a principal categoria de interação dos manequins com o ambiente CAD (ZIOLEK & KRUIHOF, 2000). Este tipo de interação permite ao projetista posicionar o manequim na postura de trabalho futura possível no seu posto de trabalho projetado (modelado em CAD) e analisar o plano de trabalho, as zonas de alcances (antropometria dinâmica e funcional) e campo de visão do operador. A Figura 2-11 ilustra três exemplos de interações com manequins digitais.

Figura 2-11: Exemplos de interações com manequins digitais



Fonte: Adaptado de Braatz (2009)

Existem também instrumentos de análise que são utilizados pelos ergonomistas para avaliar as condições biomecânicas e fisiológicas dos operadores durante a realização do trabalho. Estas ferramentas realizam análises objetivas e quantitativas da situação modelada, baseadas nas pesquisas e experimentos que fundamentam a ferramenta. Os *softwares* possuem ferramentas de análise postural como *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA), presente no Jack e no Human Builder e a *Ovako Working Posture Analysing System* (OWAS) presente no Jack. Outra categoria de ferramentas são as análise de tarefas relacionadas com o esforço físico. Nesta categoria destaca-se: a utilização da equação do *National Institute of Occupational Safety & Health* (NIOSH, 1991) para análise de levantamento de carga e das tabelas criadas por Snook e Ciriello (1991) através de experimentos para carregamento de materiais. Estas ferramentas estão presentes no Human Builder. O Jack também possui as ferramentas citadas, e também contém análise de torque e força, análise de fadiga e gasto metabólico. Já o RAMSIS não possui estes instrumentos de análise clássicos em ergonomia. Suas ferramentas são específicas para análise de pilotos ou motoristas em posição sentada (BRAATZ, VOLPE, e TONIN, 2010): análise do cinto de segurança e análise dos retrovisores.

As simulações podem ser classificadas em simulação estática ou simulação dinâmica. As interações/análises do manequim em determinada postura com corpo parado são simulações estáticas. A simulação dinâmica ou animações utiliza-se da técnica de computação gráfica chamada *keyframe* ou pose-chave. Nesta técnica são definidas as posturas principais (*keyframes*) e o computador calcula a variação das posturas por interpolação e ajustes pré-determinados, ao longo do tempo, construindo uma animação (GOMIDE et al., 2009).

Para suportar as necessidades de simulação cada vez mais próximas possível das situações reais, os *softwares* de modelagem e simulação humana vêm desenvolvendo e

apropriando-se de novas técnicas para simulação dos movimentos humanos como cinemática inversa, biblioteca de posturas e a captura de movimentos.

2.2.5 Técnicas de simulação dos movimentos humanos com DHM

A técnica tradicional de modelagem dos movimentos humanos nos *softwares* é a cinemática direta. Esta técnica é considerada precisa, uma vez que a postura é obtida manipulando-se o valor angular de cada articulação da forma desejada pelo usuário. As outras técnicas utilizadas são: *cinemática inversa*, as *bibliotecas de posturas e captura de movimentos*.

A cinemática inversa calcula a posição do corpo humano a partir de um conjunto de restrições (GROCHOW et al., 2004). Esta técnica possui modelos matemáticos que contém estatísticas sobre possibilidades de movimentos humanos. Para obter as probabilidades de movimentos humanos, e assim construir algoritmos de cinemática inversa, são definidas tarefas típicas como caminhar, agachar e alcançar objetos, que são realizadas por humanos reais, em experimentos realizados em laboratórios, e capturados com sistemas de MoCap, possibilitando manipular apenas os membros extremos do manequim para obter uma combinação de dos movimentos de outros membros e articulações, automaticamente.

Já as bibliotecas de posturas possuem pré ajustamento das articulações/segmentos para posicionar o manequim em posições genéricas, como andando, correndo, dirigindo, rastejando e outros. Estas bibliotecas auxiliam na modelagem e simulação das posturas específicas de determinada tarefa, pois é possível partir de uma postura arquivada na biblioteca e fazer ajustes até atingir a postura desejada.

A última técnica é a utilização de sistemas de MoCap. Vale ressaltar a diferença entre os movimentos capturados para geração de algoritmos de cinemática inversa e o controle dos movimentos diretamente capturados. No primeiro os movimentos são capturados em laboratório por especialistas, que desenvolvem estes algoritmos para os fabricantes dos *softwares* DHMS, o que não permite a edição do algoritmo pelo usuário do *software*. Já no segundo caso, o sistema de MoCap é manuseado pelos atores do processo de concepção (projetistas, engenheiros e ergonomistas) para incorporar os movimentos capturados diretamente no cenário de projeto.

2.3 Sistemas de Captura de Movimentos

O sistema de Captura de Movimentos, também chamado de *Motion Tracking* ou pela abreviação MoCap é uma técnica utilizada para mapear os movimentos realizados por um objeto e reproduzi-los em ambiente digital (GOMIDE et al., 2009). Os autores apontam que a MoCap foi utilizada pela primeira vez em aplicações médicas, indústria cinematográfica e desenvolvimento de jogos eletrônicos expandiram suas aplicações.

Os sistemas de MoCap são constituídos de um conjunto de sensores ou marcadores que são posicionados no objeto a ser capturado. O objeto de captura pode ser uma peça ou produto que se deseja capturar seu posicionamento (relativo ou global), ou captura dos movimentos realizados por seres vivos (humanos e animais). Cada sensor possui dados de posicionamento de uma parte específica do corpo de captura. O conjunto de sensores rastreiam os dados de posicionamento e os enviam para uma central de processamento para reproduzir a posição e movimentos do corpo de captura em um *software* próprio do sistema de MoCap.

Silva (1997) apresenta três formas de classificar os sistemas de captura de movimentos: quanto à tecnologia utilizada para rastrear os movimentos, quanto à posição da fonte emissora em relação a posição dos sensores e quanto à forma de obtenção dos dados capturados.

A tecnologia do sistema MoCap está relacionada com os sensores utilizados. Podemos dividir a tecnologia em cinco tipos: eletromecânicos, magnéticos, óticos, *markless* e inercial. Cada tipo de sensor (tecnologia) define o processo de obtenção dos movimentos, o tipo e as necessidades de calibração; e o ambiente no qual é possível realizar captura dos movimentos.

A posição relativa da fonte emissora com relação aos marcadores foi proposta por Mulder (1994). Assumindo que os movimentos do corpo de captura são relativos a um ponto de referência: (i) os sensores podem ser posicionados no corpo de captura e podem obter dados de posicionamento a partir de uma fonte posicionada na referência, ou (ii) os sensores são posicionados no ponto de referência, e uma fonte, fixada no corpo de captura, emite sinais para os sensores. Desta forma os sistemas MoCap podem ser classificados em: *inside-in*, *inside-out* e *outside-in*. A primeira palavra é referente à posição dos sensores no corpo de captura, ou seja, *inside* se os marcadores estão localizados no corpo de captura e *outside*, se os marcadores estão localizados fora do corpo de captura. A segunda palavra é referente à posição da fonte emissora de sinais para os sensores.

A terceira categoria de classificação mostra como são obtidos os dados capturados (direta ou indiretamente) e indica a qualidade dos resultados da captura. Os sistemas cujos dados são obtidos diretamente não necessitam de processamento pós captura, somente procedimento de filtragem para eliminação de ruídos. Os sistemas de aquisição indireta possuem *softwares* para analisar os dados capturados antes de gerar um resultado final. Este tipo de sistema possui a vantagem de possibilitar maior acurácia nos movimentos capturados, porém possuem a desvantagem de não permitir interatividade. Os sistemas atuais são flexíveis quanto à captura dos dados permitindo a interação em tempo real e também tratamento dos dados capturados.

2.3.1 Sistemas de MoCap eletromecânicos

Os sistemas eletromecânicos são constituídos por uma estrutura rígida (chamada de exoesqueleto) articulada por potenciômetros angulares (sensores). O corpo de captura veste o exoesqueleto de forma que os sensores ficam posicionados próximos às juntas do corpo humano, permitindo calcular a posição relativa dos segmentos durante os movimentos (Figura 2-12).

Figura 2-12: Exemplo sistema MoCap eletromecânico



Fonte: Meta Motion (2010)

Os sistemas eletromecânicos são do tipo *inside-in*. A central de recebimento das informações dos potenciômetros está posicionada no próprio exoesqueleto que enviam os dados diretamente para um *software*, por uma transmissão a cabo ou sem fio (*wireless*). Logo o volume de captura depende do comprimento do cabo ou da área coberta pela rede *wireless*. Este sistema não sofre problemas de oclusão reflexão (problemas típicos dos óticos), ou

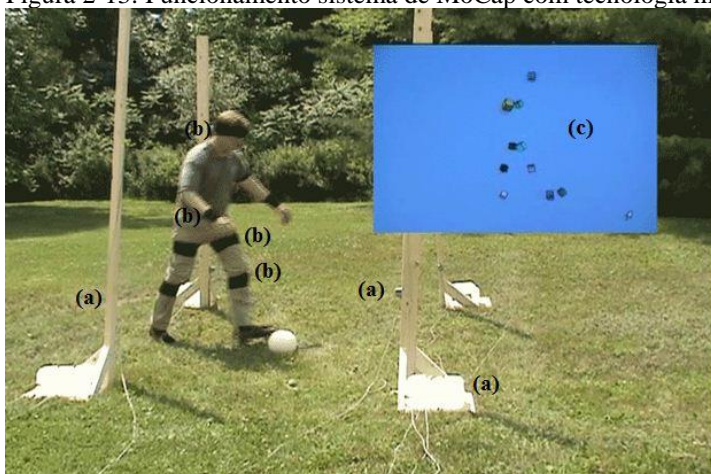
sofrem desvio nos dados capturados por interferência de campos magnéticos (problemas dos sensores magnéticos e inerciais), não necessitando de calibragem (SILVA, 1997). A principal desvantagem é com a capacidade de movimentação do corpo de captura: o aparato utilizado (exoesqueleto) acaba restringindo significativamente a liberdade de movimentos do corpo de captura.

2.3.2 Sistemas de MoCap magnéticos

Os sistemas de MoCap magnéticos possuem sensores sensíveis a campos magnéticos. Os sensores são compostos por três bobinas elétricas (ortogonalmente posicionadas entre si) imersas em um campo magnético de baixa frequência mantido pelo transmissor do próprio sistema de captura (*inside-out*), que medem a direção e a intensidade do campo em cada sensor (RAMÓN, CANDELAS e MEDINA, 2007). Esta tecnologia é sensível a campos magnéticos externos que podem interferir na qualidade dos dados transmitidos, que pode ser realizada por cabos ou via *wireless*. O tipo de transmissão dos dados impacta diretamente no tamanho do campo de trabalho. A transmissão *wireless* é a forma mais comum atualmente.

Utilizando-se tecnologia magnética, pode-se destacar dois sistemas de MoCap comerciais: LIBERTY LATUS da empresa Polhemus e o driveBAY e trakStar da empresa Ascension. A Figura 2-13 mostra o funcionamento do sistema LIBERTY LATUS. As fontes emissoras de campos magnéticos estão espalhadas pelo gramado e ligados a uma central que gera o campo magnético (a). A direção e diferença de intensidade de cada sensor montado no corpo de captura, posicionados nas faixas pretas, (b) são transmitidos de volta para central e geral os movimentos em tempo real, apresentados na tela com fundo azul (c).

Figura 2-13: Funcionamento sistema de MoCap com tecnologia magnética



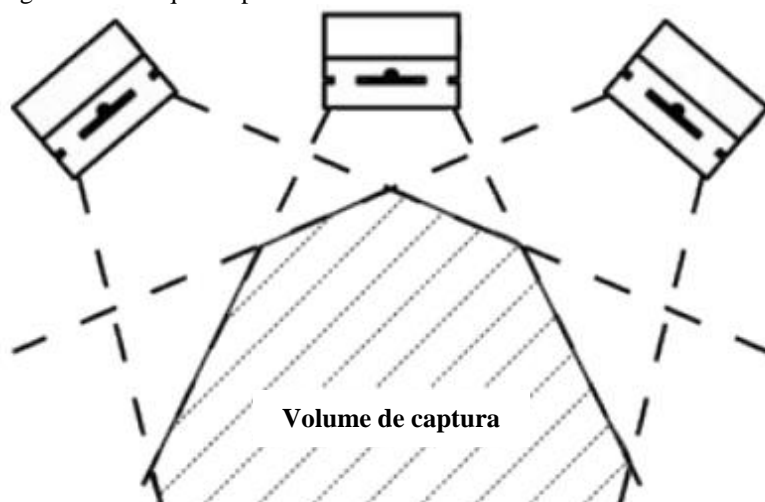
Fonte: Adaptado de Polhemus (2012)

Os sistemas que utilizam sensores magnéticos possuem a vantagem de possuir baixo custo no processamento de dados, não necessitam de calibração (SOUSA e TAVARES, 2006) e ausência de problemas de oclusão dos sensores (SILVA, 1997). A principal limitação dos sistemas que utilizam sensores magnéticos é a presença de materiais ferromagnéticos próximos à ao local da captura que causam desvios nos dados capturados (SILVA, 1997; RAMÓN, CANDELAS e MEDINA, 2007).

2.3.3 Sistemas de MoCap óticos

Os sistemas óticos (ou ópticos) são baseados no uso de câmeras, posicionadas de forma estratégica, que tem a função de capturar os movimentos de marcadores luminosos (SILVA, 1997). Devido essa característica da tecnologia ótica, é comum denominarmos marcadores ao invés de sensores. Os marcadores podem ser passivos ou ativos (GOMIDE et al., 2009). Nos marcadores passivos a luz é refletida por pontos chaves dos movimentos (tipo *inside-out*). Esta luz pode ser marcas coloridas, marcas refletoras, superfícies do corpo humano. Já os marcadores ativos possuem a própria fonte de emissão de luz (tipo *inside-in*), que podem ser *Light-Emitting Diodes* (LEDs), lasers e outros. As câmeras nos sistemas óticos são capazes de fornecer dados de posicionamento dos marcadores em duas dimensões. Para obter dados sobre da terceira dimensão, é necessário cada frame de captura seja visualizado, por pelo menos, por duas câmeras simultaneamente (conforme ilustrado na Figura 2-14), para posteriormente ocorrer processamento dos dados por Triangulação (GOMIDE et al., 2009). Logo estes sistemas necessitam realizar calibração para definir o volume de captura, baseado nas especificações das câmeras utilizadas (QUEIROZ, 2011).

Figura 2-14: Esquema posicionamento de câmeras em um sistema de MoCap ótico



Fonte: NaturalPoint (2008)

Os sistemas óticos possuem a vantagem de possibilitar alta liberdade de movimentos, para o corpo de captura, pelas características dos sensores: são pequenos e não necessitam estarem interligados por fios (Figura 2-15). Além disso, não são afetados por campos magnéticos causados por objetos metálicos. A principal desvantagem é quanto ao ambiente de uso. O problema de oclusão de câmeras que impede de ser utilizado em ambientes externos.

Figura 2-15: Marcadores de um sistema de MoCap ótico



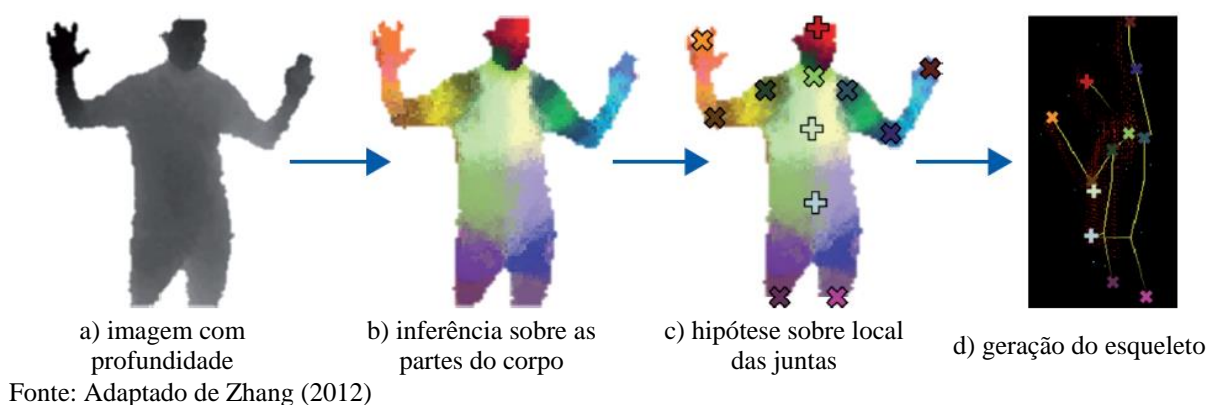
Fonte: Vicon (2013)

2.3.4 Sistemas de MoCap *markerless*

Os sistemas de MoCap *markerless* não possuem uma tecnologia específica. Esta classificação é dada pelo fato de não utilizarem marcadores ou sensores físicos. Estes sistemas são óticos utilizando as características de corpo de captura (roupa e silhueta) como “pseudomarcadores”.

O sensor denominado de *Kinect* é um sistema de captura de movimentos ótico desenvolvido pela Microsoft e Prime para o console (*vídeo game*) do Xbox 360. Este sistema reconhece o corpo de captura através de uma câmera colorida e um sensor de profundidade em Infravermelho (IV). Este sistema é chamado de sistema Red-Green-Blue+Depth (RGBD). Um laser de IV é emitido e fracionado por uma grade (grade de difração) até atingir o corpo de captura, gerando um conjunto de pontos com diferentes formatos e dimensões. A profundidade é calculada, baseado na diferença no formato e dimensões entre os pontos que são emitidos e os pontos que retornam até o sensor. A câmera RGB atua de forma complementar ao sensor de IV, gerando imagens coloridas, que permite ao *Kinect* gerar um *avatar*, inferindo partes do corpo com posição das juntas, e recalibrações (ZHANG, 2012). A Figura 2-16 ilustra o processo de geração do esqueleto.

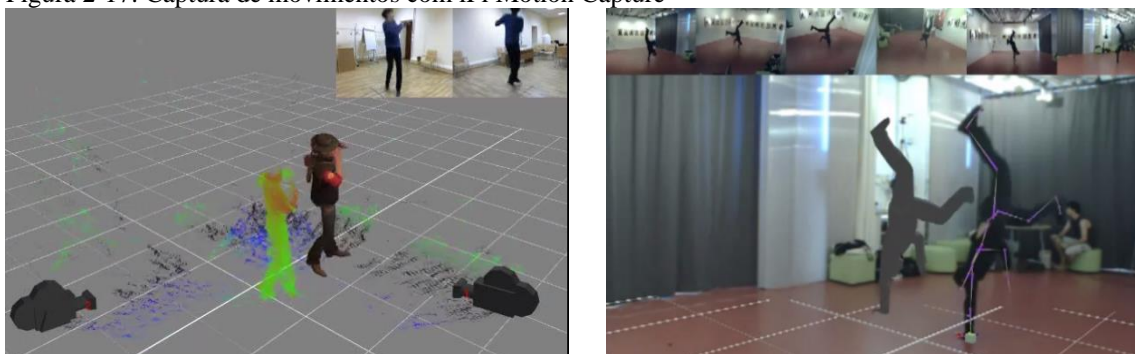
Figura 2-16: Funcionamento do Kinect



Apesar do modelo biomecânico simplificado, é crescente os estudos que utilizam o Kinect como técnica para capturar movimentos em ambientes fechados e controlados. Um exemplo é a interação do Kinect com *software* DHMS Jack, para simular a ferramenta de análise OWAS (HOREJSI et al., 2013). Segundo os autores, a simulação com Kinect demora cerca de 2 segundos, enquanto que a técnica tradicional leva 100 segundos para ser construída.

Outro sistema de MoCap *markerless* é o iPi Motion Capture (iPi Soft). Este sistema utiliza o Kinect ou Play Station Eye (Sony) como câmeras para realizar a captura. Este sistema foi utilizado pela Valve (empresa norteamericana que desenvolve jogos eletrônicos) para atribuir movimentos aos personagens de seus jogos (IPI SOFT, 2011). Assim como os outros sistemas óticos é necessário realizar calibração das câmeras para definir o volume de captura e permitir a Triangulação dos dados capturados. Desta forma, pode ser usado dois Kinect ou seis Play Station Eye simultaneamente para processar os dados (Figura 2-17).

Figura 2-17: Captura de movimentos com iPi Motion Capture



Fonte: iPi Soft (2011)

Os sistemas *markerless* possuem a vantagem de possibilitar maior liberdade de movimentos para o corpo de captura devido à ausência dos sensores. Porém apresentam as mesmas limitações que os sistemas óticos (problemas de oclusão e volume de captura), além disso, são limitados quanto estrutura do manequim, especificamente as juntas que são geradas no processo de *tracking* do esqueleto. A quantidade de juntas e de segmentos que são gerados são menores, em comparação com outros sistemas de MoCap.

2.3.5 Sistemas de MoCap inercial

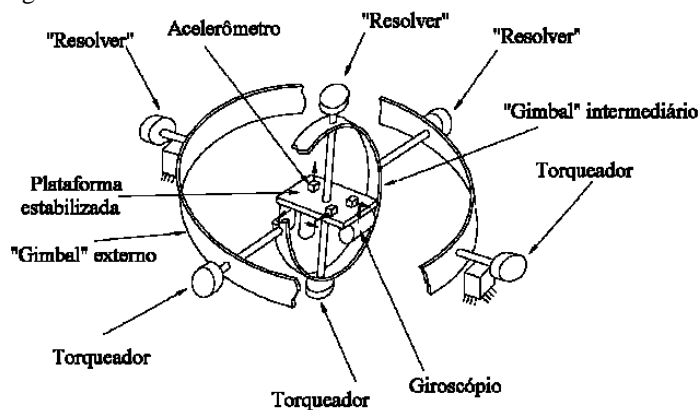
Os sistemas de MoCap inerciais utilizam Unidades de Medição Inercial (IMUs – Inertial Measurement Units). Estes sensores são compostos de acelerômetros e giroscópio. Os acelerômetros são empregados para determinar a velocidade e a posição, já os giroscópios são utilizados para definir a atitude (ângulo e orientação) dos objetos (CARVALHO, 2011) As informações de saída podem ser:

- posição do objeto em relação a um determinado referencial. Quando este referencial é a Terra, as informações são a latitude, longitude e altitude ou profundidade;

- velocidade do objeto (nas direções norte, leste e vertical); e
- rumo e atitude do objeto (heading, pitch e roll).

O autor apresenta dois tipos de sensores inerciais: (i) os mecânicos, utilizando sistema de anéis ou *gimballed* (cardan) e (ii) sensores do tipo *strapdown*. Os sensores mecânicos são compostos de três giroscópios e três acelerômetros presos a uma plataforma estabilizada e fixados através dos anéis, de forma que fiquem nivelados e apontando para uma direção fixa. Os anéis possuem motor de torque e um sensor angular (*resolver*). Desta forma é possível calcular o ângulo formado entre os anéis e o veículo que são traduzidos para ângulo de rumo (*heading*) e atitude (*pitch e roll*). O esquema de sensores inerciais mecânicos é apresentado na Figura 2-18.

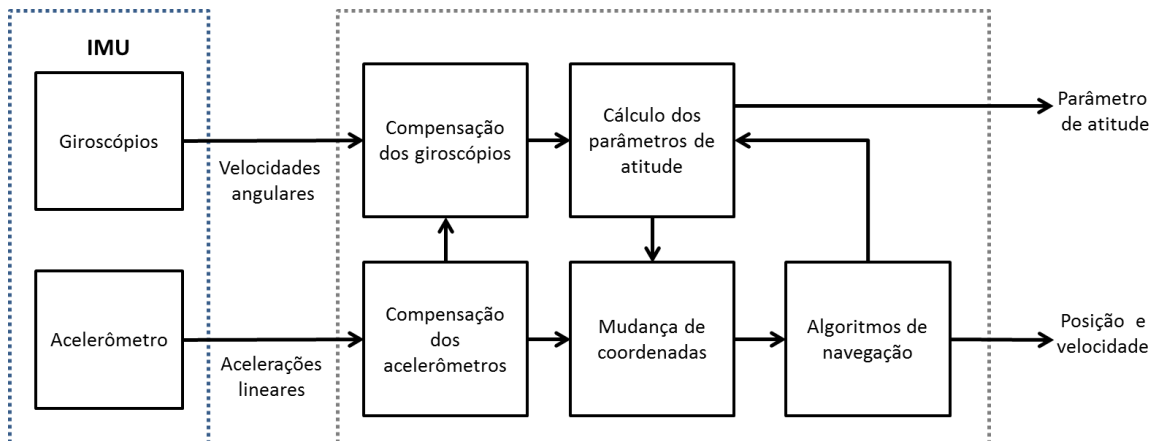
Figura 2-18: Sensor inercial mecânico



Fonte: Carvalho (2011)

Os sensores inerciais do tipo *strapdown* são posicionados diretamente no corpo de captura, sem a necessidade de utilizar eixos de *gimbals* para realizar as medições. O sistema de coordenadas é virtual: são utilizados algoritmos que mantêm um plano virtual horizontal, calculado a partir dos sinais dos sensores integrados, e a atitude e posição são calculados por algoritmos de atitude e navegação. A relação entre giroscópio, acelerômetro e os algoritmos de processamento dos dados é apresentado na Figura 2-19.

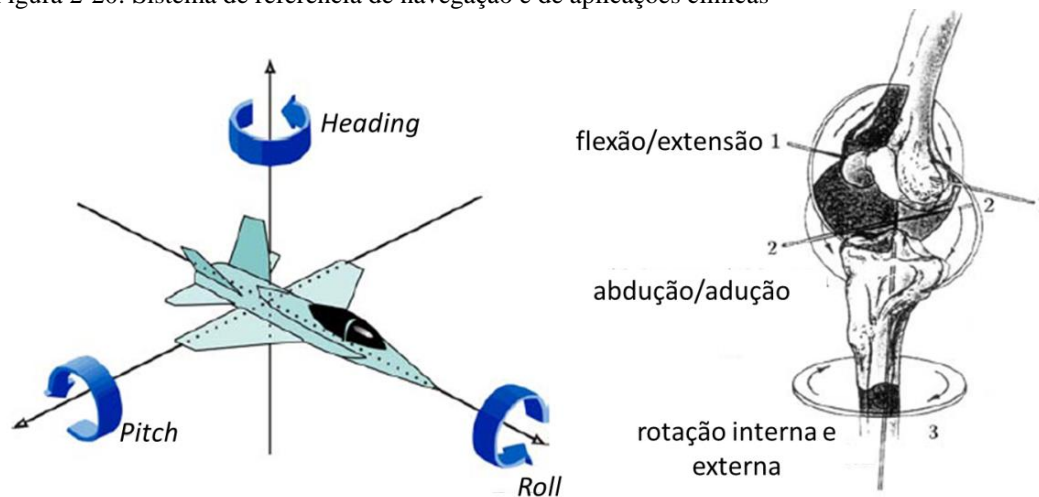
Figura 2-19: Diagrama de funcionamento de sensor inercial do tipo *strapdown*



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011)

Este tipo de sensor é mais adequado para análise de movimentos humanos, pois as medidas de rotação são obtidas em um sistema de coordenadas local (*roll, pitch e heading*). Este sistema de coordenadas é semelhante ao funcionamento do sistema de referência utilizado em clínica médica, com flexão/extensão, abdução/adução e rotação interna e externa (ROETENBERG, 2006). A Figura 2-20 ilustra a relação descrita.

Figura 2-20: Sistema de referência de navegação e de aplicações clínicas

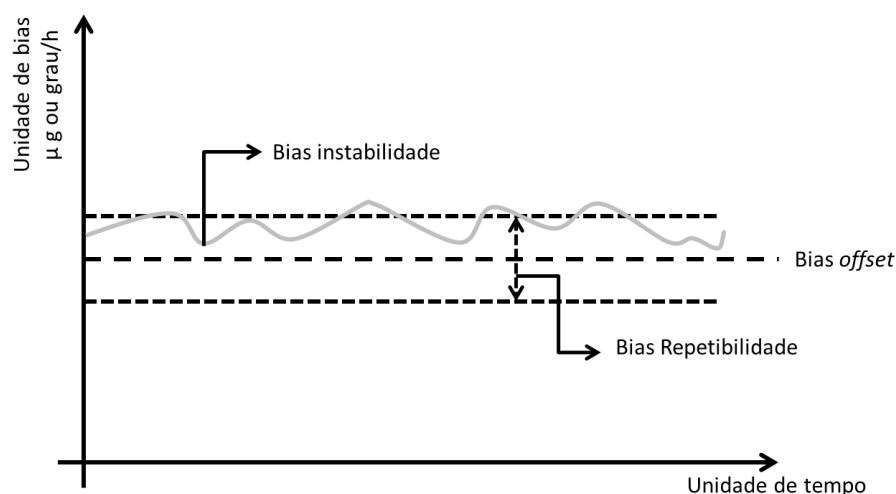


Fonte: Roetenberg (2006)

Os sensores inerciais estão sujeitos a parâmetros de erros definidos, que diminuem a qualidade da captura realizada. Os parâmetros de erros são *fator de escala, desalinhamento, ruído e bias* (CARVALHO, 2011). O *fator de escala* e *desalinhamento* são erros determinísticos, quem podem ser estimados e corrigidos. O *ruído* é um sinal aleatório, porém poder ser minimizado com processos de filtragem. Já o *bias* possui componentes três componentes: *bias offset*, *bias* de repetibilidade e *bias* instabilidade. O *bias offset* é

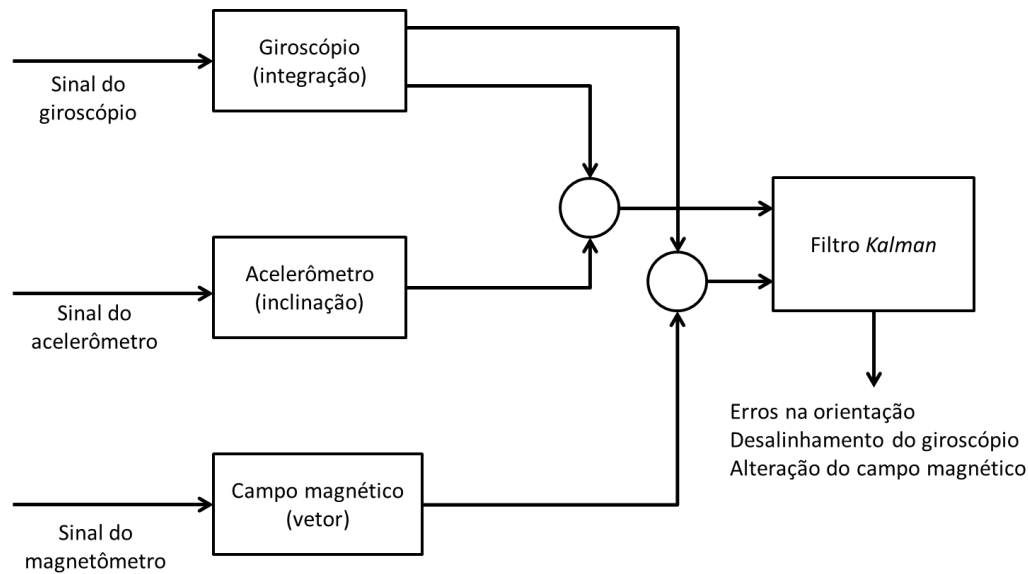
determinístico, sendo calculado e eliminado em laboratório na caracterização dos sensores. O *bias repetibilidade* é caracterizado por uma parcela do *bias* global constante no tempo, porém sofre alterações de valor quando os sensores são ligados e desligados. O *bias instabilidade* é caracterizado como uma variável aleatória, ou seja, que pode ser modelada por modelos estatísticos. O *drift* (deriva), erro associados aos sistemas de MoCap inerciais é caracterizado pela somatório do *bias instabilidade* + *bias repetibilidade*. O *drift* causa erros na precisão das medidas dos sensores à medida que o tempo de captura aumenta. O gráfico apresentado na Figura 2-21 ilustra o efeito do *bias* (*drift*) ao longo do processo de captura.

Figura 2-21: Efeito dos erros (*drift*) ao longo da captura



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011)

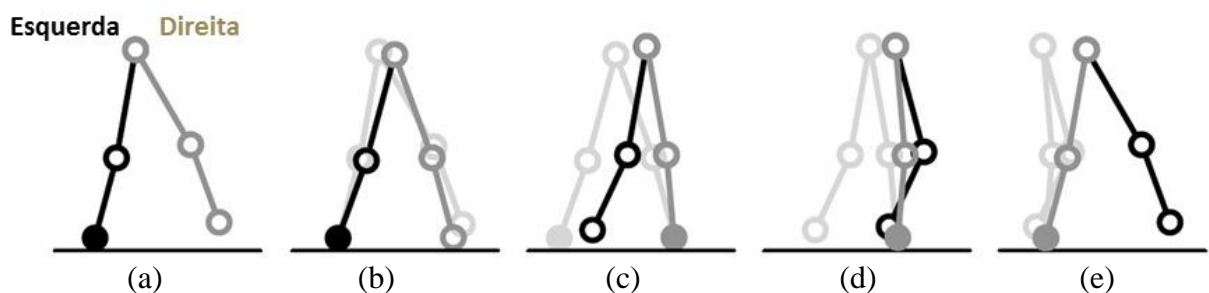
Para melhorar o desempenho dos sistemas que utilizam sensores inerciais, podem ser utilizados sistemas complementares. A integração dos sistemas inerciais com sistemas auxiliares melhora a informação de posição e atitude (CARVALHO, 2011). Os sistemas de MoCap Moven (Xsens), IGS-190-M (Animazoo) e 3DSuit (Innalabs) utilizam sensores inerciais integrados com magnetômetros (YOUNG, 2010). Porém, surgem outros problemas relacionados com a presença de objetos metálicos, que causam perturbações no campo magnético local, causando erros na orientação estimada (ROETENBERG, 2006). Para resolver esses problemas, o autor propõe a utilização do filtro de *Kalman*, como algoritmo para corrigir o *drift* nos sensores (Figura 2-22).

Figura 2-22: Estrutura do filtro de *Kalman*

Fonte: Traduzido de Roetenberg (2006)

Outra forma de reduzir os erros de captura é pela técnica de truncar (zerar) a velocidade do acelerômetro em certos momentos ao longo do período de captura (YOUNG, 2010). Para isto é necessário identificar os momentos nos quais o corpo de captura está em contato com algum objeto no ambiente real (parede, escada, piso e móveis). Este método chamado de modelo de ponto de contato é ilustrado na Figura 2-23 durante a movimentação de um modelo biomecânico. Na primeira cena (a) a perna esquerda está apoiando a movimentação da perna direita e o pé esquerdo está em contato com o piso, onde foi truncada a velocidade do acelerômetro; na cena (b) é possível visualizar a diferença entre a movimentação corrigida (modelo antropométrico em cinza escuro) e a movimentação sem correção (modelo antropométrico cinza claro). As cenas seguintes mostram a diferença na movimentação entre os dois modelos: com correção truncamento da aceleração e sem truncamento da aceleração.

Figura 2-23: Técnica do ponto de contato para correção dados de captura



Fonte: Adaptado de Young (2010)

A aparelhagem de um sistema inercial envolve os marcadores inerciais, que são fixados no corpo de captura e ligados a uma central de recebimento e processamento dos dados, também fixada no corpo de captura (*inside-in*). Os dados processados são enviados para central de trabalho por conexão *wireless*.

Os sistemas inerciais não possuem problemas de obstrução de sensores (tecnologia ótica), possibilitando maior volume de captura e possibilidade utilização em ambientes internos e externos. Com relação à liberdade de movimentos, os sensores inerciais são relativamente maiores que os sensores óticos, porém não restringem os movimentos como os exoesqueletos. Os problemas com os sistemas inerciais são com relação à influência de materiais ferromagnéticos, que afetam a orientação dos marcadores e o *drift* inerente aos sistemas que utilizam giroscópios.

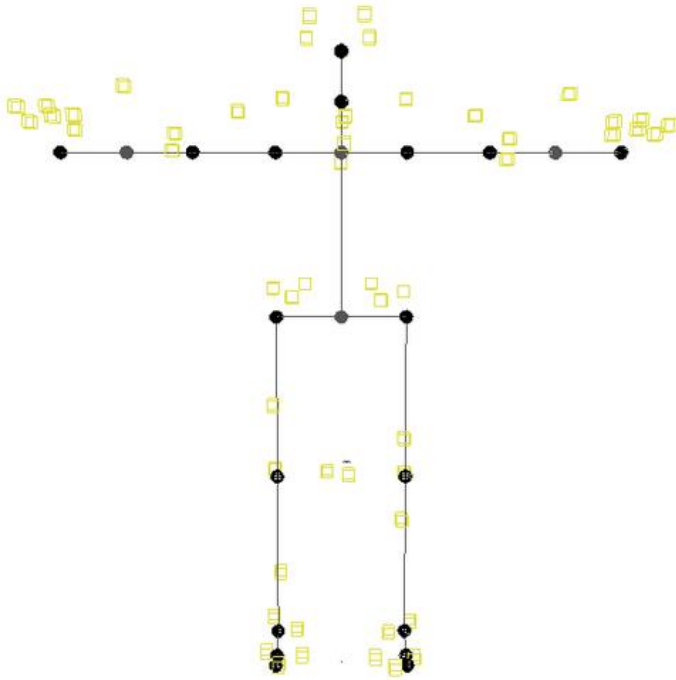
2.3.6 Resultados da captura de movimentos

Os resultados da captura de movimentos são arquivos que contém informações de posição dos sensores em cada espaço de tempo (*frame*). Estes arquivos podem ser salvos e reabertos no próprio *software* do sistema de MoCap ou podem ser posteriormente importados em outros softwares. Além disso, alguns sistemas permitem realizar a captura e visualizar em outros *softwares* ao mesmo tempo (tempo real de captura), através de *plugins* específicos (interação entre os sistemas). Independentemente do método de utilização dos resultados da captura é necessário realizar um processo de compatibilização entre o *avatar* originado do sistema de MoCap e o manequim escolhido para receber os dados de movimentos no novo *software*. Este manequim pode ser personagens de jogos, filmes e desenhos que podem assumir formas variadas (monstros e animais), ou podem ser semelhantes ao ser humano, como os manequins digitais utilizados em aplicações de ergonomia. Esta técnica de adaptação dos movimentos de é definida como *retargeting* (GLEICHER, 1998).

Para processos de exportação/importação, o *retargeting* vai depender do formato como o arquivo de captura foi salvo. Já para interação entre os *softwares* em tempo real, o *retargeting* depende de como o sistema de MoCap apresenta os dados de posicionamento no *software* de integração. Cada sistema de MoCap possui formatos específicos dos dados de saída (arquivos de captura). O formato dos arquivos pode ser classificado em dois tipos, de acordo com o método utilizado para processamentos dos dados (CHUNG e LEE, 2004). A primeira classificação contém os arquivos que fornecem apenas a

localização tridimensional dos sensores. São os arquivos de extensão *Coordinate 3D* (C3D). O processo *retargeting*, deste tipo de arquivo, consiste em sobrepor a posição das juntas oriundas do sistema de MoCap (quadrados amarelos) com as juntas do manequim de destino (os círculos pretos), conforme mostrado na Figura 2-24.

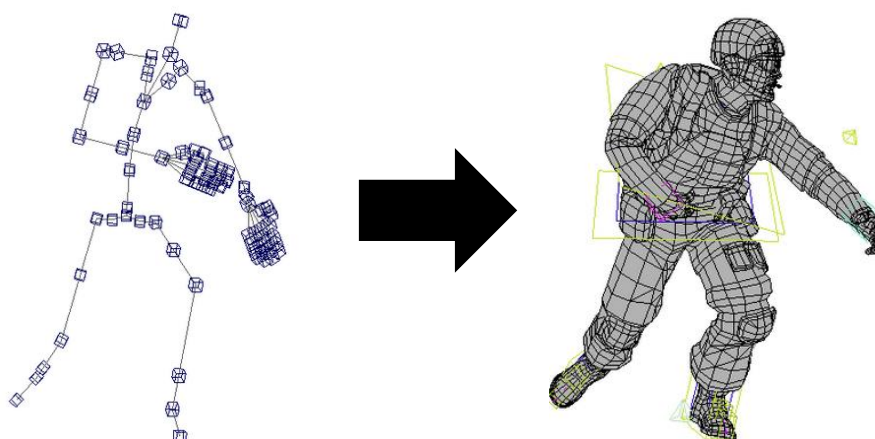
Figura 2-24: Processo de *retargeting* de arquivo C3D



Fonte: Softimage (2013)

A segunda classificação contém, além da localização tridimensional dos sensores, um esqueleto pré-definido, com junta e tamanho dos segmentos já estabelecidos. O principal tipo deste arquivo são de extensão *Biovision Hierarchy Animation* (BVH). Neste tipo, primeiramente é necessário definir o formato, dimensões e juntas, para posteriormente referenciar os pontos oriundos do sistema de MoCap (quadrados em azul) com os locais do novo *avatar* que ocorrem movimentação (retângulos em amarelo). Este processo de *retargeting* é ilustrado na Figura 2-25.

Figura 2-25: Processo de *retargeting* de arquivos BVH



Fonte: Adaptado de Softimage (2013)

O *retargeting* em *softwares* de modelagem e simulação humana, integrados com sistemas MoCap, é semelhante ao processo realizado com arquivos C3D: os pontos provenientes do sistema de MoCap são anexados (“atachados”) nas juntas do manequim digital.

A interação de sistemas de MoCap com *softwares* de modelagem e simulação humana pode ser classificada em dois níveis, conforme o método no qual os dados capturados são utilizados no *software* de modelagem e simulação humana. No primeiro nível os resultados da captura são salvos em um formato aceito pelo *software* DHMS, diretamente do sistema de MoCap ou são realizados procedimentos para converter o arquivo de saída em um formato aceito pelo DHMS (importação/exportação).

O Segundo nível de interação, é possível criar uma ligação direta entre o sistema de MoCap e *software* DHMS através de *plugins*, possibilitando capturar, visualizar e realizar análises no mesmo momento em que a captura está sendo gravada. Este tipo de interação amplia as possibilidades de aplicações, não se restringindo apenas a reprodução dos dados capturados. Desta forma, pelas possibilidades de aplicações, este nível pode ser denominado como de integração.

O *software* DHMS do Ramsis (Human Solution) é bastante limitado com relação à interação com sistemas de MoCap. Este *software* possui somente o primeiro nível de interação (exportação/importação). Além disso, aceita um formato de arquivo genérico, com extensão CSV (Comma Separated Values - Valores Separados por Vírgula), que não é comum para os sistemas de MoCap, necessitando de uma série de procedimentos de conversão de arquivos.

O Jack possui um módulo (Motion Capture Toolkit) que aceita importar arquivos com extensão C3D (interação de primeiro nível) e também a integração em tempo real com sistemas de MoCap que utilizam diferentes tecnologias (sistemas óticos, magnético e inercial). Já o Human Builder (Catia/Delmia) não possui opção de importar arquivos de captura, somente interação em tempo real.

2.4 Conclusão a partir dos referenciais teóricos

O objetivo do presente capítulo foi apresentar os referenciais teóricos sobre o uso da tecnologia computacional de modelagem e simulação humana em projetos de situações produtivas e as tecnologias de sistemas de MoCap.

Conforme abordado no primeiro tópico deste capítulo, as abordagens de concepção em ergonomia utilizam métodos que permitem implementar simulações sobre o trabalho e, ao mesmo tempo, seja um meio de interação entre os diferentes atores sociais envolvidos. Os pesquisadores apresentam o contexto de atores heterogêneos, com diferentes racionalidades e a necessidade de ferramentas, métodos e técnicas que possibilite a interação entre eles (objeto intermediário).

Os referenciais conceituais e técnicos de funcionamento das diferentes tecnologias exploradas nesta pesquisa mostram que tais tecnologias não foram concebidas para possibilitarem interação. Cada *software* e/ou sistema possui sua racionalidade e formas de uso próprio. Como demonstrado por Wu et al. (2010), a integração só é permitida pela presença do *plugin*, que busca na sua essência, funcionar como meio de ligação, entre os movimentos realizados por um corpo de captura através de um sistema de MoCap, com um *software* de modelagem e simulação humana, através do manequim digital. Desta forma, o processo de *retargeting* ocorre entre diferentes “atores” que possuem diferença nos seus modelos: biomecânico, estrutural e funcional.

As tecnologias utilizadas para conceber os sistemas de captura de movimentos apresentam restrições quanto ao ambiente de uso e erros quanto aos movimentos capturados, diminuindo a possibilidade de uso e sua acurácia. O sistema de MoCap, utilizado nesta pesquisa, possui sensores inerciais, que estão sujeito aos desvios de posicionamento (*drift*). Na literatura foram encontrados trabalhos buscando melhorar o desempenho dos sensores, como a utilização dos magnetômetros apresentado por Roetenberg (2006) e a técnica de truncamento da aceleração do giroscópio, ilustrada por Young (2010).

Ainda em relação as característica do sistema inercial, a ausência de um sistema de coordenadas absoluto, coloca duas questões para discussão. O primeiro está pautado na dificuldade em determinar a posição exata do corpo de captura durante a movimentação, devido a referência do sistema de coordenadas da Terra. Conforme apresentado por Ziolk e Kruithof (2000), o processo de simulação ocorre da interação dos manequins digitais, com ambientes CAD, onde é necessário posicionar o manequim em coordenadas precisas para possibilitar tais interações. Os exemplos de interações apresentados por Braatz et al. (2012) confirmam esta explanação. A segunda questão é necessidade de medir a posição de um objeto capturado por referencial determinado. Determinando-se o objeto capturado, como um ser humano real, em movimento, é necessário compreender como ocorre a medida de posicionamento no sistema de MoCap inercial e os reflexos na captura integrada com o DELMIA.

Estabelecido os desafios de se trabalhar com as tecnologias integradas e, posicionando este trabalho, como desenvolvimento de conhecimentos voltados para o uso, em projetos de ergonomia, a reflexão sobre os referenciais teóricos apontam para compreensão dos seguintes aspectos:

- a) qualidade dos dados capturados: devido as características dos sensores inerciais e possibilidades de melhoria dos dados capturados
- b) posicionamento espacial de ambientes virtuais: relacionado com a ausência de um sistema de coordenadas absoluto do sistema de MoCap;
- c) compatibilidade antropométrica entre os diferentes “atores” do sistema: pela diferença existente entre os modelos, que representam o homem
- d) cinemática dos movimentos capturados com corpo de captura, no manequim digital *Human*: devido a necessidade de um referencial para determinação da posição do corpo de captura.

No próximo capítulo é apresentada a metodologia definida para esta pesquisa, juntamente com os materiais e delineamentos elaborados para os ensaios experimentais.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Para maior compreensão do desenvolvimento da pesquisa, neste capítulo são detalhadas as tecnologias do sistema técnico em estudo e, os delineamentos experimentais realizados. Os resultados obtidos em cada ensaio, com o aprofundamento nas análises dos dados serão discutidos no capítulo 4.

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Ergonomia, Simulação e Projeto de Situações Produtivas (PSPLab), do Departamento de Engenharia de Produção (DEP) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Neste laboratório está estabelecido o grupo de pesquisa SimuCAD, que desenvolve projetos de extensão em parceria com empresas, via Fundação de Apoio Institucional ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FAI) da UFSCar. O SimuCAD busca discutir e desenvolver métodos e técnicas de aplicar, simulação e computação gráfica, nos projetos (MENEGON, 2003). Desta forma, os resultados desta pesquisa buscam suportar a utilização do sistema CAD-MoCap nos projetos de situações produtivas, contextualizados pela abordagem ergonômica.

Os participantes da pesquisa (corpos de captura) são estudantes de graduação, que desenvolvem projetos no grupo de pesquisa, contribuindo com as pesquisas realizadas.

3.2 Materiais

3.2.1 Hardware e software

Foram utilizadas as seguintes tecnologias: o sistema de captura de movimentos inercial MVN, integrado com o *software* de modelagem e simulação humana DELMIA, na versão V5R19, que contém o módulo Human Builder 2 para simulação de manequins digitais. A integração dos diferentes sistemas é realizada pelo *plugin* Real Time Interaction for Delmia (RTI) desenvolvido pela empresa Haption. Os equipamentos a serem utilizados são:

- sistema de MoCap MVN formado por: 17 marcadores inerciais (*suit*) e os acessórios do sistema (pilhas, fixadores, faixas, trena, e uma *case* para guardar o sistema);
- notebook de alto desempenho para realizar a integração do sistema.

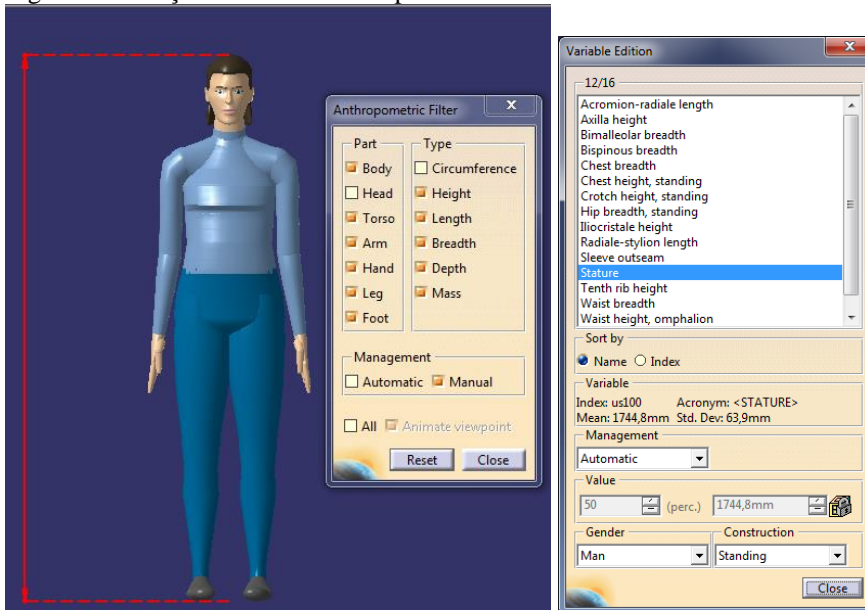
3.2.2 *Software* Human Builder (DELMIA)

O Human Builder (HB ou popularmente chamado de “Human”) é um módulo de aplicações com manequins digitais dentro dos softwares CATIA e DELMIA. O módulo possui ferramentas idênticas nos dois softwares, porém o DELMIA possui ferramentas adicionais de análises dinâmicas. As aplicações são divididas em cinco categorias de ferramentas, que são integradas e complementares:

- Human Builder: ferramenta básica para criação de manequins e gerenciamento de informações (relatórios, comentários e opções de salvamento);
- Human Measurements Editor: ferramentas para manipulação de dados antropométricos (edição de medidas dos segmentos, escolha de nacionalidades e criação de bases antropométricas personalizadas);
- Human Posture Analysis: aplicações de edição postural (modificação da posição dos segmentos);
- Human Activity Analysis: ferramentas de análise encontradas na literatura (RULA para análise postural, NIOSH para levantamento de carga e Snook e Ciriello para carregamento de carga e tarefas de empurrar e puxar cargas);
- Human Task Simulation: simulação de operações de montagem envolvendo produtos e manequins digitais.

O manequim digital *Human* possui base antropométrica de cinco populações (para ambos os sexos): americana, canadense, francesa, japonesa e coreana. Para cada população existem manequins para os principais percentis (5%, 50% e 95%). É possível criar manequins personalizados, modificando as medidas dos segmentos, destas populações pré-definidas, ou criando uma nova base antropométrica. O Human Builder possui 104 medidas antropométricas (DELMIA, 2002) editáveis na construção do manequim (Figura 3-1). Porém, na edição de uma população pré-definida não é possível editar todo esse conjunto de medidas, pois elas seguem algoritmos internos na sua mensuração: existem medidas que são independentes e outras que possuem correlação com medidas independentes.

Figura 3-1: Edição de medidas antropométricas

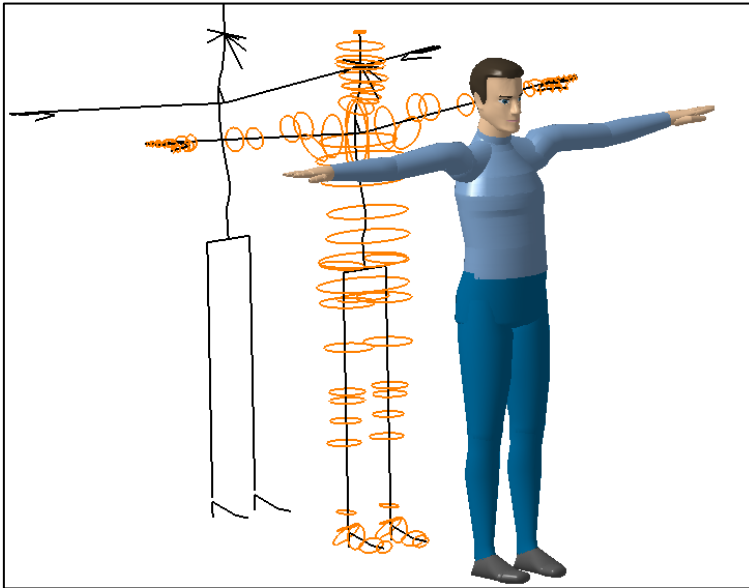


Fonte: Autor

Para criação de uma nova base antropométrica é necessário ter uma massa de dados sobre cada medida independente para que possa ser tirando sua média e desvio padrão (para formar os percentis) e ter a o valor de correlação entre medidas independentes com as dependentes. Também existem “populações especiais”, que são medidas antropométricas para determinado grupo de pessoas em percentis específicos: crianças (referência), idosos (referência), grávidas com 16 semanas (referencia). Com relação aos idosos, além da antropometria, os manequins são representados com limitação (encurtamento) da possibilidade de movimentos dos segmentos, característica típica do envelhecimento humano.

O *Human* não possui uma estrutura com articulações e segmentos ósseos. Sua estrutura é formada apenas por segmentos, envoltórios por elipses para formar uma superfície para representar a pele humana (Figura 3-2).

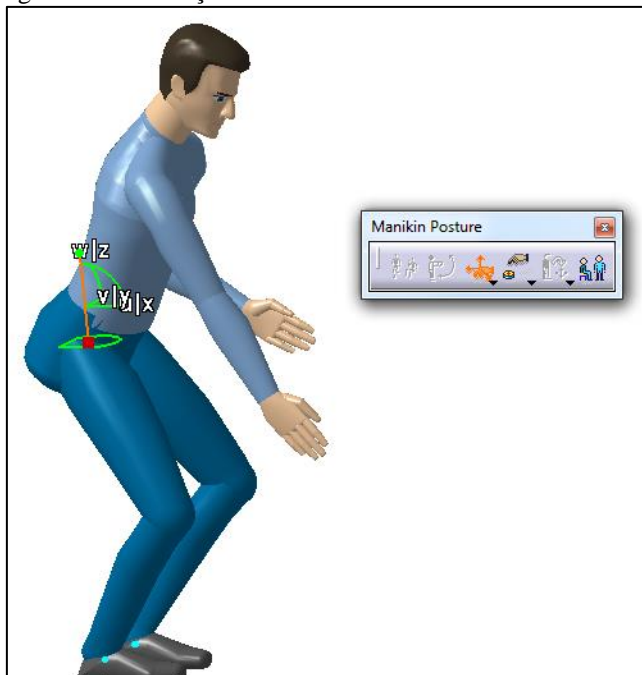
Figura 3-2: Estrutura do manequim do Human Builder



Fonte: Autor

A simulação dos movimentos pode ser realizada pela técnica tradicional, ou seja, editando-se manualmente a posição de cada segmento, ou pelo algoritmo de cinemática inversa. O algoritmo permite obter uma postura manipulando ou fixando os movimentos das mãos, pés, cabeça e quadril. Na Figura 3-3 é ilustrada a utilização da cinemática inversa, onde foram fixados os pés e, está sendo manipulado o quadril, fazendo com que as pernas sejam flexionadas e abduzidas automaticamente.

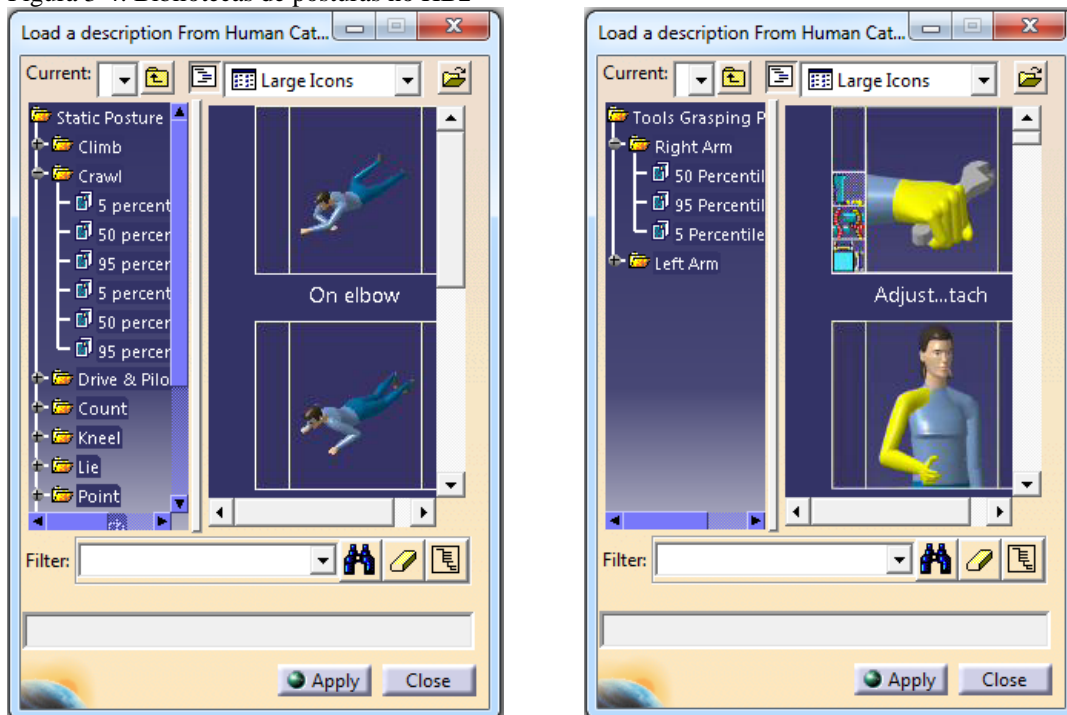
Figura 3-3: Utilização de cinemática inversa no HB2



Fonte: Autor

O Human Builder também possui duas bibliotecas de posturas. A primeira contém posturas para diversas situações genéricas de trabalho: subindo escadas, rastejando, dirigindo, contando com os dedos, ajoelhado, em posição supinada, apontando, alcance com membros superiores, cumprimento militar, sentado, em pé, digitando e empurrando. A segunda possui posições pré-definidas para pegar objetos com as mãos. Na Figura 3-4 são mostrados exemplos das duas bibliotecas existentes no *software*.

Figura 3-4: Bibliotecas de posturas no HB2



Fonte: Autor

O DELMIA não permite a importação de movimentos capturados. Para utilização de sistemas de MoCap é necessário existir *plugins* desenvolvidos especificamente para possibilitar tal interação. Nesta pesquisa está sendo utilizado o RTI que permite integração do sistema de MoCap MVN com os *softwares* da Dassault Systèmes (CATIA e o DELMIA).

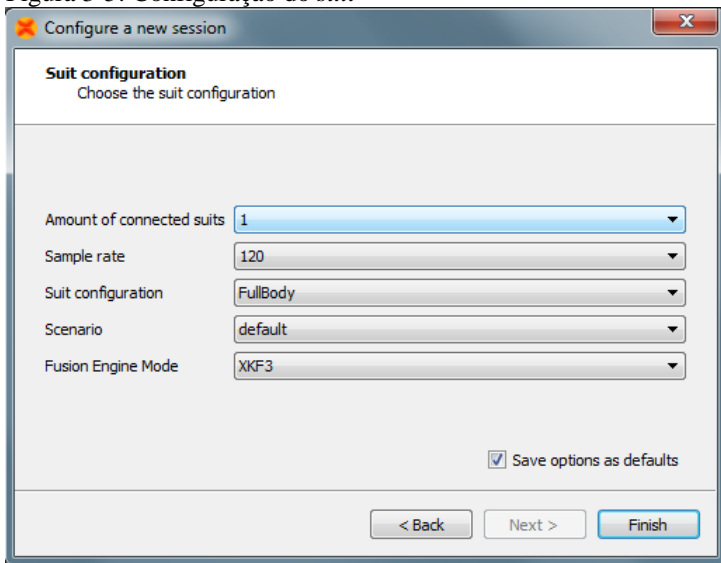
3.2.3 Processo de integração do sistema

O processo de integração será descrito partindo-se da montagem do sistema de captura de movimentos. Também é possível ser iniciado pela criação do manequim digital no Human Builder. Independentemente da escolha são necessários os mesmos procedimentos aqui descritos.

O sistema de MoCap possui cinco etapas de configuração que devem ser realizadas antes de iniciar o processo de gravação dos movimentos capturados. A primeira etapa é a fixação dos sensores inerciais, centrais de processamento de dados e ligação dos fios no corpo de captura, conforme configuração da Xsens demonstrado no Apêndice 1 (MVN Configuration Sheet FullBody).

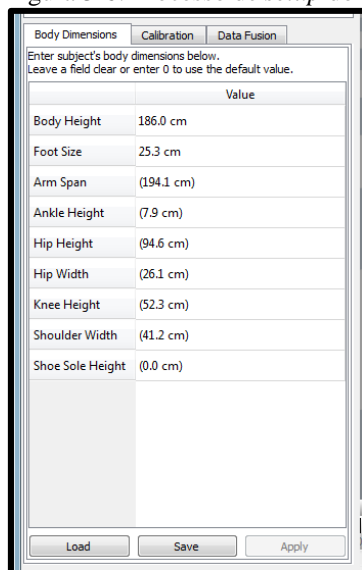
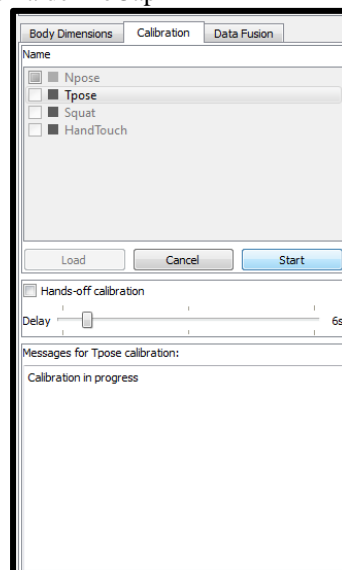
A segunda etapa é a definição das configurações do *suit* para iniciar o processo de captura (Figura 3-5) onde são definidos:

- **Quantidade de *suits*:** cada *suit* é composto de 17 marcadores, que representam a quantidade de marcadores montado no corpo de captura. Desta forma, cada *suit* representa a quantidade de humanos a serem capturados os movimentos;
- **Taxa de amostragem:** taxa na qual é realizada a transmissão do posicionamento dos sensores para a captura no notebook. O sistema permite três taxas (1, 2 e 3). Para os experimentos foi definida a maior taxa possível de 120;
- **Configuração do *suit*:** escolha da estrutura e composição do *avatar* que reproduzirá os movimentos capturados;
- **Cenário:** representa a configuração da cinemática desenvolvida pelo *avatar*. Os cenários disponíveis são: padrão, com a pélvis fixa e de piso flexível;
- **Modo de utilização dos magnetômetros:** define a forma como os magnetômetros serão utilizados durante a captura para diminuir os efeitos do *drift*. Existem três modos: i) *Kinematic Coupling Algorithm* (KiC), que ignora os dados dos magnetômetros dos marcadores localizados nos membros inferiores (coxas, pernas e pés), durante a movimentação do corpo de captura, são utilizados em períodos onde não ocorrem movimentos (corpo de captura permanece parado e posição em pé), para determinar a posição do corpo de captura, ii) KiC sem os magnetômetros, que desativa o uso deste durante todo o período de captura e iii) XKF-3 que utiliza os magnetômetros e o filtro de *Kalman* para estimar a orientação dos membros inferiores.

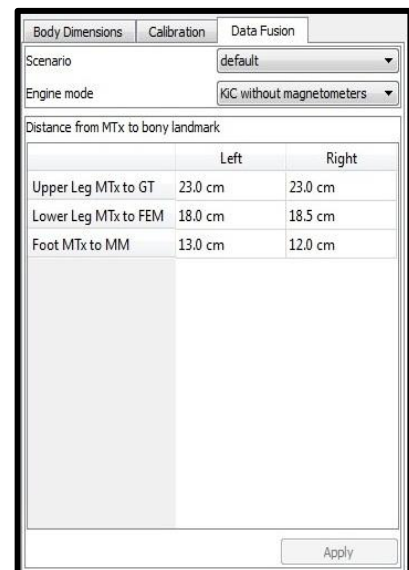
Figura 3-5: Configuração do *suit*

Fonte: Autor

A terceira grande etapa é o *setup* do *suit*, onde são realizados procedimentos para compatibilizar o corpo de captura com *avatar* do MVN. Nesta etapa são definidas as medidas antropométricas do corpo de captura, calibração e configuração das distâncias dos sensores até os pontos anatômicos (membros inferiores). Esta última configuração é utilizada como parâmetro para utilização dos magnetômetros. Portanto, está disponível para os modos KiC e XKF-3. As configurações descritas são ilustradas na Figura 3-6.

Figura 3-6: Processo de *setup* do sistema de MoCap(a) antropometria do *avatar*

(b) calibração



(c) parametrização dos magnetômetros

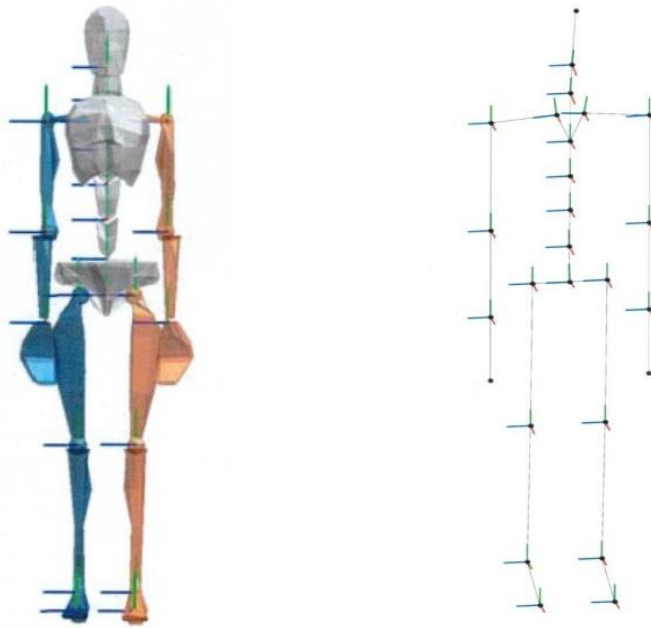
Fonte: Autor

É possível editar apenas nove medidas: altura, comprimento do pé, envergadura, altura até o tornozelo, altura até o quadril, largura do quadril, altura até o joelho,

largura dos ombros e altura da sola (calçado). Outra forma de definir o as medidas é utilizando o modelo antropométrico interno do sistema. Este modelo calcula sete medidas automaticamente (envergadura, altura até o tornozelo, altura até o quadril, largura do quadril, altura até o joelho, largura dos ombros e altura da sola), conforme os valores determinados para duas medidas (altura e comprimento do pé).

O *avatar* MVN possui duas estruturas. A primeira é o esqueleto que representa os segmentos. Este esqueleto possui uma representação abstrata, em comparação com o corpo humano. A segunda estrutura são os marcadores anatômicos, posicionados nas extremidades dos segmentos. Estes marcadores são virtuais derivados dos marcadores inerciais acoplados no corpo de captura (Figura 3-7). Os segmentos são considerados como corpos rígidos, com suas extremidades articuladas pelos marcadores anatômicos, possibilitando rotação nos três eixos.

Figura 3-7: Estruturas do *avatar* do MVN

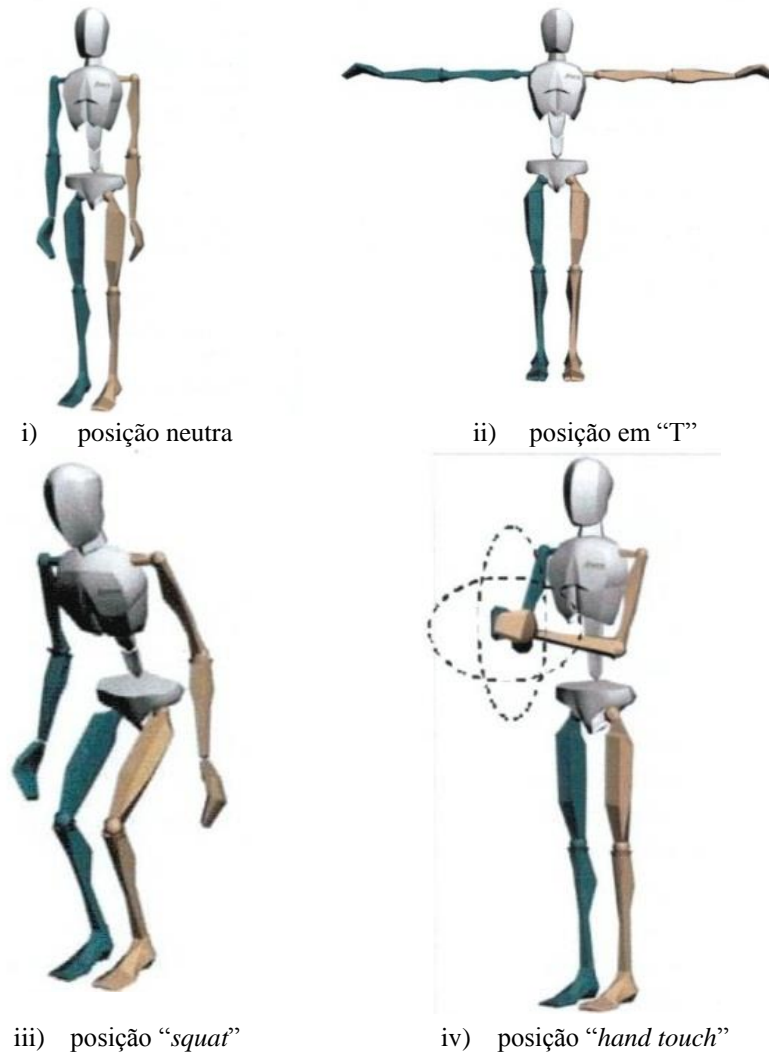


Fonte: Xsens (2012)

A calibração pode ser realizada em quatro diferentes posições: posição neutra (postura “N”), posição com braços abduzidos (postura “T”). Estas duas posições de calibração são obrigatórias para iniciar o processo de visualização da captura. O terceiro passo de calibração ocorre na posição de agachar, onde o corpo de captura realiza agachamentos, seguindo o *avatar* do MVN. Este passo da calibração é utilizado para corrigir possível orientação incorreta dos joelhos, nas duas primeiras posições de calibração. O último passo de calibração consiste do corpo de captura seguir os movimentos realizados pelo *avatar* do MVN

para melhorar a calibração dos membros superiores. Na Figura 3-8 são mostradas as posturas do *avatar* para calibração.

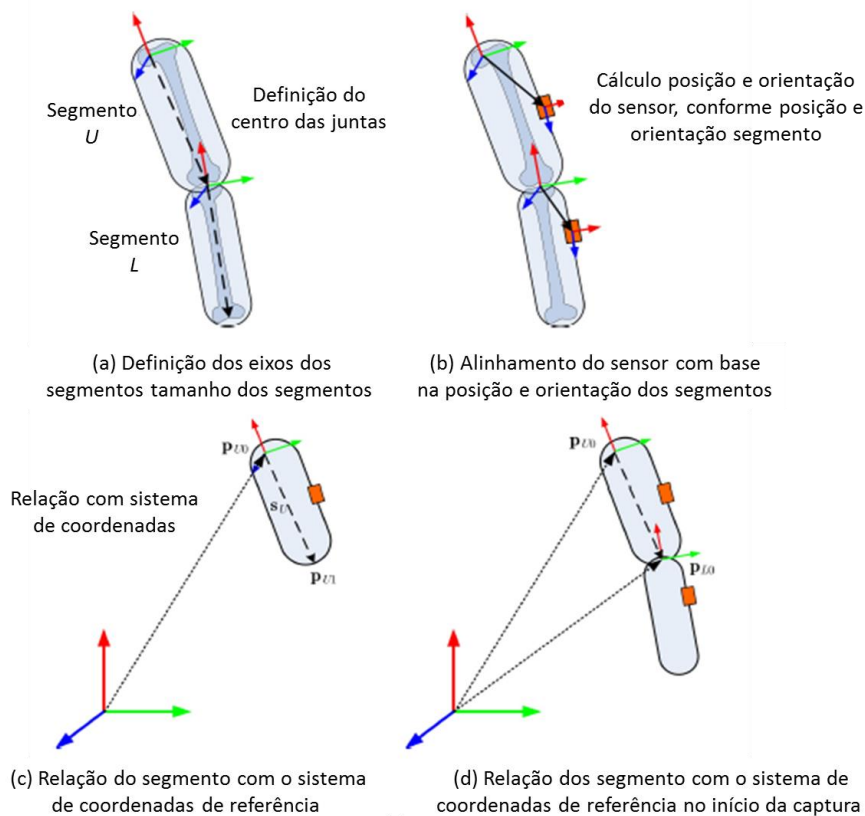
Figura 3-8: Posições de calibração



Fonte: Xsens (2012)

O objetivo da calibração é alinhar o sistema de coordenadas dos sensores inerciais com os segmentos no sistema de referência relativo para realização dos movimentos e determinar a distância relativa entre as juntas (ROETENBER, LUINGE e SLYCKE, 2013). Desta forma todas as articulações são referenciadas em relação ao mesmo ponto de origem. (Figura 3-9).

Figura 3-9: Processo de calibração dos marcadores



Fonte: Traduzida de Roetenberg, Luinge e Slycke (2013)

A qualidade da calibração é afetada pela presença de materiais ferromagnéticos. O próprio *software* indica a existência de campos magnéticos externos, indicando ao usuário, a impossibilidade de realizar a calibração no local onde se encontra o corpo de captura. A Figura 3-10 mostra a presença de materiais ferromagnéticos durante a calibração, com a escala de cores indicando a influência do campo.

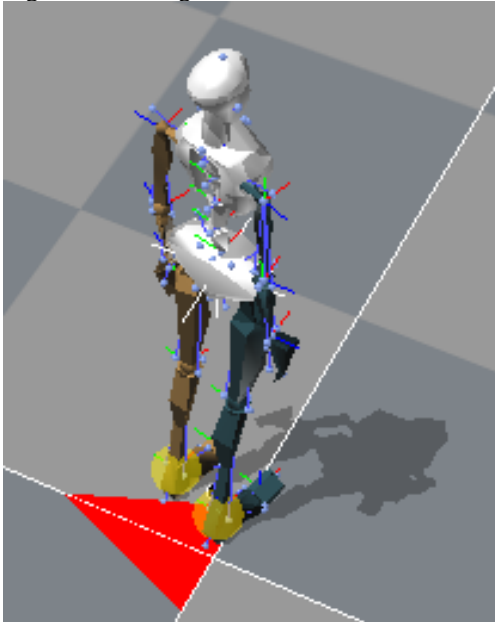
Figura 3-10: Presença de materiais ferromagnéticos na etapa de calibração



Fonte: Autor

Com a realização da calibração na posição neutra, é gerado o sistema de coordenadas local relativo, baseado nos marcadores, com o origem representada pelo triângulo vermelho (Figura 3-11), determinando o ponto inicial (0,0,0) pelo calcanhar direito do *avatar*. Também é possível calibrar o cenário de captura, que alinha a o *avatar* com a direção do eixo x.

Figura 3-11: Origem do MVN Studio



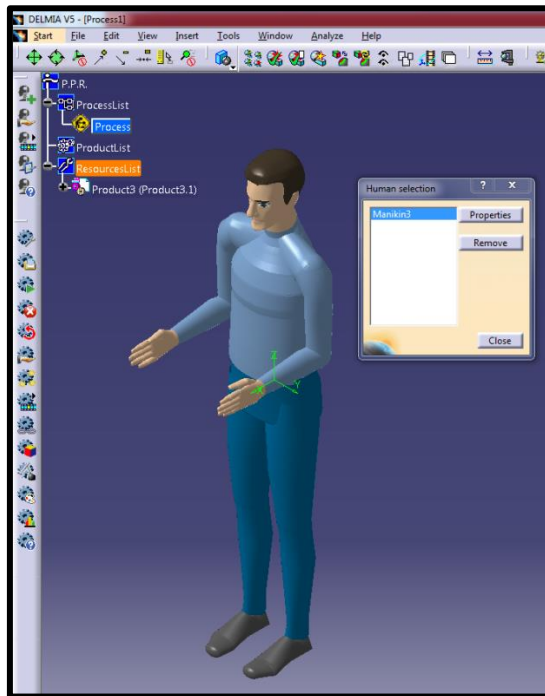
Fonte: Autor

Após as etapas de configuração do MVN concluídas, é possível a integração dos movimentos do MVN com o DELMIA (Figura 3-12). A integração é possível nas ferramentas de *Task Simulation*. Ressalta-se que é possível integrar o MVN-DELMIA com capturas previamente salvas no *software* MVN Studio. Esta etapa possui os seguintes passos:

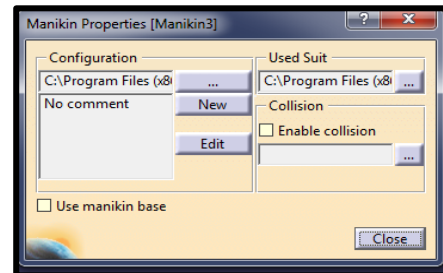
- definição do manequim “Human” a ser utilizado na simulação: este manequim criado, anteriormente a simulação, já contém a definição de suas características, especialmente as medidas antropométricas;
- determinação da origem e posicionamento dos pontos articulados do MVN: o *plugin* RTI (Haption) possui duas configurações que modificam a posição inicial do *Human* no sistema de coordenadas do DELMIA, no momento da simulação. A primeira é utilizar o manequim do “Human” como base para receber as articulações provenientes do MVN, e segunda, é utilizar uma geometria (“carpete mágico”) que permite transladar o ponto de origem das articulações do MVN, para o ponto de origem da geometria;

- Processo de *retargeting*: com a escolha do ponto de origem das articulações do MVN, pode-se realizar o procedimento de *retargeting*. O *plugin* permite realizar uma calibração para aumentar a qualidade da integração. Esta calibração consiste em sobrepor o modelo articulado do MVN com a *Human*, na postura em “T” antes do procedimento de *retargeting* entre MVN e o *Human*.

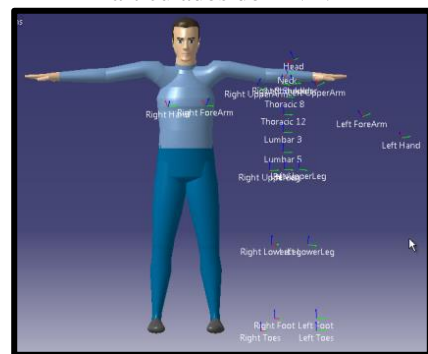
Figura 3-12: Etapas de integração do sistema no *plugin* RTI e DELMIA



(a) definição do *Human*



(b) origem e posicionamento dos pontos articulados do MVN

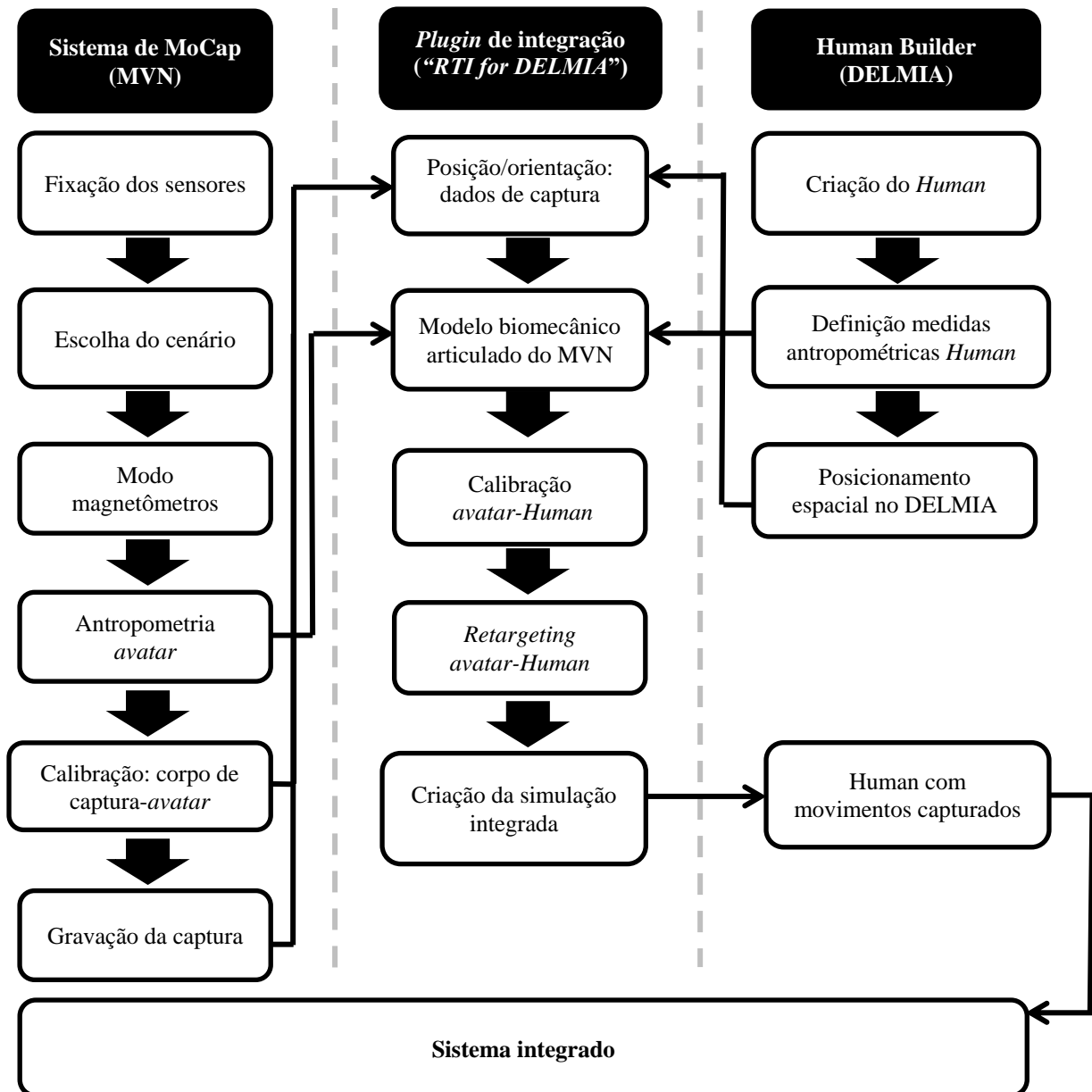


(c) *retargeting* MVN-*Human*

Fonte: Autor

Com o processo de integração completo, pode-se começar a movimentação do corpo de captura, conforme os objetivos da simulação e gravação dos movimentos no DELMIA. No fluxograma apresentado na Figura 3-13 são mostradas todas as etapas do processo de integração.

Figura 3-13: Processo de integração do MVN com DELMIA



Fonte: Autor

3.3 Delineamento experimental

3.3.1 Variáveis de pesquisa

Com a descrição do processo de integração do sistema e o leque de configurações existentes, são definidas as variáveis que serão experimentadas buscando observar seus efeitos ao longo do processo de integração. Todas as configurações apresentadas são independentes entre si, ou seja, a definição de uma configuração, não determina o valor outra. Porém, ocorre a interação entre diferentes configurações que determina os resultados da simulação. Buscando responder as questões de pesquisa, as configurações foram agrupadas em diferentes classes, conforme sua ferramenta e seus efeitos na geração da simulação (Quadro 3-1).

Quadro 3-1: Problemas de pesquisa e variáveis experimentais

Problemas de pesquisa	MVN	RTI	Human Builder (DELMIA)
Mitigação do <i>drift</i>	Modo de utilização dos magnetômetros		
	Qualidade da calibração		
	Tratamento dos dados capturados		
	Reinicialização dos sensores		
Posicionamento de objetos em ambiente virtual	Calibração do cenário	Manequim como base "Carpete mágico"	
Compatibilização antropométrica	Modelo antropométrico automático Modelo antropométrico detalhado		Medidas antropométricas
Reprodução dos movimentos no DELMIA	Definição do Cenário de captura		

Fonte: Autor

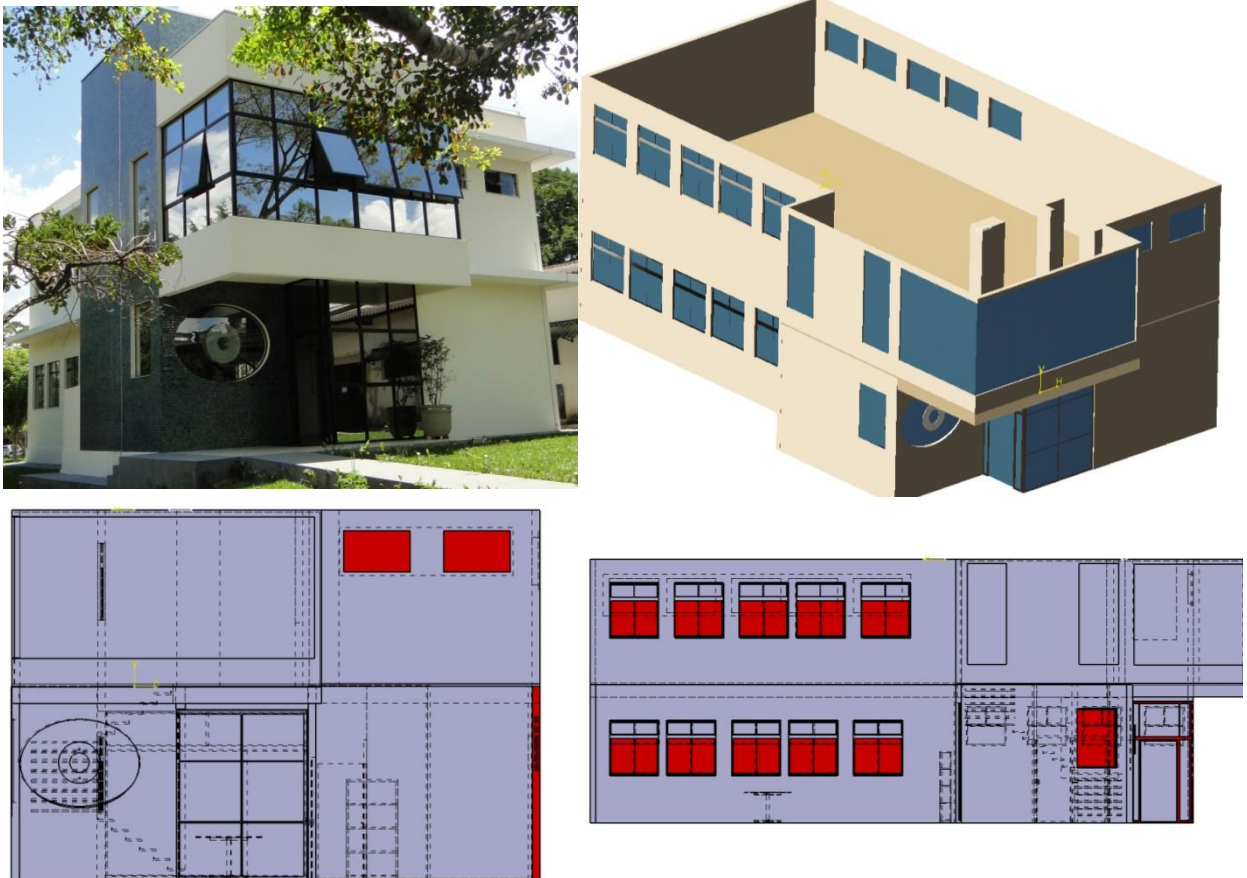
A relação de dependência ocorre apenas em uma condição: quando é determinado a não utilização dos magnetômetros durante a simulação, que elimina a possibilidade de definir a parametrização da distância entre os sensores dos membros inferiores e os pontos anatômicos. Com a definição das classes de variáveis envolvidas em cada experimento, é possível realizar o planejamento dos experimentos. Para descobrir o

efeito isolado de cada configuração e os efeitos combinados de interação entre elas, foi determinado delineamento fatorial.

3.3.2 Metodologia dos ensaios

Os ensaios foram realizados no piso térreo do PSPLab, na sala construída para estudos e desenvolvimento de novas tecnologias. O prédio (ambiente virtual) foi modelado no DELMIA utilizando-se as cotas contidas no Projeto Executivo oficial. Em seguida foi verificada a acurácia das medidas contidas na planta com o prédio real, utilizando-se uma trena digital. Com isto foi detectado uma pequena diferença (aproximadamente 5cm) com relação ao espaço livre (distância entre paredes). Esta diferença foi corrigida no ambiente virtual para garantir confiabilidade entre as medidas no prédio real com prédio digital. Na Figura 3-14 é apresentada a modelagem do prédio no qual foram realizados os ensaios.

Figura 3-14: Prédio PSPLab modelado em ambiente virtual



Fonte: Autor

Para realização da análise do processo de integração do sistema, cada ensaio possuirá diferentes preparações, variáveis de controle, protocolo e técnica de coleta dos dados.

3.3.2.1 Ensaio 1: posicionamento espacial de ambiente virtual

O espaço foi explorado buscando um ponto onde não havia efeito de campos magnéticos que poderiam intervir no processo de calibração. Para isto os sensores foram montados no corpo de captura e uma exploração do térreo foi realizada previamente. O ponto encontrado foi definido como sendo o ponto de realização da calibração, estabelecendo a origem e sistema de coordenadas do MVN (Figura 3-16). Esta origem foi demarcada no piso e criado um eixo de coordenadas (x,y), como sendo a referência para a movimentação do corpo de captura (Figura 3-15). Este sistema de coordenadas será denominado de sistema R (Real). Esta origem também foi demarcada no ambiente virtual do DELMIA através da medição das distâncias em relação às paredes do fundo e lateral do prédio e duas linhas guias foram traçadas cortando o eixo coordenado estabelecido como referência para de movimentação (Figura 3-17).

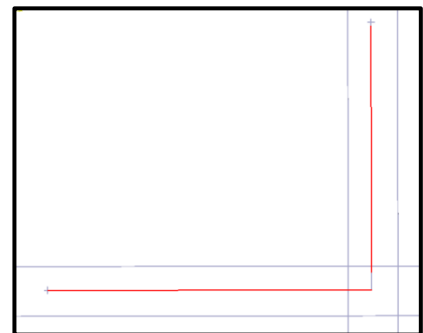
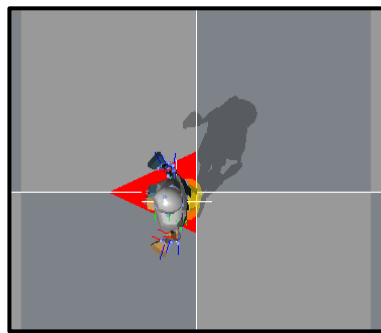
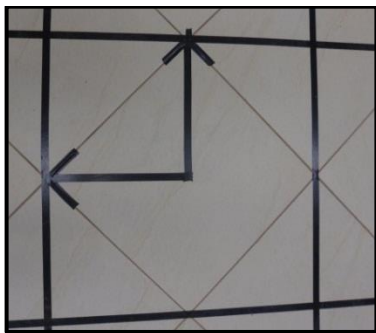


Figura 3-15: Sistema de coordenadas para movimentação do corpo de captura (sistema R)

Figura 3-16: Sistema de coordenadas para movimentação do avatar do MVN Studio (sistema MVN)

Figura 3-17: Sistema de coordenadas para movimentação no ambiente virtual (sistema V)

Fonte: Autor

Como o MVN utiliza o calcanhar direito como ponto de referência do *avatar*, o mesmo ponto foi definido como ponto de referência do Human Builder (DELMIA). Foi avaliado os efeitos das configurações do sistema (Quadro 3-2) quanto ao sistema de coordenadas do manequim digital no sistema V.

Quadro 3-2: Delineamento fatorial para posicionamento espacial em ambiente virtual

Posicionamento espacial em ambiente virtual		Calibração da cena	
		Sim	Não
Configuração RTI	Manequim como base		
	"Carpete mágico"		
	Padrão		

Fonte: Autor

O ensaio foi realizado respeitando os seguintes passos:

- Realização de captura de movimentos onde o corpo de captura se movimentou linearmente no sistema de coordenadas Real traçado no piso, até atingir os pontos de referência com o pé direito a partir da origem nos eixos x e y. Foram realizadas duas capturas: calibrando e não calibrando o cenário;
- Integração das capturas, realizadas no passo anterior, utilizando as três configurações possíveis para o RTI (manequim como base, carpete mágico e configuração padrão);
- Observação do ponto de origem dos movimentos provenientes do MVN e do sistema de coordenadas de movimentação do manequim Human durante a integração.

Os dados obtidos foram analisados comparando-se os três sistemas de coordenadas dos três *softwares* que forma o sistema: i) sistema de coordenadas Real, com ii) sistema de coordenadas do MVN e com iii) sistema de coordenadas Virtual (DELMIA), avaliando-se a origem, direção e sentido do corpo de captura com relação à origem, direção e sentido avatar do MVN e do Human. Os conjuntos de configurações que não apresentaram sobreposição entre os sistemas Real e Virtual foram elaborados procedimentos de correção utilizando as ferramentas CAD do DELMIA de translação e rotação.

Para diminuir o efeito do *drift* com o tempo, para cada conjunto de variáveis, os sensores serão reinicializados e, a calibração (previamente salva), será recarregada para o *avatar* do MVN.

3.3.2.2 Ensaio 2: mitigação do drift

Com a definição dos procedimentos para posicionamento espacial do ambiente virtual de forma a se aproximar, com a melhor acurácia possível, a posição do prédio físico, foi avaliado a evolução do *drift* ao longo do tempo de captura e, através da experimentação

das formas de configurar os sensores e tratamento dos dados capturados, conforme o delineamento apresentado no Quadro 3-3.

Quadro 3-3: Delineamento fatorial para mitigação do *drift*

Mitigação do <i>drift</i>		Tratamento dados de captura		Reinicialização dos sensores
		Não	Sim	
Modo dos magnetômetros	KiC			
	KiC sem magnetômetros			
	XKF-3			

Fonte: Autor

O procedimento experimental consistiu nas seguintes etapas:

- **realização de captura de movimentos:** captura de movimentos com cada um dos três modos de utilizar os magnetômetros. Os movimentos realizados com cada configuração compreenderam em desenvolver um trajeto previamente definido com algumas ações como sentar-se em uma cadeira, pular uma caixa e andar entre obstáculos, conforme ilustrado na Figura 3-18. Cada percurso foi iniciado e finalizado na origem do sistema de coordenadas, completando-se 1 volta. Com cada configuração foram realizadas 7 voltas que variaram de 1,2 a 1,5 minutos, totalizando tempo de captura de aproximadamente 10 minutos;
- **tratamento dos dados capturados:** realização do tratamento dos dados capturados de cada configuração, corrigindo-se a posição do ponto pivô (pé direito) do avatar em relação a origem do sistema de coordenadas;
- **realização de nova captura:** repetição do experimento com reiniciando dos sensores a cada volta, no momento que o corpo de captura está na origem do sistema de coordenadas Real;
- **medida do *drift*:** a cada volta realizada pelo corpo de captura, foi salva a posição do manequim Human no ambiente virtual. A medida de *drift* foi estabelecida como a distância entre a origem do sistema de coordenadas virtual e o ponto de referência do manequim digital Human em cada volta.

Os dados foram analisados calculando-se para cada configuração de magnetômetro o erro total acumulado ao longo das 7 voltas, ou seja, o *drift* global ocorrido durante a o tempo de captura.

Figura 3-18: Trajeto desenvolvido pelo corpo de captura durante o ensaio



Fonte: Autor

3.3.2.3 Ensaio 3: cinemática do manequim digital

Após o posicionamento espacial do ambiente virtual, mitigação dos efeitos do *drift* e compatibilidade antropométrica, foram verificadas as restrições existentes para realização de capturas de movimento, dado as características tecnológicas do sistema de MoCap, para determinar as possibilidades de interação do manequim digital com o ambiente virtual em relação aos movimentos do corpo de captura. Neste ensaio foram testadas as diferentes configurações de cenário existentes no MVN para comparar a movimentação realizada pelo corpo de captura com a reprodução destes movimentos no Human Builder (Quadro 3-4). As possibilidades de cenários foram avaliadas com o corpo de captura realizando movimentos em pé (andando), sentando (movimentado as pernas) e em escada (subindo e descendo degraus).

Quadro 3-4: Delineamento fatorial para cinemática do Human

Reprodução dos movimentos no DELMIA		Cenários MVN				
		Padrão	Piso flexível	Pélvis fixa	Pélvis fixa apertada	Vários níveis
Movimentos do corpo de captura	Andando					
	Sentado					
	Subindo e descendo degraus					

Fonte: Autor

Os procedimentos para realização deste ensaio foram:

- **preparação ambiente físico e virtual:** na origem do sistema de coordenadas Real, foi posicionado um tubo ortogonal aos eixos x e y. Este tudo foi modelado no DELMIA e posicionado na origem do sistema Virtual, sendo denominado de linha de referência de movimentação (Figura 3-19);
- **obtenção dados de captura:** foram realizadas capturas com o corpo de captura reproduzindo os movimentos definidos no protocolo com os diferentes cenários do MVN (total de 15 arquivos de captura);
- **verificação ambiente virtual:** integração, das capturas realizadas, no DELMIA dentro do ambiente virtual modelado;
- **avaliação cinemática:** comparação entre os movimentos reais realizados pelo corpo de captura e os resultados na movimentação do Human (cinemática) para cada tipo de movimento, definido no protocolo, e configuração de cenário do MVN.

Figura 3-19: Relação de referência do sistema Real com linha de referência do sistema Virtual



Fonte: Autor

Os resultados foram analisados comparando-se a movimentação do corpo de captura (movimento real), com os movimentos resultantes pelo Human (movimento digital) em relação à linha de referência de movimentação.

3.3.2.4 Ensaio 4: compatibilidade antropométrica

Neste ensaio foi avaliada a relação antropométrica existente entre os modelos antropométricos do sistema integrado (corpo de captura, MVN e Human Builder), buscando identificar se é possível compatibilizar a antropometria entre eles. Tendo como referência o modelo antropométrico humano real (corpo de captura) realizando posturas funcionais, foram testados os dois modelos antropométricos do MVN, com personalização de medidas antropométricas do Human Builder, semelhantes ao MVN (Quadro 3-5).

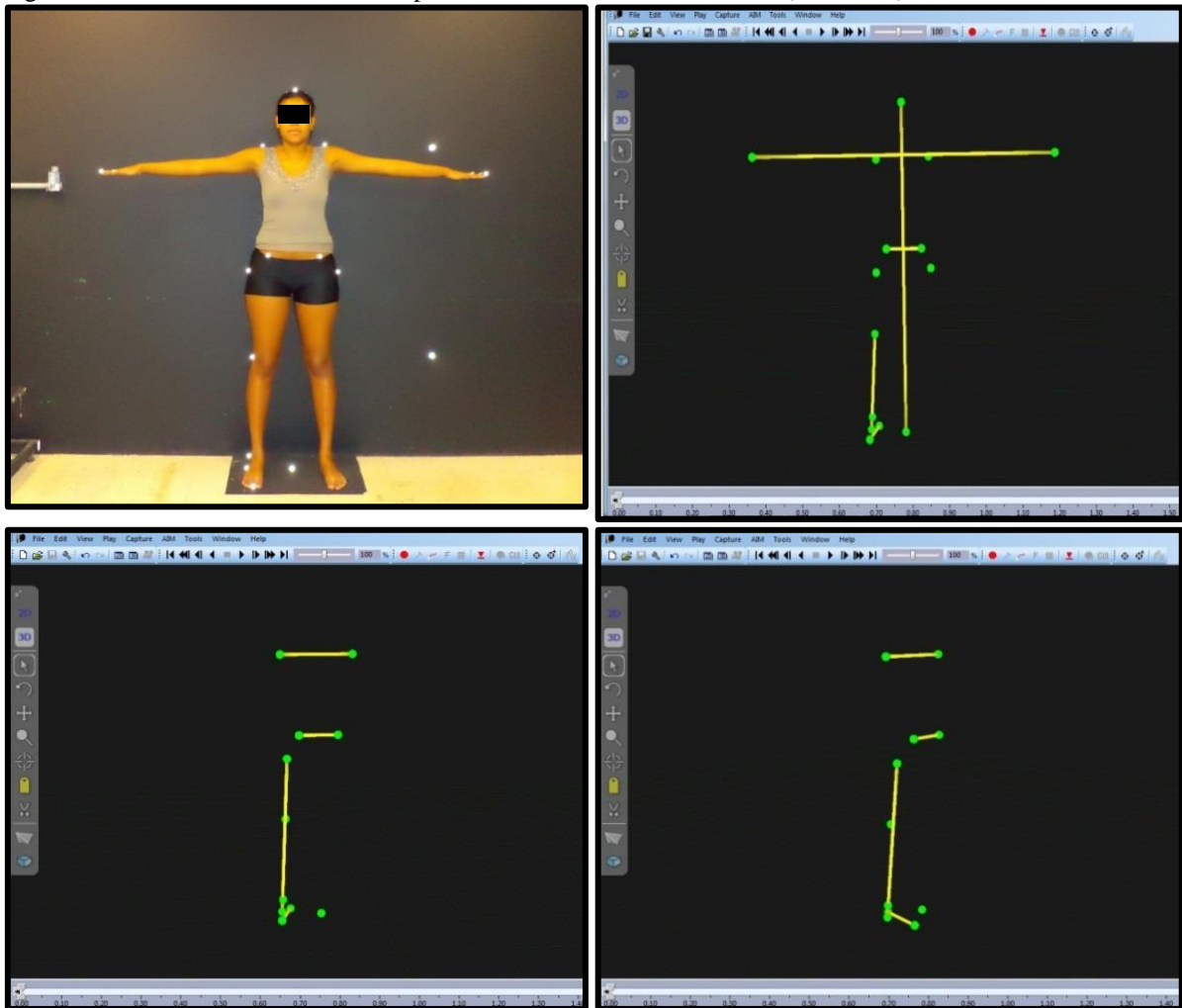
Quadro 3-5 : Delineamento fatorial para compatibilização antropométrica

Compatibilização antropométrica		Modelos antropométricos MVN	
		Modelo simplificado	Modelo detalhado
Human Measurements Editor (Human Builder)	Human simplificado		
	Human intermediário		
	Human detalhado		

Fonte: Autor

Devido às características de cada modelo antropométrico, suas medidas foram obtidas com diferentes técnicas. As medidas para o sistema de MoCap e para o Human Builder foram previamente tomadas por uma fisioterapeuta e aluna de doutorado que possui experiência em identificar as protuberâncias ósseas e pontos anatômicos do corpo humano. Esta decisão foi tomada buscando aumentar a confiabilidade das medidas antropométricas que serão utilizadas neste ensaio. A antropometria para o *avatar* do MVN foram obtidas utilizando-se um sistema de MoCap ótico Qualysis (*Qualisys Motion Capture System*). Este sistema é constituído por câmeras que captam a luz infravermelha refletida pelos marcadores posicionados no corpo de captura. Os dados de captura foram processados no *software* do sistema (*Qualisys Track Manager 2.3*) e posteriormente exportados para o *software* Visual 3D (C-Motion), possibilitando sua reconstrução tridimensional em ambiente digital (Figura 3-20).

Figura 3-20: Tomada de medidas antropométricas do MVN no Visual 3D (C-Motion)



Fonte: Autor

As medidas antropométricas do modelo biomecânico do MVN foram obtidas conforme o manual do *software* (XSENS, 2012). A descrição detalhada das medidas encontra-se no Apêndice A deste trabalho. Os resultados dos procedimentos de tomada de medidas antropométricas são apresentados no Quadro 3-6.

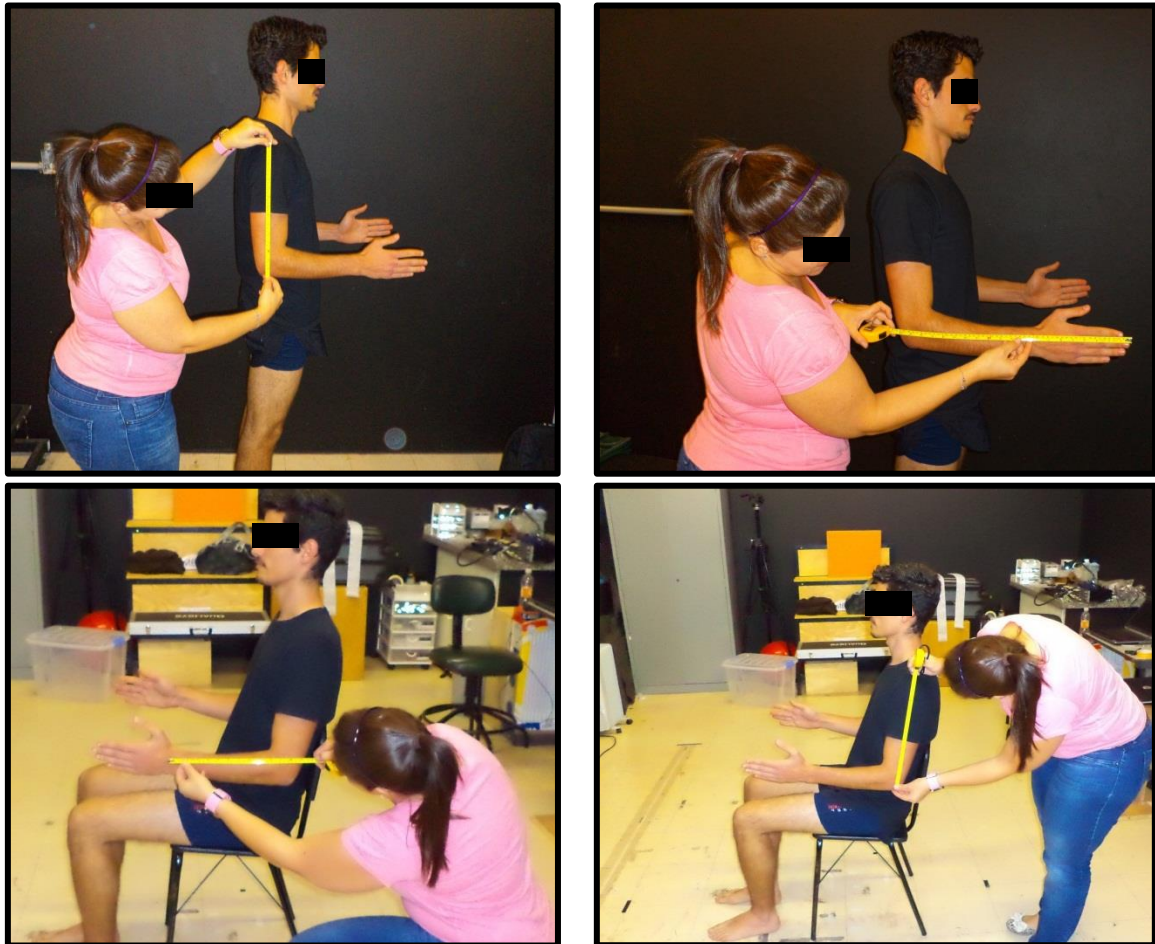
Quadro 3-6 : Medidas antropométricas dos corpos de captura para o MVN

Medidas antropométricas para o MVN	Corpo de captura (cm)
Altura	183,0
Envergadura	190,0
Tamanho pé	28,0
Altura quadril	91,0
Altura joelho	56,0
Altura maléolo	7,0
Largura quadril	22,0
Largura ombro	41,0
Espessura sola sapato	Medida a cada captura realizada

Fonte: Autor

As medidas para o Human Builder foram realizadas, posicionado o corpo de captura nas posturas pré-determinadas pelo *software* e as medidas foram tomadas utilizando-se trena (Figura 3-21). Não foi possível utilizar a mesma técnica utilizada para tomada das medidas para o MVN (Qualysis e Visual 3D), pois a maioria das medidas do Human Builder não são definidas como distâncias relativas ao próprio corpo de captura. Isto dificulta o posicionamento dos marcadores reflexivos para obtenção das distâncias. Neste processo foram realizadas as medidas referente altura, comprimento, largura, profundidade e massa corporal, excluindo-se as medidas referentes a circunferências (cintura, bíceps e outras).

Figura 3-21: Tomada de medidas antropométricas para o Human Builder



Fonte: Autor

A descrição das medidas utilizadas no Human Builder, com pontos anatômicos e os valores utilizados são apresentadas no Quadro 3-7.

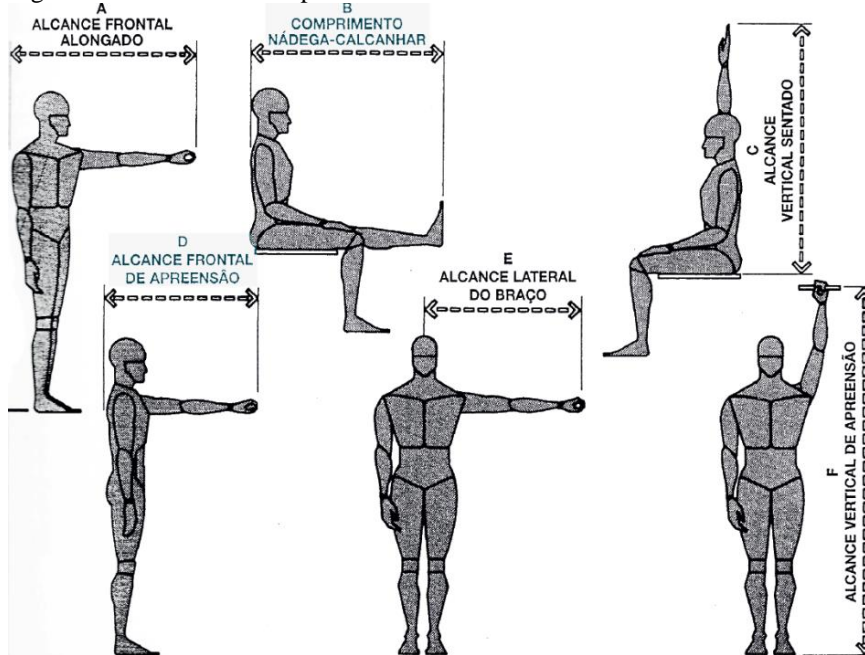
Quadro 3-7: Medidas antropométricas para o Human

Medidas	Human simplificado (cm)	Human intermediário (cm)	Human detalhado (cm)
Altura	186,0	186,0	186,0
Tamanho do pé	32,5	32,5	32,5
Envergadura		199,0	199,0
Altura até o joelho (meio da patela)		56,0	56,0
Altura até nádega		94,0	94,0
Altura maléolo		7,0	7,0
Altura do acrômio, sentado			60,0
Comprimento nádega-jelho, sentado			63,0
Comprimento antebraço-mão, sentado			51,0
Comprimento parede-pulso			68,0
Alcance até ponta do polegar			80,5

Fonte: Autor

As medidas de referência foram obtidas utilizando trena com o corpo de captura assumindo as posturas corporais funcionais apresentadas por PANERO e ZELNIK (2002) e ilustradas na Figura 3-22

Figura3-22: Dimensões corporais funcionais



Fonte: Panero e Zenilk (2002)

As dimensões corporais funcionais obtidas são apresentadas no Quadro 3-8.

Quadro 3-8: Valores para dimensões corporais funcionais

Dimensões corporais funcionais	Valores (cm)
Alcance frontal alongado	103,0
Comprimento nádega-calcanhar	125,0
Alcance vertical sentado	138,0
Alcance frontal de apreensão	84,0
Alcance lateral do braço	96,5
Alcance vertical de apreensão	226,0

Fonte: Autor

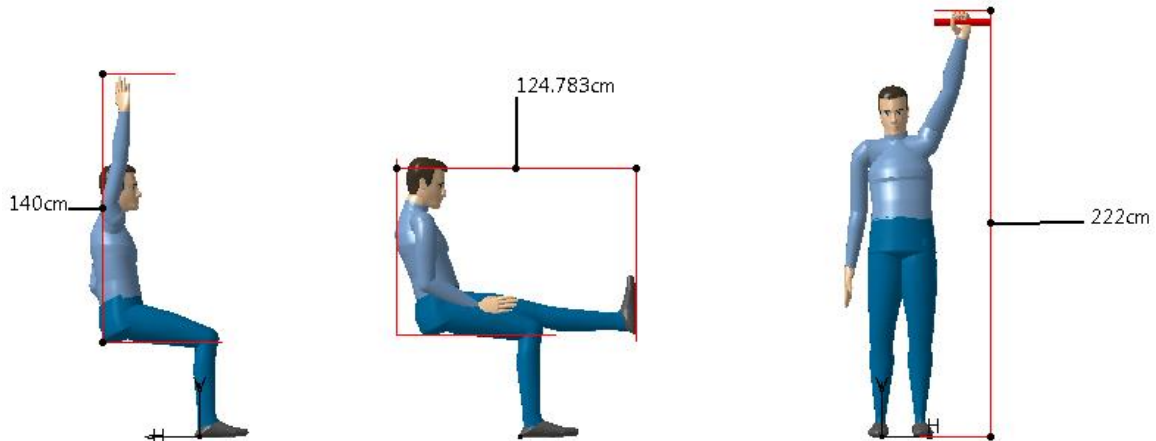
Como o MVN não captura os movimentos das mãos e o protocolo possui posturas que exigem apreensão, o corpo de captura seguiu um pedaço de tubo de PVC de 1,5 polegadas, para simular tal efeito. Ao mesmo tempo este tubo foi modelado no DELMIA e posicionado para que o manequim possa interagir com a geometria, ou seja, agarrar o tubo.

Com a coleta dos dados a serem experimentados, foi possível realizar o ensaio, com os seguintes procedimentos:

- **captura de movimentos:** foram realizadas duas capturas de movimentos, cada uma utilizando um modelo antropométrico do MVN (simplificado e o detalhado), com o corpo de captura assumindo as corporais funcionais;
- **geração de posturas:** a captura realizada foi integrada no DELMIA e gerado catálogo com as posturas do protocolo;
- **criação manequim digital no Human Builder:** foi criado um manequim digital no Human Builder genérico para iniciar os testes;
- **personalização medidas antropométricas no Human:** personalização das medidas antropométricas do Human, buscando equalizar as medidas antropométricas das posturas funcionais corporais, coletadas do corpo de captura, com os valores obtidos com o Human.

Os resultados obtidos foram coletados utilizando-se as ferramentas CAD do DELMIA, com construção de linhas de referência que representam as medidas do protocolo e medição destas no ambiente virtual. A Figura 3-23 ilustra a técnica de coleta.

Figura 3-23: Ilustração da técnica de coleta de medidas no DELMIA



Fonte: Autor

Os resultados foram analisados comparando-se quantitativamente as diferenças entre as medidas para corpo de captura e para Human, para os diferentes cenários definidos no delineamento.

3.3.3 Considerações sobre os ensaios

Os delineamentos realizados são recortes do procedimento de operação do sistema técnico. Este recorte não segue a ordem das decisões tomadas pelo usuário, no processo de integração. Esta decisão é justificada por aspectos de validade interna do método experimental, isolar tecnicamente o comportamento das variáveis envolvidas em cada delineamento experimental, para garantir a validade dos resultados. Os resultados de cada ensaio evidenciam quais esquemas de configuração do sistema técnico são efetivos para obter uma situação de captura e ambiente virtual com maior nível de fidedignidade com o cenário físico (objeto de análise e projeto), considerando os objetivos estipulados para simulação.

A descrição do processo de integração do sistema MVN-DELMIA, possibilitou o entendimento das interações entre as diferentes configurações existentes nos elementos do sistema técnico. Com isto foram elaborados os ensaios experimentais envolvendo variáveis das diferentes etapas do processo de integração (Figura 3-24).

Figura 3-24: Relação entre os ensaios e etapas do processo de integração



Fonte: O autor

Os resultados evidenciaram os efeitos causados por cada configuração e os efeitos combinados, dentro do delineamento definido para cada ensaio. Com isto, os conhecimentos gerados foram sistematizados apontando os procedimentos operacionais a serem tomados pelo usuário no uso do sistema, em formato de quadros.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

Conforme apresentado no capítulo introdutório, nesta pesquisa busca-se desenvolver procedimentos técnicos para operacionalizar o uso de uma tecnologia de captura de movimentos com *software* de modelagem e simulação de manequins digitais. A seguir são apresentados os resultados e análise dos dados coletados durante os ensaios para os diferentes recortes da tecnologia.

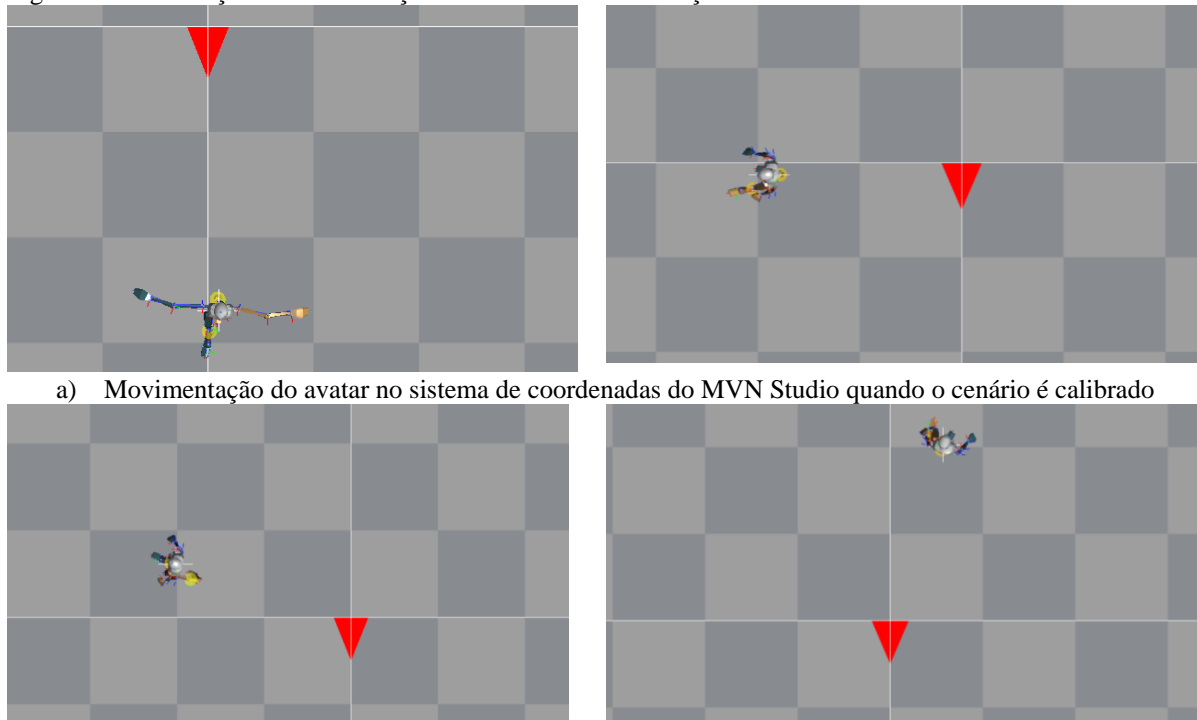
4.1 Posicionamento espacial de ambientes virtuais

4.1.1 Configuração do MVN

4.1.1.1 Calibração do cenário

A calibração do cenário faz com que o avatar do MVN se movimente na linha que divide sua origem, ou seja, em um sistema de coordenadas virtual criado pelo MVN Studio (Figura 4-1a). Quando o cenário não é calibrado, a movimentação do avatar segue o sistema de coordenadas da Terra (Figura 4-1b).

Figura 4-1: Diferença de movimentação do avatar com a calibração do cenário



a) Movimentação do avatar no sistema de coordenadas do MVN Studio quando o cenário é calibrado

b) Movimentação do avatar no sistema de coordenadas da Terra quando o cenário não é calibrado

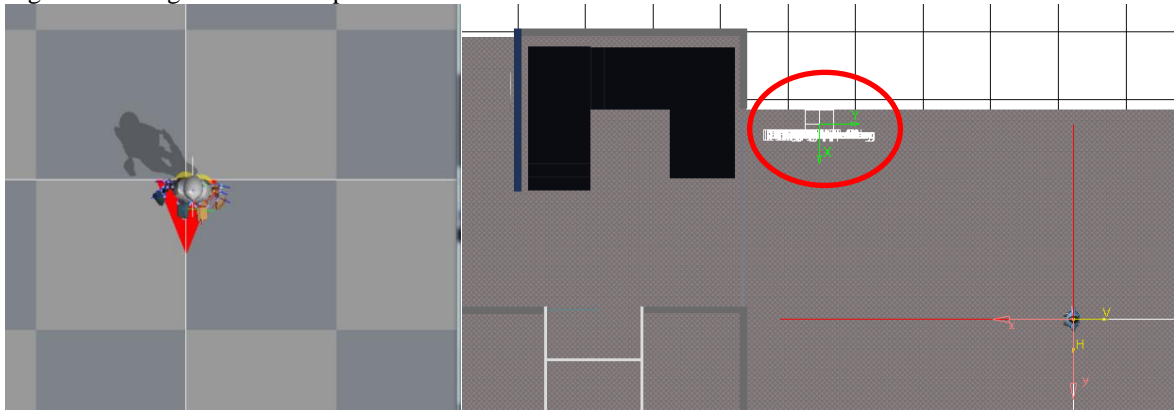
Fonte: O Autor

4.1.2 Configurações do RTI

4.1.2.1 Configuração padrão

Na configuração padrão a origem dos dados (manequim articulado do MVN) é uma projeção da origem do MVN (triângulo) no sistema de coordenadas do DELMIA, com direção e sentidos dos eixos fixos, conforme ilustrado na Figura 4-2.

Figura 4-2: Origem dos dados provenientes do MVN

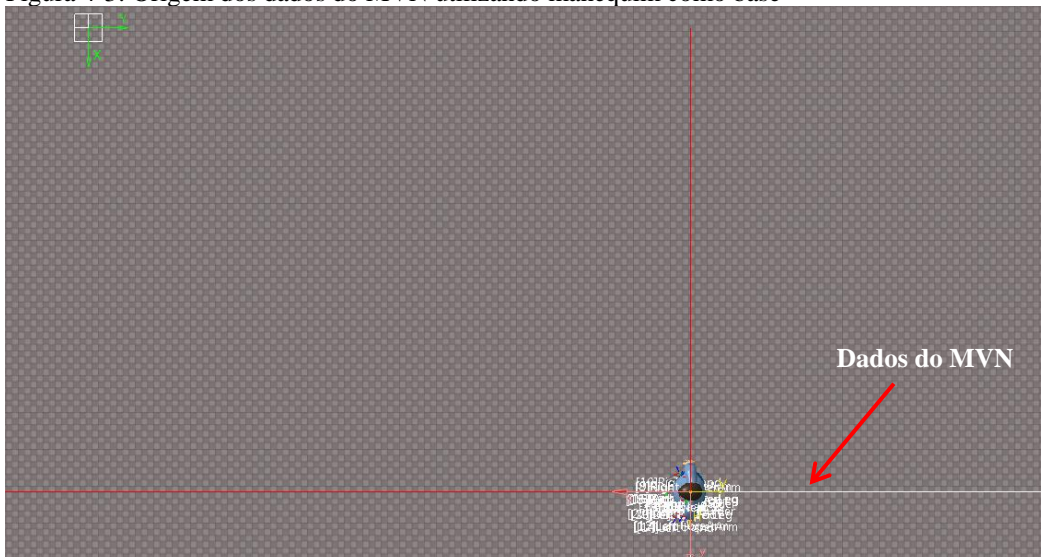


Fonte: O Autor

4.1.2.2 Manequim como base

A utilização do manequim como base faz com que a origem previamente estabelecida, seja transposta para o mesmo ponto de origem do manequim digital do Human Builder (Figura 4-3).

Figura 4-3: Origem dos dados do MVN utilizando manequim como base

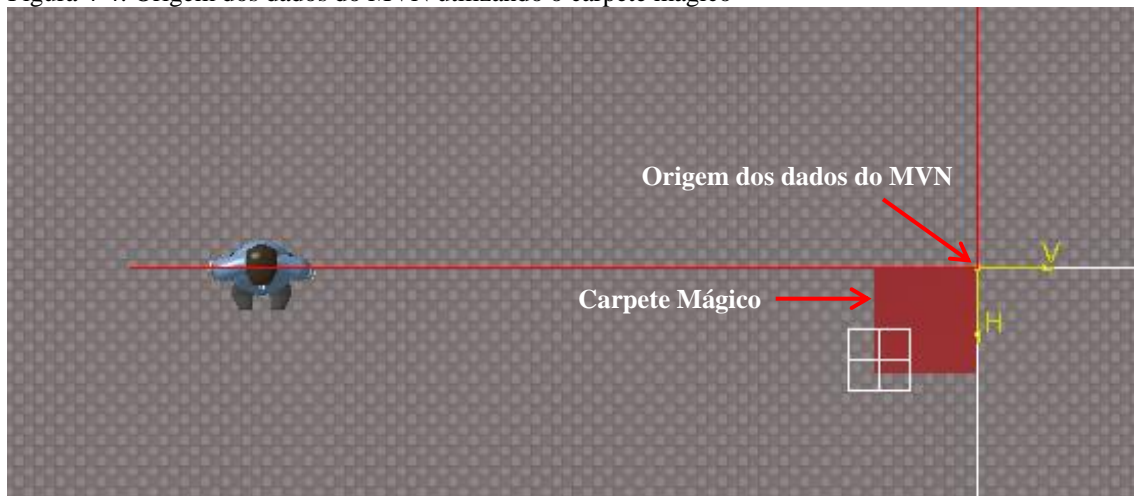


Fonte: O Autor

4.1.2.3 Carpete Mágico

O “carpete mágico” é a possibilidade de definir a origem dos dados do MVN através da utilização de alguma geometria modelada no CAD do DELMIA, definida como o “carpete mágico”. O ponto de origem é definido pelo ponto de origem da própria geometria, conforme ilustrado na Figura 4-4.

Figura 4-4: Origem dos dados do MVN utilizando o carpete mágico



Fonte: O Autor

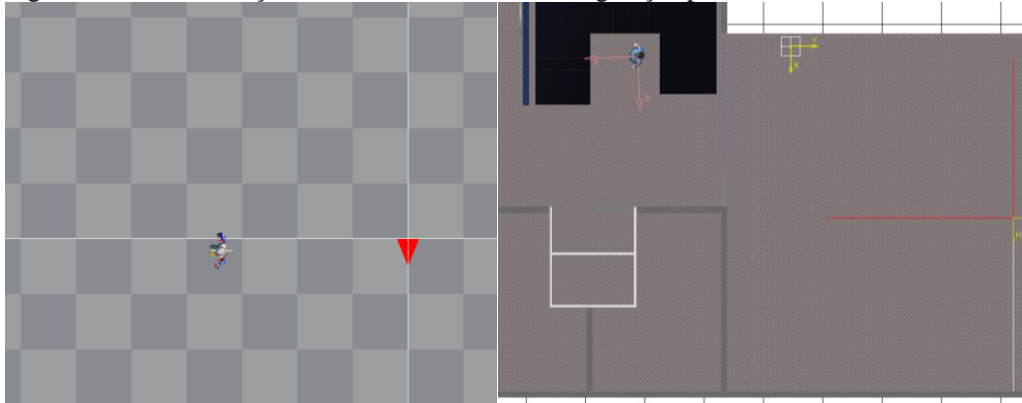
O carpete mágico pode ser utilizado em conjunto com a configuração do manequim como base, porém esta última não influencia a primeira. Quando o carpete é definido como origem dos dados, a opção de utilizar ou não utilizar o manequim como base não modifica a origem estabelecida pelo carpete.

4.1.3 Combinação de configurações

4.1.3.1 Configuração padrão RTI e com calibração do cenário

A movimentação do avatar do MVN ocorre no sistema MVN devido à calibração do cenário. Porém a origem dos dados no DELMIA é a projeção do triângulo do MVN, conforme ilustrado na Figura 4-5.

Figura 4-5: Movimentação calibrando o cenário e configuração padrão RTI



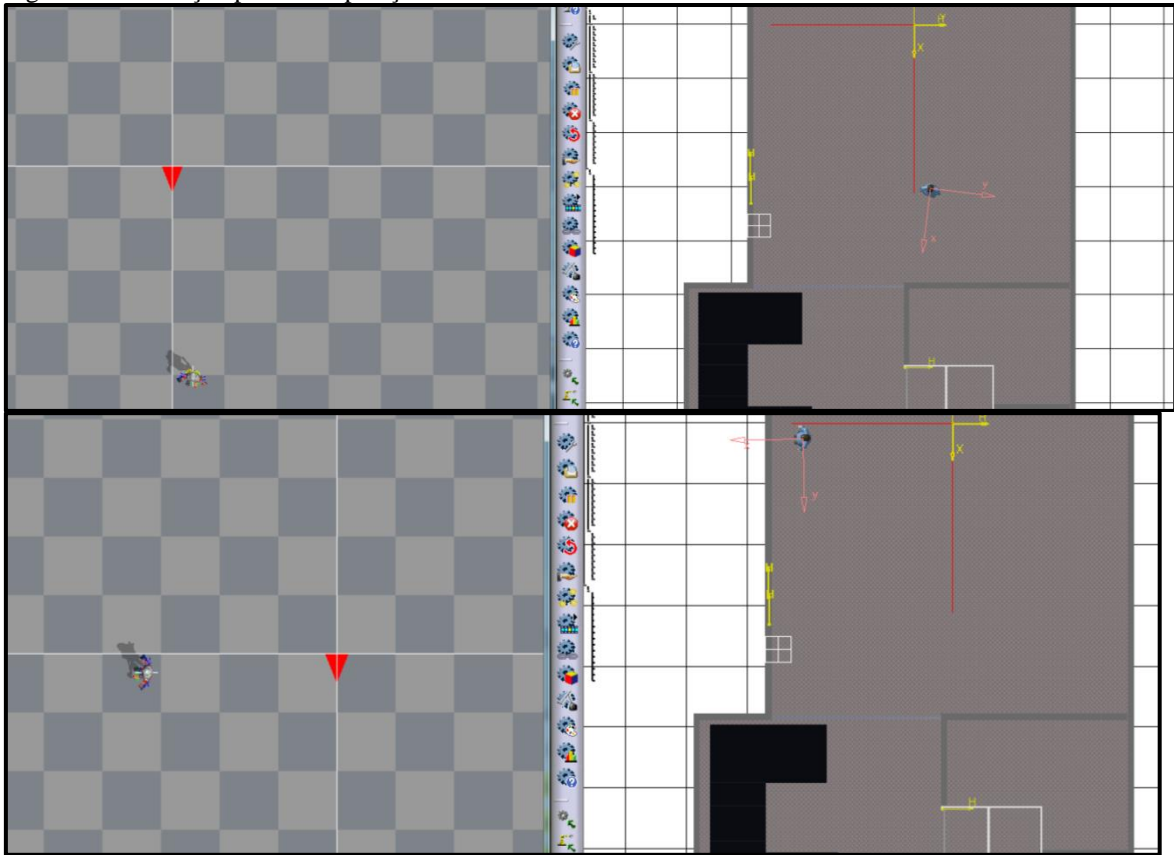
Fonte: Autor

Para possibilitar a sobreposição entre o sistema de coordenadas Real com o sistema de coordenadas Virtual são necessários dois procedimentos:

- i) Sobrepor à origem do eixo de referência do sistema Virtual com a origem do sistema projetado pelo MVN;
- ii) Rotar o ambiente virtual para que o eixo x Virtual possua mesma direção e sentido do eixo x do MVN.

A Figura 4-6 ilustra os resultados do procedimento para sobreposição dos sistemas de coordenadas.

Figura 4-6: Correção para sobreposição dos eixos coordenados

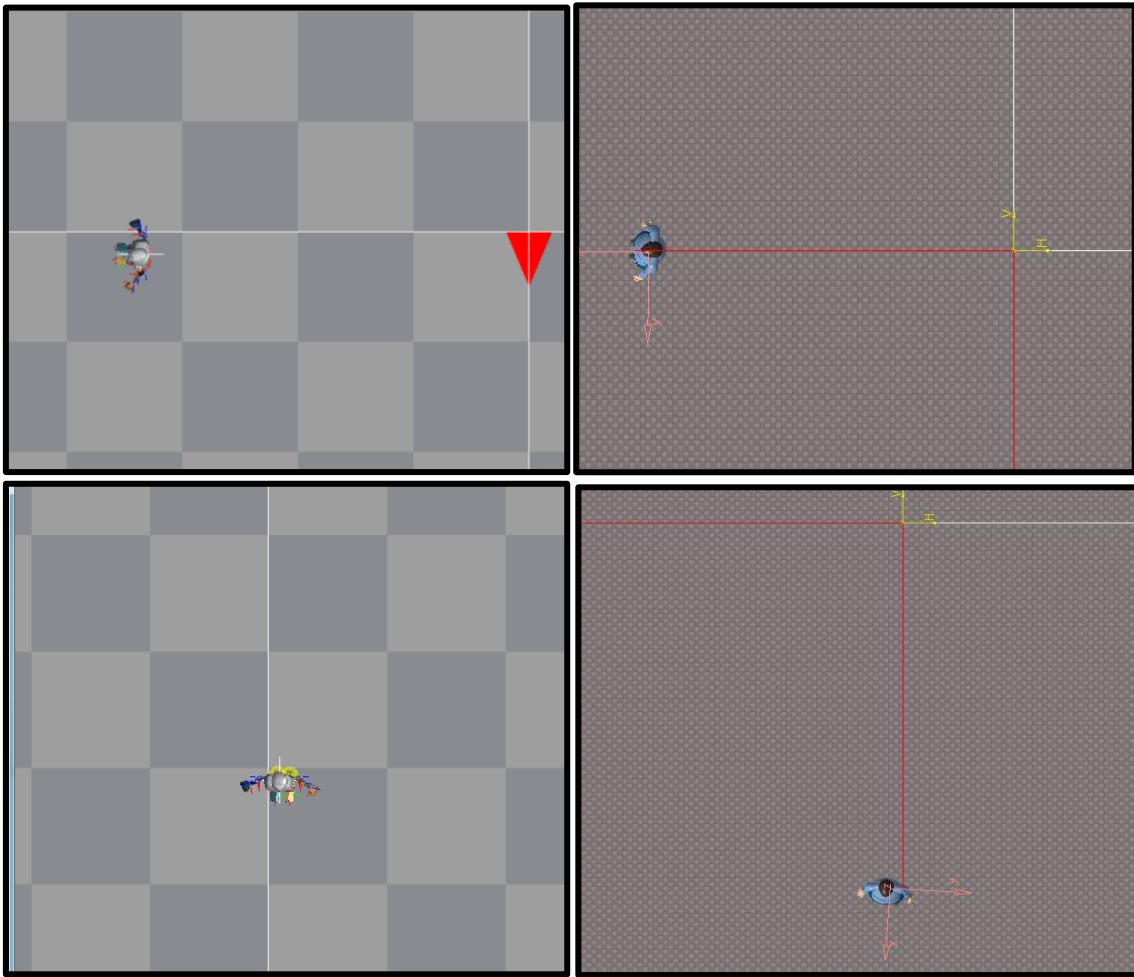


Fonte: Autor

4.1.3.2 Utilizando manequim como base e calibrando a cenário

Esse conjunto de configurações faz com que o manequim do Human se movimente na mesma direção que o sistema de coordenadas traçado virtualmente no DELMIA, conforme ilustrado na Figura 4-7.

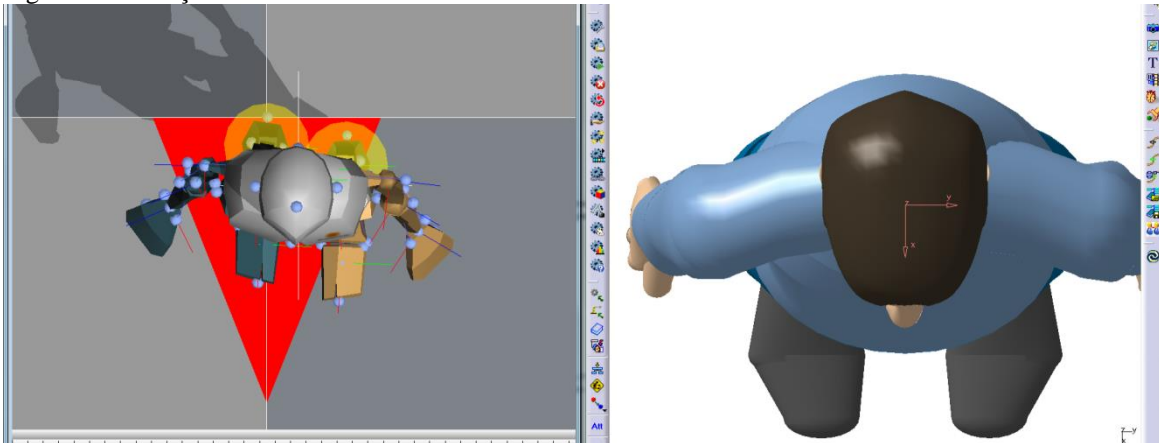
Figura 4-7: Movimentação do avatar do MVN e do Human no mesmo sistema de coordenadas



Fonte: Autor

Além disso, os movimentos do MVN seguem o sistema de coordenadas do manequim Human, ou seja, o x positivo indicado pela altura com relação à base (Figura 4-8a) possui mesma direção e sentido do x do “Human” (Figura 4-8b).

Figura 4-8: Relação entre o eixo x dos dois sistemas de coordenadas



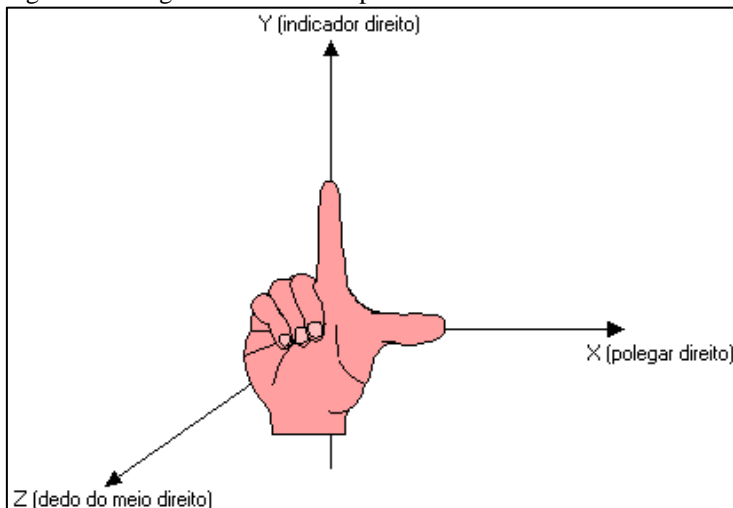
a) Eixo x positivo do MVN

b) Eixo x positivo do Human

Fonte: O Autor

A definição dos outros eixos (Y e Z) segue a lógica denominada de “**regra da mão direita**”, onde o eixo x positivo é definido pelo apontamento do dedo polegar, definindo o eixo y positivo pelo apontamento do dedo indicador e o eixo z positivo pelo apontamento do dedo do meio conforme ilustrado na Figura 4-9.

Figura 4-9: Regra da mão direita para eixos coordenados

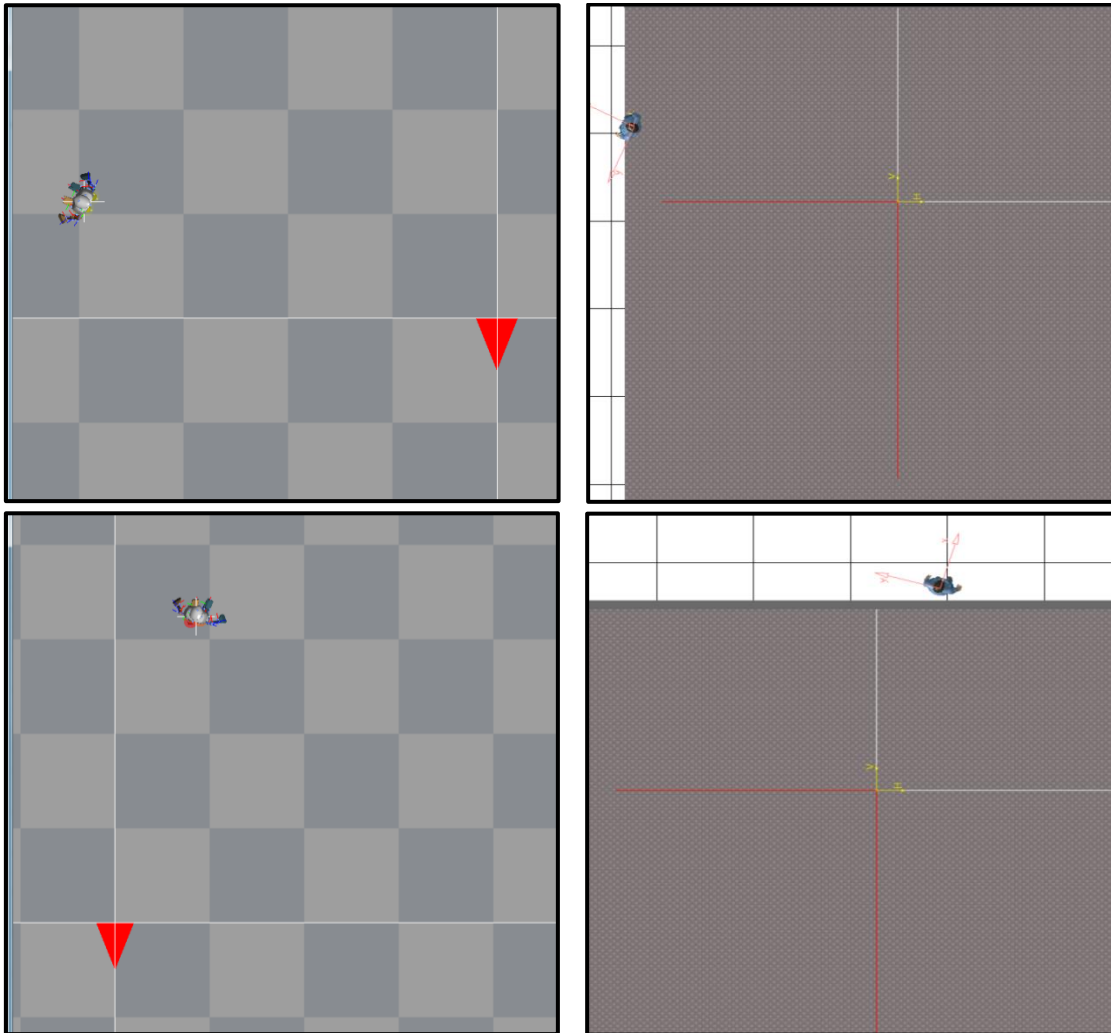


Fonte: Manssour (2000)

4.1.3.3 Utilizando o manequim como base e não calibrando a cenário

Mantendo-se o manequim como base, mas não realizando a calibração do cenário, o manequim do Human torna-se a origem dos dados do MVN, porém os movimentos são realizados no sistema de coordenadas da Terra (Figura 4-10).

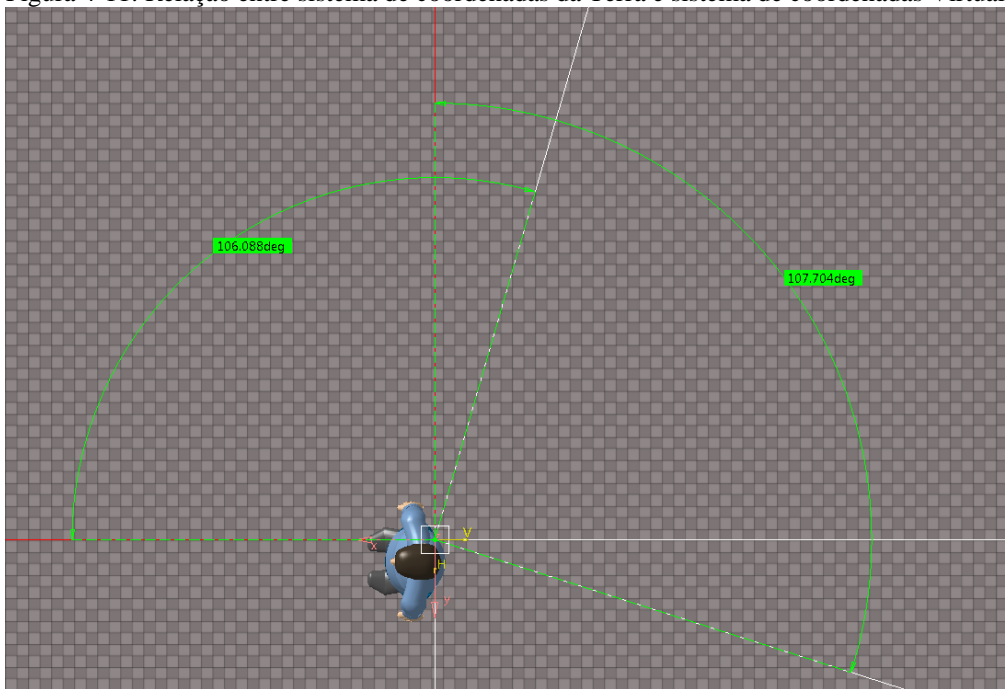
Figura 4-10: Movimentação do avatar do MVN e do Human no sistema de coordenadas da Terra



Fonte: Autor

Para corrigir o desvio entre o sistema de coordenada da Terra e o sistema virtual, foi criado um terceiro sistema de coordenadas que segue a movimentação do “Human” (sistema da Terra) durante a simulação. Desta forma é possível estabelecer uma relação entre o sistema de coordenadas da Terra e o sistema virtual criado no DELMIA, através do cálculo do desvio angular. Mantendo-se a posição e orientação do manequim do Human e girando-se o prédio com as linhas do sistema de coordenadas virtual, de forma a sobrepor as linhas do sistema da Terra, o desvio angular fica entre $106,088^\circ$ e $107,704^\circ$, conforme a Figura 4-11.

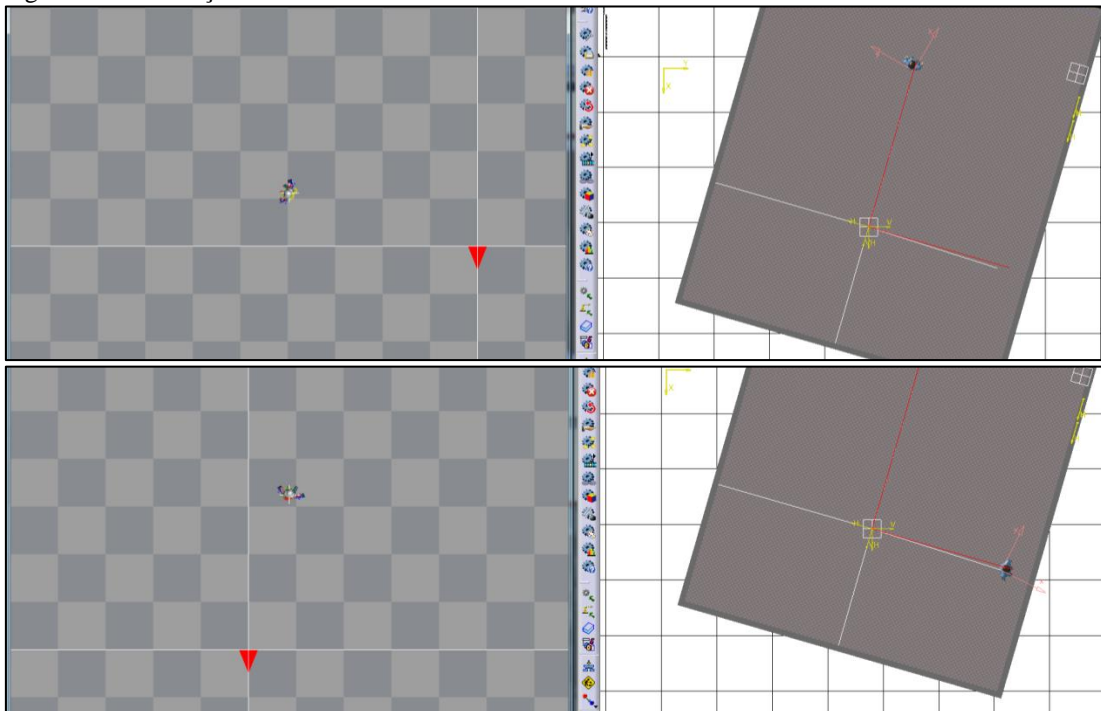
Figura 4-11: Relação entre sistema de coordenadas da Terra e sistema de coordenadas Virtual



Fonte: Autor

Este giro não modifica o sistema de coordenadas do MVN, isto estabelece uma relação entre o sistema de coordenadas do prédio físico com o ambiente virtual do Delmia. É possível observar na Figura 4-12 que a movimentação do MVN continua seguindo o sistema da Terra, mas segue o eixo de referência em relação ao prédio real, no ambiente virtual.

Figura 4-12: Correção do sistema de coordenadas da Terra com o Virtual

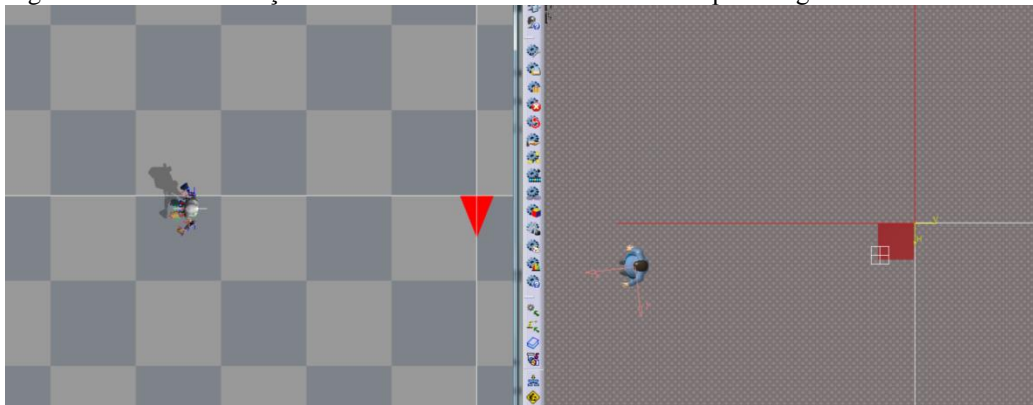


Fonte: Autor

4.1.3.4 Calibrando o cenário e utilizando “carpete mágico”

Neste conjunto de configurações o sistema de coordenadas Virtual do DELMIA é paralelo ao sistema Real e origem dos dados capturados é a origem do carpete mágico (Figura 4-13). Desta forma, é possível sobrepor às origens de ambos os sistemas de movimentação.

Figura 4-13: Movimentação calibrando o cenário e utilizando “carpete mágico”

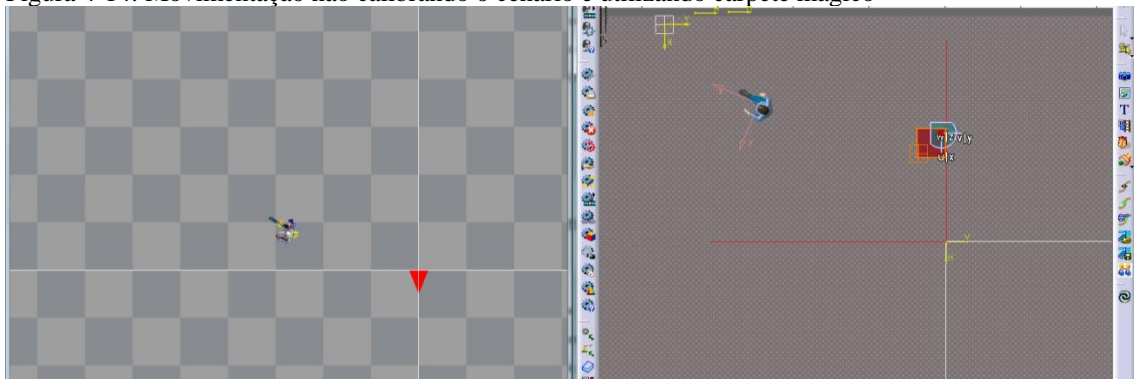


Fonte: Autor

4.1.3.5 Não calibrando o cenário e utilizando “carpete mágico”

Neste esquema, a movimentação do avatar do MVN e manequim “Human” seguem o sistema de coordenadas Global, com a origem definida pelo carpete mágico (Figura 4-14). Logo para estabelecer relação entre o sistema de coordenadas Real e o sistema de coordenadas Virtual do Delmia, é necessário posicionar o carpete mágico sobreposto a projeção do triângulo e rotar o ambiente virtual, conforme descrito no item 4.1.1.3.

Figura 4-14: Movimentação não calibrando o cenário e utilizando carpete mágico

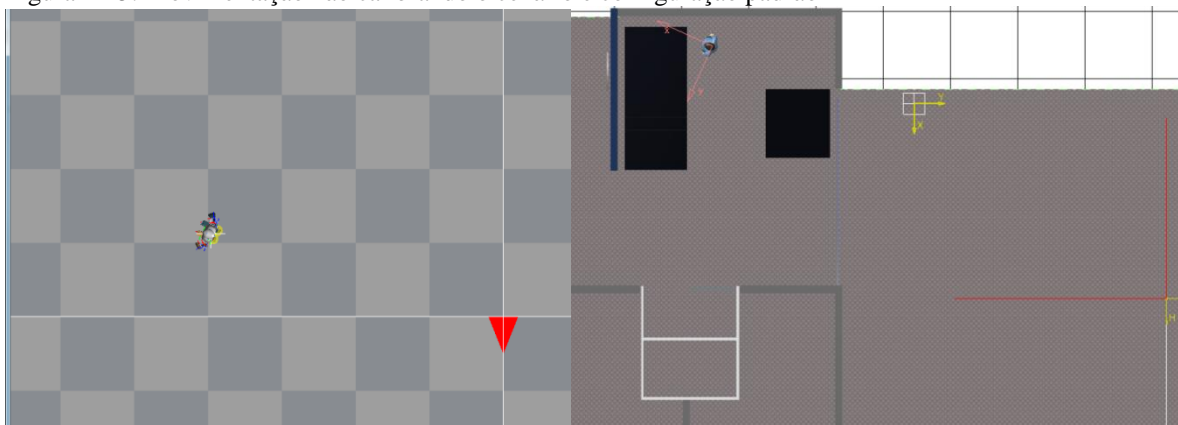


Fonte: Autor

4.1.3.6 Não calibrando o cenário e configuração padrão RTI

Neste conjunto de configurações, o avatar do MVN se movimenta no sistema de coordenadas da Terra e a origem dos dados no Delmia é a projeção do triângulo do MVN (Figura 4-15).

Figura 4-15: Movimentação não calibrando o cenário e configuração padrão RTI



Fonte: Autor

Para sobrepor os eixos coordenados Real e Virtual, são necessários:

- i) Transladar o ambiente virtual para a origem projetada do MVN;
- ii) Rotar o ambiente virtual em torno da origem para que a direção e os sentidos dos eixos x e y Virtual seja a mesma do sistema Global.

4.1.4 Análise ensaio de posicionamento espacial de ambientes virtuais

Foi possível entender o funcionamento da origem e sistema de coordenadas de dos *softwares* que compõem o sistema, tanto dos movimentos capturados no MVN, como também quando estas capturas são integradas com o DELMIA.

Para possibilitar o posicionamento espacial de um ambiente virtual na mesma posição e direção de um ambiente físico real, são necessárias duas condições impostas ao sistema de coordenadas virtual:

- i) mesma origem que o sistema real;
- ii) mesma direção e sentido no eixo x que o sistema .

No processo de captura de movimentos, a calibração do cenário gera movimentos do avatar do MVN em um sistema de coordenadas cartesiano, alinhado com o sistema de coordenadas do *software* MVN Studio. Diferentemente de quando o cenário não é calibrado, o avatar MVN se movimenta com relação ao sistema coordenado da Terra,

ignorando o sistema do *software*. Estas mesmas características são reproduzidas quando a captura é integrada com o DELMIA. É possível realizar integração entre os sistemas quando o cenário não é calibrado, porém exige exigindo esforço computacional de posicionamento do prédio no sistema de coordenadas da Terra através da sua rotação em torno do eixo Z, de forma que, as linhas do eixo de coordenadas virtual ficassem sobrepostas às linhas do eixo de coordenadas da Terra.

Já do lado do DELMIA e do *plugin* RTI, a opção de utilizar o manequim como base, faz com que a origem exista uma relação entre dos dados provenientes do MVN, com o ponto de referência do “Human”. Além disso, os eixos coordenados de ambos os *softwares* são os mesmos nesta configuração. As mesmas considerações são válidas para utilização do *carpete mágico* que funciona de forma análoga ao manequim como base, porém a relação entre os eixos coordenados não são mais estabelecidos pelo sistema do manequim digital, e sim pelo sistema no qual foi criada geometria (o *carpete*). Nos testes onde não foi utilizado o manequim como base, nem a utilização do *carpete mágico* foi necessário transladar a origem do sistema Virtual para a projeção do Sistema MVN e rotar o ambiente para estabelecer uma relação entre a origem dos dados e o manequim “Human”.

As opções de não calibrar o cenário e utilizar configuração padrão do RTI são pouco eficientes para operacionalizar a criação de integrações com posição e orientação controlada dos movimentos capturados.

É importante ressaltar que os resultados ilustrados nas Figuras, na movimentação em cima dos eixos coordenados criados no DELMIA como referência para os ensaios, apresentam pequenos desvios devido a dois aspectos: o primeiro com relação à própria característica humana, pela dificuldade de andar todo tempo em linha reta, e o segundo com relação aos erros de *drift*, inerentes da tecnologia inercial.

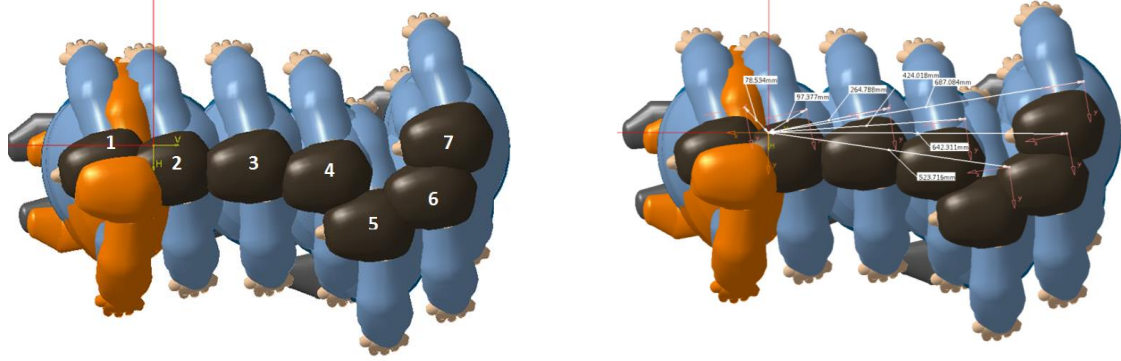
4.2 Mitigação do *drift*

4.2.1 Modo dos magnetômetros

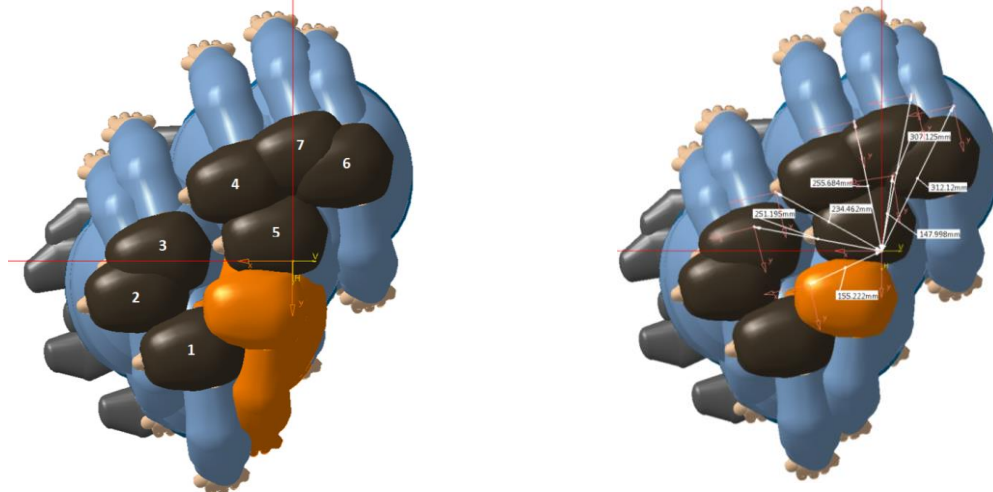
Os erros de captura (*drift*), obtido para as diferentes configurações dos magnetômetros, pode ser observado visualmente pela diferença visual entre o manequim de referência (cor laranja) e os outros manequins (cor azul) representado as 7 voltas realizadas, conforme ilustrado na Figura 4-16. O manequim de referência está posicionado na origem do sistema de coordenadas Real no momento de iniciação/finalização de cada volta, ou seja, a

posição real ocupada pelo corpo de captura. O erro ocorrido em cada volta foi determinado quantitativamente, confirmando a análise visual. Na Figura também é possível observar a rotação no sistema de coordenadas da posição de referência, ou seja, os manequins não estão paralelos, ao Human laranja.

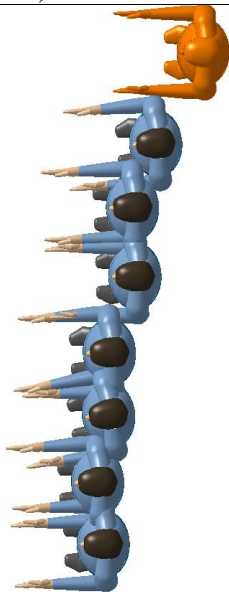
Figura 4-16: Erros de captura ao longo das 7 voltas para cada modo magnetômetro



a) Drift obtido com o modo KiC



b) Drift obtido com o modo KiC sem os magnetômetros

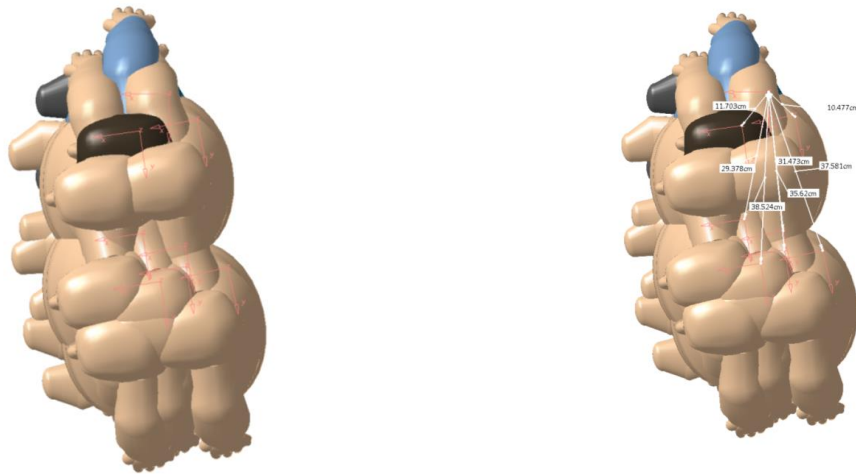


c) Drift obtido com o modo XKF3

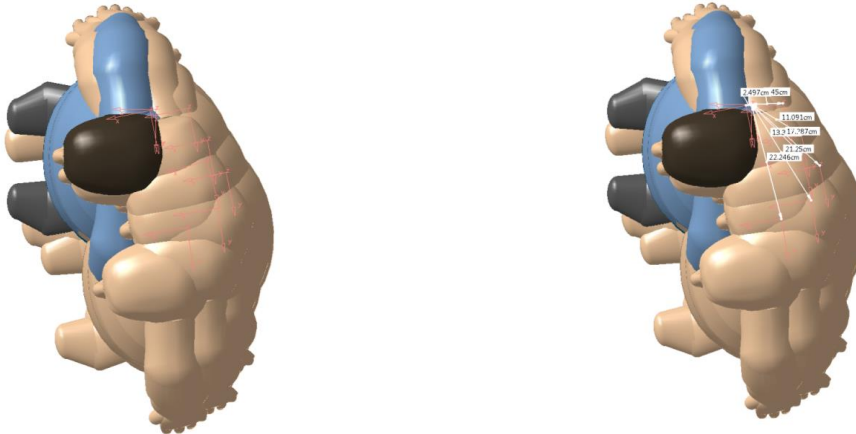
4.2.2 Tratamento dos dados de captura

O *drift* resultante do ensaio realizando tratamento dos dados pode ser observado na Figura 4-17, onde o manequim de referência (azul) está posicionado na origem do sistema de coordenadas virtual e os outros manequins representam o desvio de posicionamento nas sete voltas realizadas.

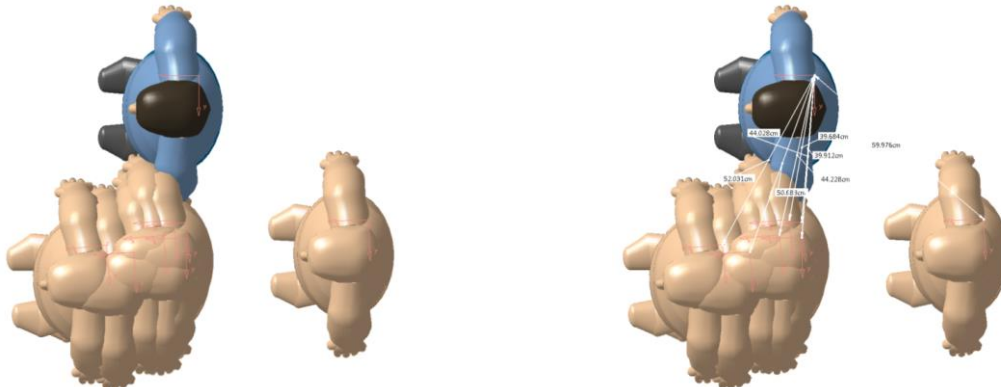
Figura 4-17: Resultados do ensaio realizando tratamento dos dados para as configurações dos magnetômetros



a) KiC



b) KiC sem os magnetômetros



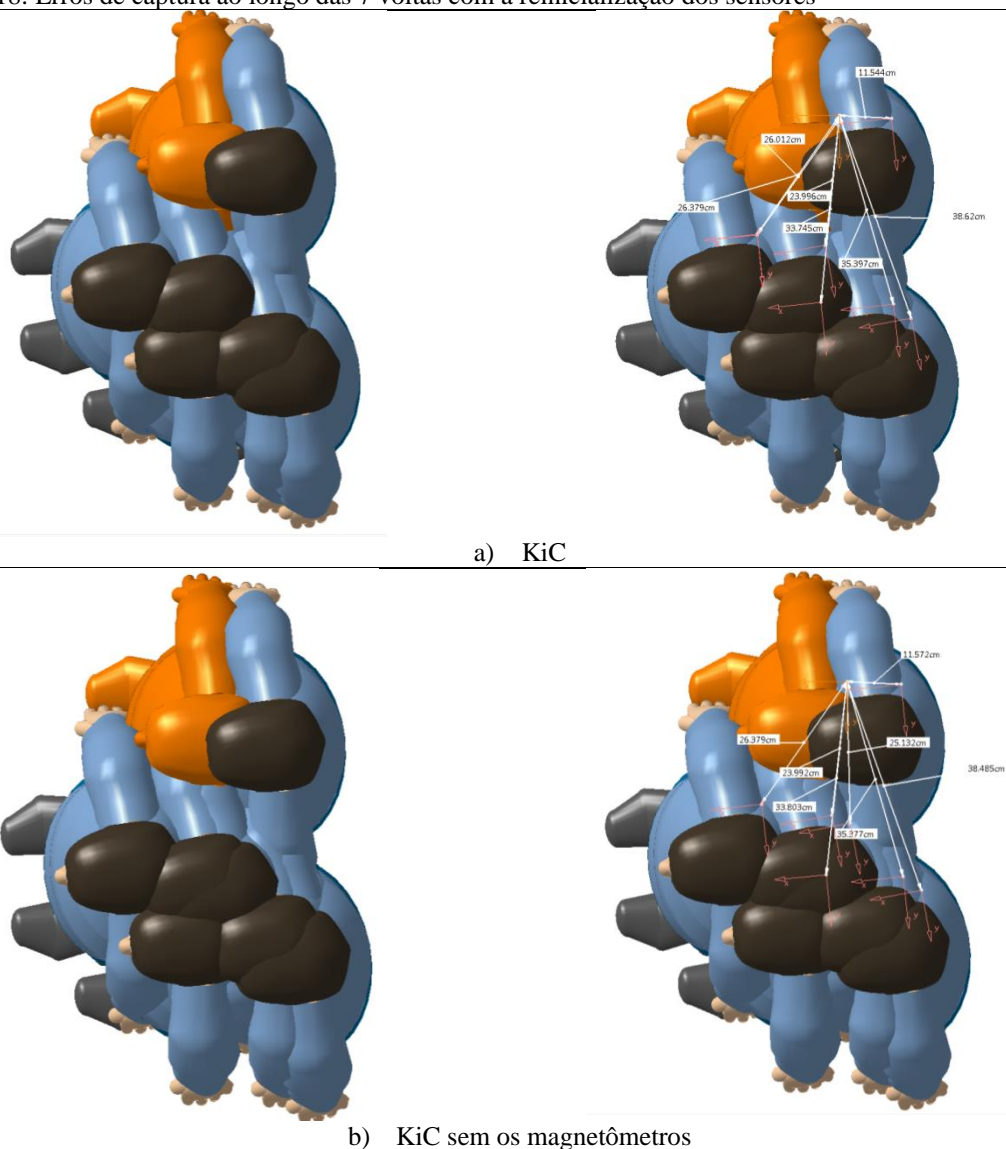
c) XKF3

O *drift* obtido com o modo XKF3 foi elevado nos dois testes realizados, em comparação com os outros dois modos. Logo, essa configuração foi excluída do processo de reinicialização dos sensores.

4.2.3 Reinicialização dos sensores

Pela análise visual e quantitativa é possível observar que os resultados para os dois modos dos magnetômetros foram semelhantes (Figura 4-18). Além disso, ocorreu menor rotação dos manequins em relação ao manequim de referência. É importante destacar que a reinicialização dos sensores faz com que o manequim seja posicionando novamente na origem, perdendo a posição anterior.

Figura 4-18: Erros de captura ao longo das 7 voltas com a reinicialização dos sensores



4.2.4 Análise ensaio de mitigação do *drift*

Os três modos de configuração dos magnetômetros apresentaram *drift*, já esperado conforme, discutido na revisão bibliográfica. No Quadro 4-1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados os erros de cada volta para cada modo de configuração dos magnetômetros, sem a reinicialização em cada volta. Pode ser observado que a não utilização dos magnetômetros apresenta menor erro acumulado ao longo do tempo de captura, Porém, se considerarmos, cada volta realizada, a utilização inteligente dos magnetômetros (KiC), apresentou menor erro de captura.

Quadro 4-1: Comparação do *drift* para os três modos dos magnetômetros

Modo magnetômetros	KiC (cm)	KiC sem magnetômetros (cm)	XKF3 (cm)
Volta 1	7,9	15,5	52,2
Volta 2	9,7	25,1	86,6
Volta 3	26,5	23,4	119,0
Volta 4	42,4	25,6	159,6
Volta 5	52,4	14,8	1.894,5
Volta 6	62,4	31,2	224,6
Volta 7	68,7	30,7	254,7
Erro acumulado	270,0	166,0	2.791,0
Erro médio	38,6	23,8	398,8

Fonte: Autor

Com o processo de tratamento dos dados ocorreu uma melhora acentuada no *drift* nas três configurações. Os resultados quantitativos apresentados no Quadro 4-2 mostram uma melhora de 28%, 43% e 70% para os modos KiC, KiC sem os magnetômetros e XKF3 respectivamente.

Quadro 4-2: Resultados do *drift* com tratamento dos dados

Modo magnetômetros	KiC (cm)	KiC sem magnetômetros (cm)	XKF3 (cm)
Volta 1	37,6	6,5	52
Volta 2	29,4	13,4	59,9
Volta 3	31,5	17,3	44
Volta 4	10,5	21,3	50,7
Volta 5	38,5	22,3	39,7
Volta 6	35,6	11,1	44,2
Volta 7	11,7	2,5	39,9
Erro acumulado	194,8	94,4	330,4
Erro médio	27,8	13,5	47,2

Fonte: Autor

Com a reinicialização dos sensores os erros ocorridos em cada volta em ambas as configurações dos magnetômetros foram semelhantes. Comparando-se com os resultados com tratamento dos dados, os resultados apresentados Quadro 4-3 mostram que este processo não trouxe melhorias consideráveis, inclusive apresentou resultados piores para o modo sem os magnetômetros. Além disso, ao reinicializar os sensores, o avatar é automaticamente movido para a origem utilizada para calibração.

Quadro 4-3: Resultado do *drift* gerado com a reinicialização do sensores

Reinicializando sensores a cada volta		
Modo magnetômetros	KiC (cm)	KiC sem magnetômetros (cm)
Volta 1	38,6	38,5
Volta 2	26,0	26,4
Volta 3	33,7	33,8
Volta 4	35,4	35,4
Volta 5	23,9	23,9
Volta 6	11,5	11,56
Volta 7	26,4	25,1
Erro acumulado	157,1	194,7
Erro médio	26,2	27,8

Fonte: Autor

Os resultados obtidos neste ensaio evidenciam:

- i) efeito dos magnetômetros: os magnetômetros causam desvio considerável na orientação dos dados capturados, mesmo em ambientes com poucos materiais ferromagnéticos;
- ii) tratamento dos dados capturados: a correção do posicionamento do avatar mostrou-se a melhor forma de mitigar os erros de captura. Porém, para utilizá-la corretamente é necessário conhecer as coordenadas do ponto de referência do avatar.
- iii) reinicialização dos sensores: a reinicialização dos sensores diminui as diferenças existentes entre as configurações e elimina o efeito do *drift* acumulando com o tempo de captura, porém ao realizar este procedimento também ocorre a reinicialização do sistema de coordenadas, fazendo que o avatar perda a referência no seu próprio sistema de coordenadas;
- iv) dificuldade em criar cenários virtuais com precisão alta precisão de posicionamento espacial: considerando-se que uma volta correspondeu um tempo máximo de 1,0 minuto e os erros gerados nos três modos de magnetômetros causam desvios com mais de 20cm de diferença.

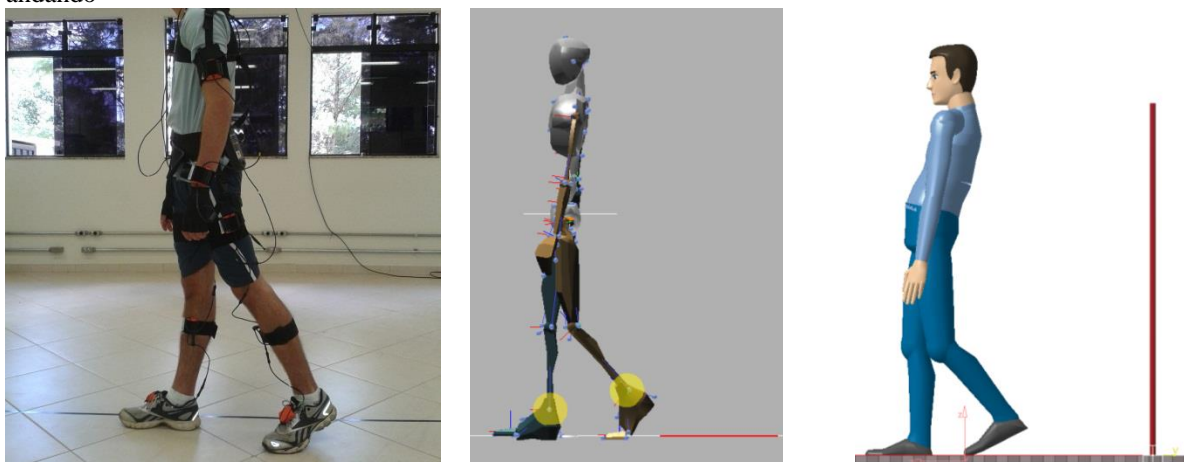
Considerando que o menor *drift* obtido foi com a configuração que não utiliza os magnetômetros (KiC sem magnetômetros), esta foi utilizada no ensaio de compatibilidade antropométrica.

4.3 Cinemática do manequim digital

4.3.1 Corpo de captura andando

As capturas realizadas com os tipos de cenário padrão, piso flexível e vários níveis, reproduziram os movimentos no ambiente virtual iguais aos movimentos do corpo de captura: ocorreu a movimentação na mesma direção e sentido que o corpo de captura com relação à linha de referência (Figura 4-19).

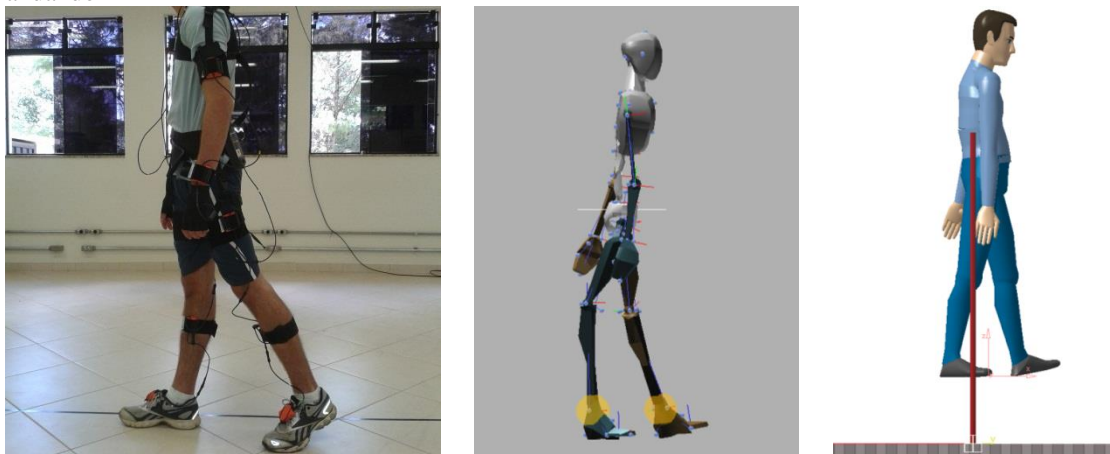
Figura 4-19: Resultados cinemáticos para os cenários padrão, piso flexível e vários níveis com corpo de captura andando



Fonte: Autor

Já os cenários, pélvis fixa e pélvis fixa apertada tiveram resultados diferentes, porém iguais entre si. Nestes dois cenários o Human não se movimentou, houve uma elevação automática do manequim com relação ao piso e reprodução dos movimentos das pernas (passos), porém o manequim com o manequim parado com relação à linha de referência.

Figura 4-20: Resultados cinemáticos para os cenários pélvis fixa e pélvis fixa apertada, com corpo de captura andando

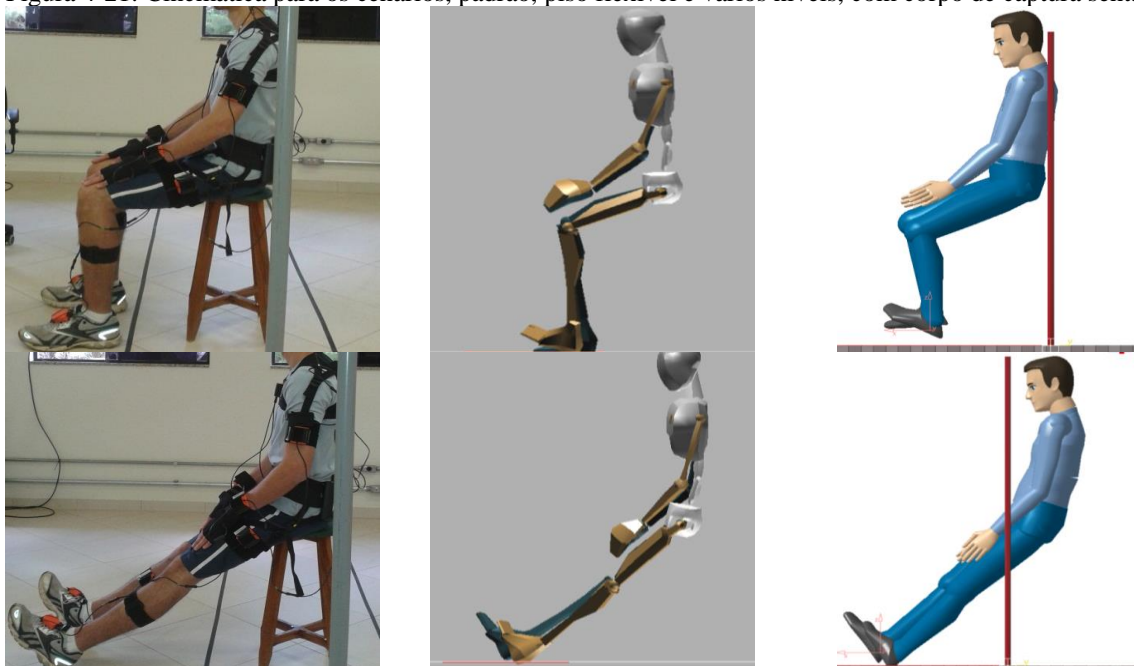


Fonte: Autor

4.3.2 Corpo de captura movimentando as pernas

Novamente os resultados da cinemática do Human podem ser agrupados em dois tipos. O primeiro grupo são os resultados com os tipos de cenário padrão, piso flexível e vários níveis. Com estes cenários, no momento em que o corpo de captura mudou a posição de suas pernas, mantendo-se o resto do corpo parado, no ambiente virtual ocorreu movimentação de toda a estrutura biomecânica do Human, exceto das pernas. Analisando-se a linha de referência antes e depois do corpo de captura movimentar as pernas, é possível observar a diferença entre o movimento real e movimento virtual (Figura 4-21).

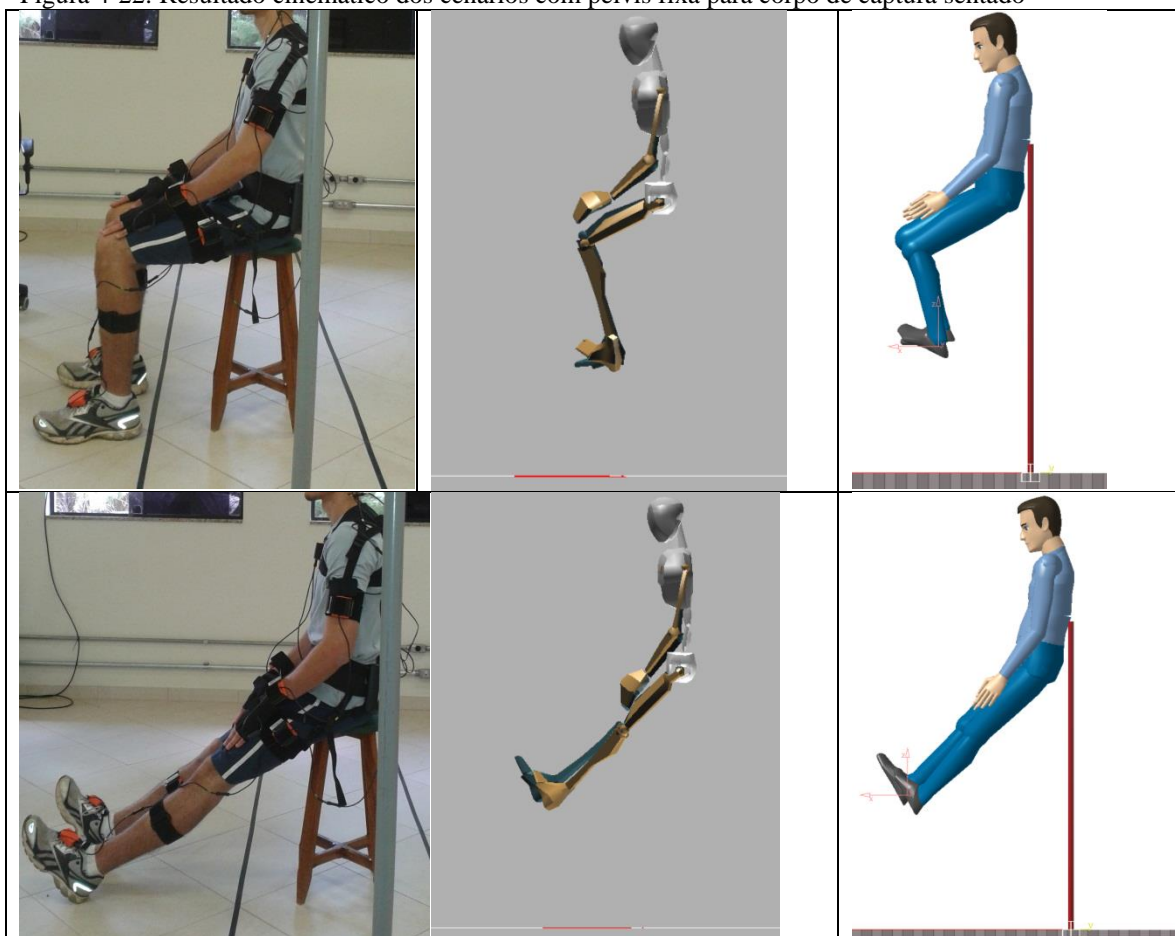
Figura 4-21: Cinemática para os cenários, padrão, piso flexível e vários níveis, com corpo de captura sentado



Fonte: Autor

O segundo grupo de resultados foram obtidos utilizando-se os tipos de cenário que mantém a pélvis fixa. Com estes cenários, os movimentos resultantes na cinemática do Human foram semelhantes os movimentos realizados pelo corpo de captura, porém houve elevação da posição do manequim em relação ao piso (eixo z). Na Figura 4-22 é possível observar a semelhança previamente descrita, baseando-se na posição do corpo de captura e do Human, em relação a linha de movimentação.

Figura 4-22: Resultado cinemático dos cenários com pélvis fixa para corpo de captura sentado

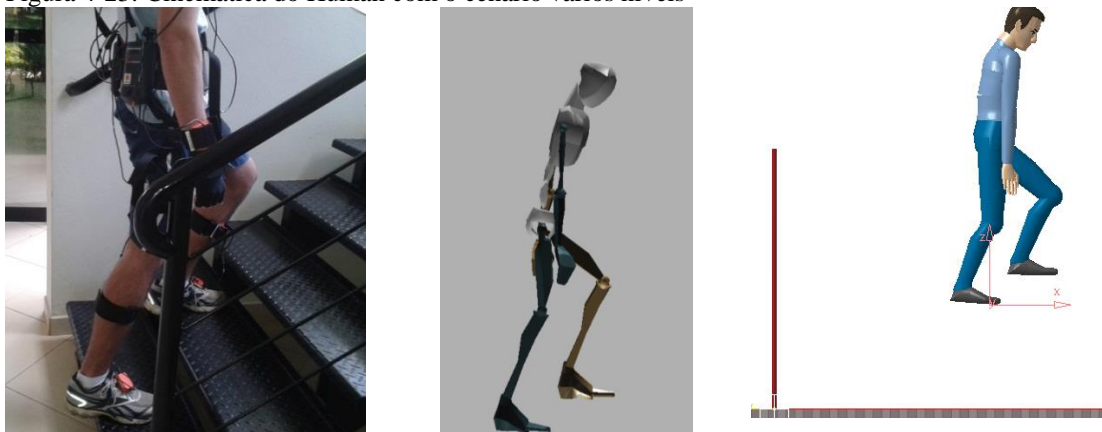


Fonte: Autor

4.3.3 Corpo de captura movimentando-se em escada

Neste tipo de atividade, o único cenário que reproduziu os movimentos no ambiente virtual, semelhantes aos movimentos realizados pelo corpo de captura foi o cenário vários níveis (Figura 4-23). Neste cenário ocorreu a movimentação do Human no eixo horizontal (eixo x) e no eixo vertical (eixo y).

Figura 4-23: Cinemática do Human com o cenário vários níveis

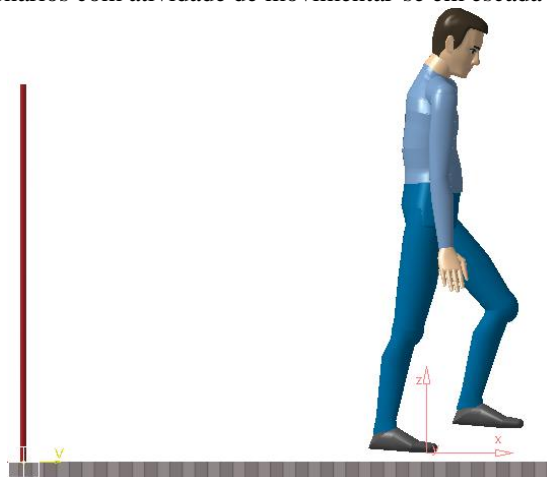
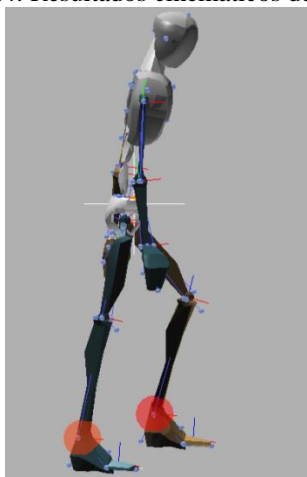


Fonte: Autor

A única diferença entre os movimentos ocorreu quando o corpo de captura desceu os degraus em direção ao piso. Nestes movimentos, o avatar do MVN reproduziu os passos descendo a escada (eixo x), porém não retornou ao piso (eixo y), como o corpo de captura. Para resolver esse problema, foi necessário editar a captura realizada, através da definição da altura do piso, com o ponto de contato do pé pivô (direito).

Os outros cenários disponíveis apresentaram resultados diversos. No cenário padrão, a movimentação do Human ocorreu no eixo horizontal (eixo x), porém não apresentou a elevação no eixo y. Nos cenários pélvis fixa e pélvis fixa apertada, foi possível observar as diferentes posturas tomadas assumidas pelo corpo de captura, mas sem ocorrer deslocamento horizontal, apenas uma pequena elevação no eixo y, automática gerada pelo MVN. O último cenário disponível, piso flexível, o Human se deslocou normalmente no eixo x, conforme o movimento do corpo de captura, porém não ocorreu elevação no eixo y, pelo contrário, ele “afundou” levemente no piso. A Figura 4-24 ilustra os resultados para os diferentes cenários descritos.

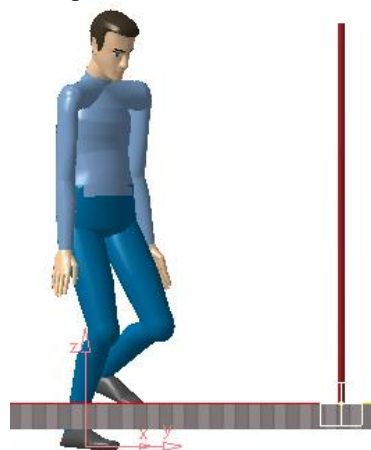
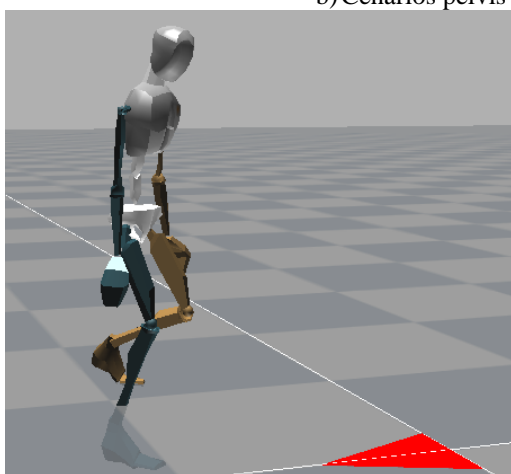
Figura 4-24: Resultados cinemáticos de diferentes cenários com atividade de movimentar-se em escada



a) Cenário padrão



b) Cenários pélvis fixa e pélvis fixa apertada



c) Cenário piso flexível

Fonte: Autor

4.3.4 Análise ensaio de cinemática manequim digital

Os resultados demonstram que o sistema inercial MVN utiliza o tipo de cenário escolhido, no momento de realizar a captura, para determinar um ponto fixo de referência. A

partir deste ponto de referência, são capturados os movimentos realizados pelo corpo de captura e reproduzidos no *software* MVN Studio. Como este ponto está atribuído a um segmento do avatar do MVN, ocorrem diferenças entre os movimentos reais do corpo de captura, com a reprodução no *software*. Esta mesma diferença ocorre quando esta captura é integrada com o DELMIA.

Comparando-se os diferentes tipos de cenários com os tipos de movimentos realizados no ensaio, pode-se determinar o ponto fixo do avatar do MVN de cada tipo de cenário e as implicações para movimentação do Human, conforme o Quadro 4-4.

Quadro 4-4: Cinemática dos avatar do MVN para cada tipo de cenário

Tipo de cenário	Cinemática
Padrão Piso flexível	Os movimentos são gerados tendo como referência o pé direito (fixo), permitindo movimentação no eixo horizontal.
Pélvis fixa Pélvis fixa apertada	Os movimentos são gerados a partir do quadril fixo, o que impede movimentação no eixo horizontal.
Múltiplos níveis	Os movimentos são gerados com a referência fixa no pé direito, com liberdade de movimentos no eixo horizontal e vertical.

Fonte: Autor

Para impedir que o tipo de cenário possa interferir nas posturas assumidas pelo corpo de captura durante o ensaio de compatibilidade antropométrica, foi utilizado o cenário com a pélvis fixa.

4.4 Compatibilidade antropométrica

A compatibilidade antropométrica foi analisada considerando os valores de medidas antropométricas obtidas com as duas técnicas utilizadas (sistema de MoCap e trena), pois os valores obtidos com ambas as técnicas apresentaram valores diferentes para as mesmas medidas.

Neste tópico são apresentadas as diferenças percentuais nas medidas antropométricas obtidas entre: o corpo de captura e, as diferentes combinações de modelos antropométricos do MVN com os modelos antropométricos do Human Builder. Os valores absolutos medidos no ambiente virtual do DELMIA são apresentados no Apêndice B.

4.4.1 Compatibilidade antropométrica utilizando sistema de MoCap

Com as medidas antropométricas obtidas utilizando-se o sistema de MoCap Qualysis, foi construído do Quadro 4-5, que apresenta os valores obtidos no ambiente virtual, em centímetros (cm), para cada medida antropométrica do protocolo. Para cada combinação de modelos antropométricos, foi calculado desvio total, pela somatória da diferença para cada medida antropométrica. Através do erro percentual total é possível observar que o melhor resultado foi obtido, utilizando-se modelo antropométrico detalhado do MVN e do Human.

Quadro 4-5: Resultados obtidos utilizando as medidas antropométricas obtidas com sistema de MoCap

Dimensões de referência	Utilizando sistema de captura de movimentos (valores em cm)					
	MVN simplificado e Human simplificado	MVN detalhado e Human intermediário	MVN detalhado e Human simplificado	MVN simplificado e Human intermediário	MVN simplificado e human detalhado	MVN detalhado e Human detalhado
Alcance frontal alongado	4,0	10,0	1,0	8,0	2,0	5,0
Comprimento nádega-calcanhar	0,2	0	0	35,0	5,0	5,0
Alcance vertical sentado	2,0	4,0	1,0	1,0	1,0	3,0
Alcance frontal de apreensão	10,0	6,0	11,0	6,0	11,0	1,0
Alcance lateral do braço	1,5	8,5	1,4	8,5	1,4	1,0
Alcance vertical de apreensão	4,0	11,0	7,0	9,0	7,0	3,5
Desvio total	21,7	39,5	21,4	67,5	27,4	19,5
Erro percentual total	19,6%	35,2%	18,0%	68,5%	22,7%	17,0%

Fonte: Autor

4.4.2 Compatibilidade antropométrica utilizando trena

Para as medidas antropométricas obtidas utilizando-se trena, também foi construído um quadro com as diferenças absolutas entre as medidas reais e virtuais (Quadro 4-6). Com esta técnica de tomada de medidas, o melhor resultado também foi obtido utilizando-se modelo antropométrico detalhado do MVN e do Human. Além disso, também apresentou menor desvio total.

Quadro 4-6: Resultados obtidos utilizando as medidas antropométricas obtidas com trena

Dimensões de referência	Utilizando Trena (valores em cm)					
	MVN simplificado e Human simplificado	MVN detalhado e Human intermediário	MVN detalhado e Human simplificado	MVN simplificado e Human intermediário	MVN Simplificado e Human detalhado	MVN detalhado e Human detalhado
Alcance frontal alongado	7,0	0	4,0	0	11,0	3,0
Comprimento nádega-calcanhar	0,2	5,0	0	3,0	2,2	3,0
Alcance vertical sentado	7,0	4,0	7,0	4,0	1,0	1,0
Alcance frontal de apreensão	9,0	6,0	9,0	6,0	2,0	2,0
Alcance lateral do braço	1,5	2,5	2,5	0,5	4,5	1,5
Alcance vertical de apreensão	4,0	3,0	1,0	4,0	4,0	3,0
Desvio total	28,7	20,5	23,5	17,5	24,7	13,5
Erro percentual total	25,3%	17,3%	21,3%	14,1%	23,5%	11,3%

Fonte: Autor

Também é possível analisar a diferença entre as técnicas utilizadas para tomada de medidas. Somando-se os erros obtidos nas diferentes combinações de modelos antropométricos por cada medida presente no protocolo, é possível observar que a utilização de trena apresentou menor erro percentual, exceto para medida Alcance vertical sentado (Quadro 4-7).

Quadro 4-7: Comparação entre técnicas de tomada de medidas antropométricas

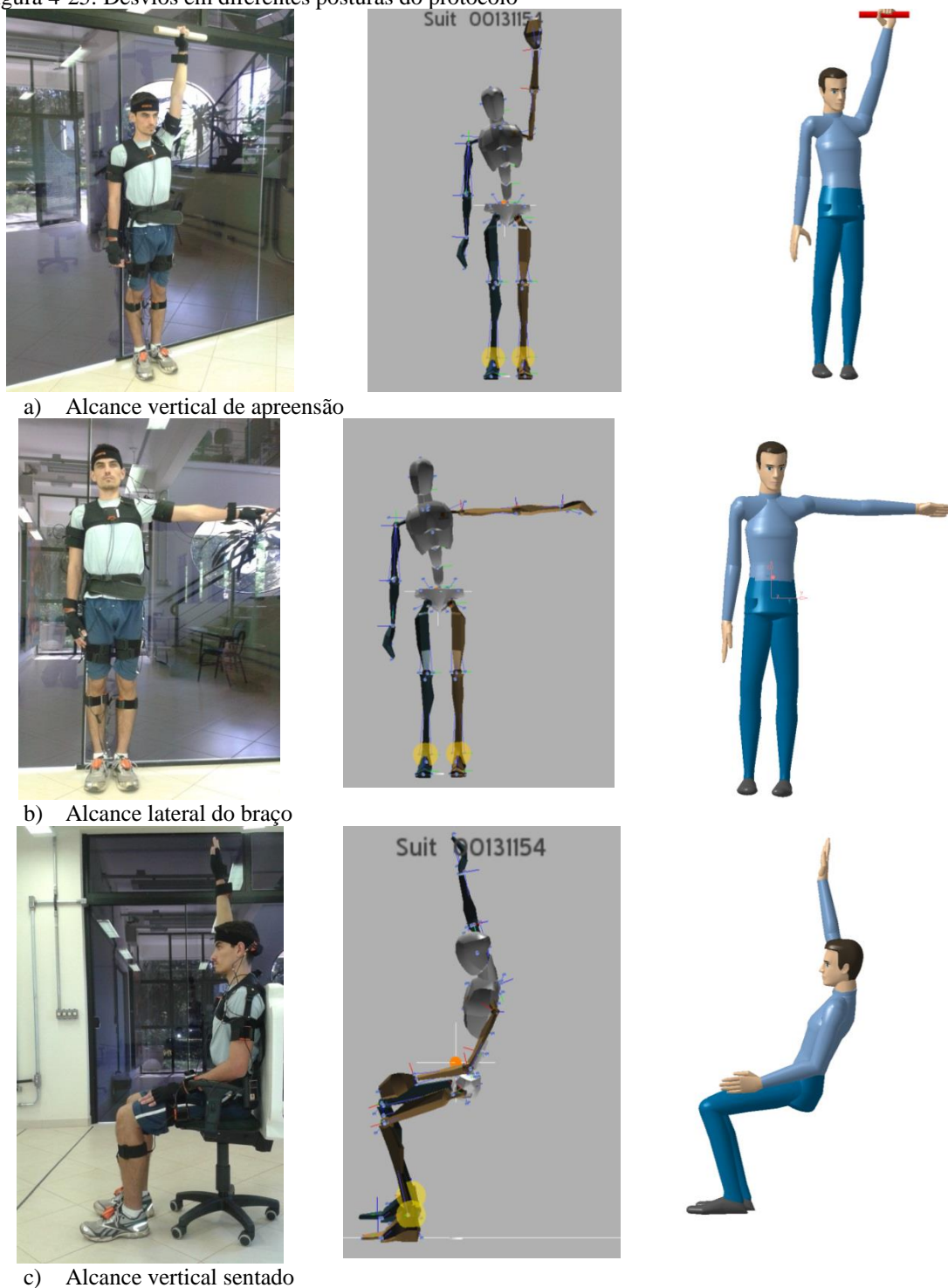
Dimensões de referência	Sistema de MoCap	Trena
	Erro percentual total	Erro percentual total
Alcance frontal alongado	31,2%	26,0%
Comprimento nádega-calcanhar	46,7%	10,5%
Alcance vertical sentado	8,8%	16,7%
Alcance frontal de apreensão	48,3%	37,3%
Alcance lateral do braço	27,6%	13,9%
Alcance vertical de apreensão	18,4%	8,5%

Fonte: Autor

4.4.3 Desvios posturais

Durante o ensaio pode ser observado que algumas posições apresentaram desvios e relação à postura real do corpo de captura, mesmo tomados todos os cuidados com a calibração, escolha do modo dos magnetômetros e cenário. A Figura 4-25 ilustra os desvios observados.

Figura 4-25: Desvios em diferentes posturas do protocolo



Fonte: Autor

4.4.4 Análise ensaio de compatibilidade antropométrica

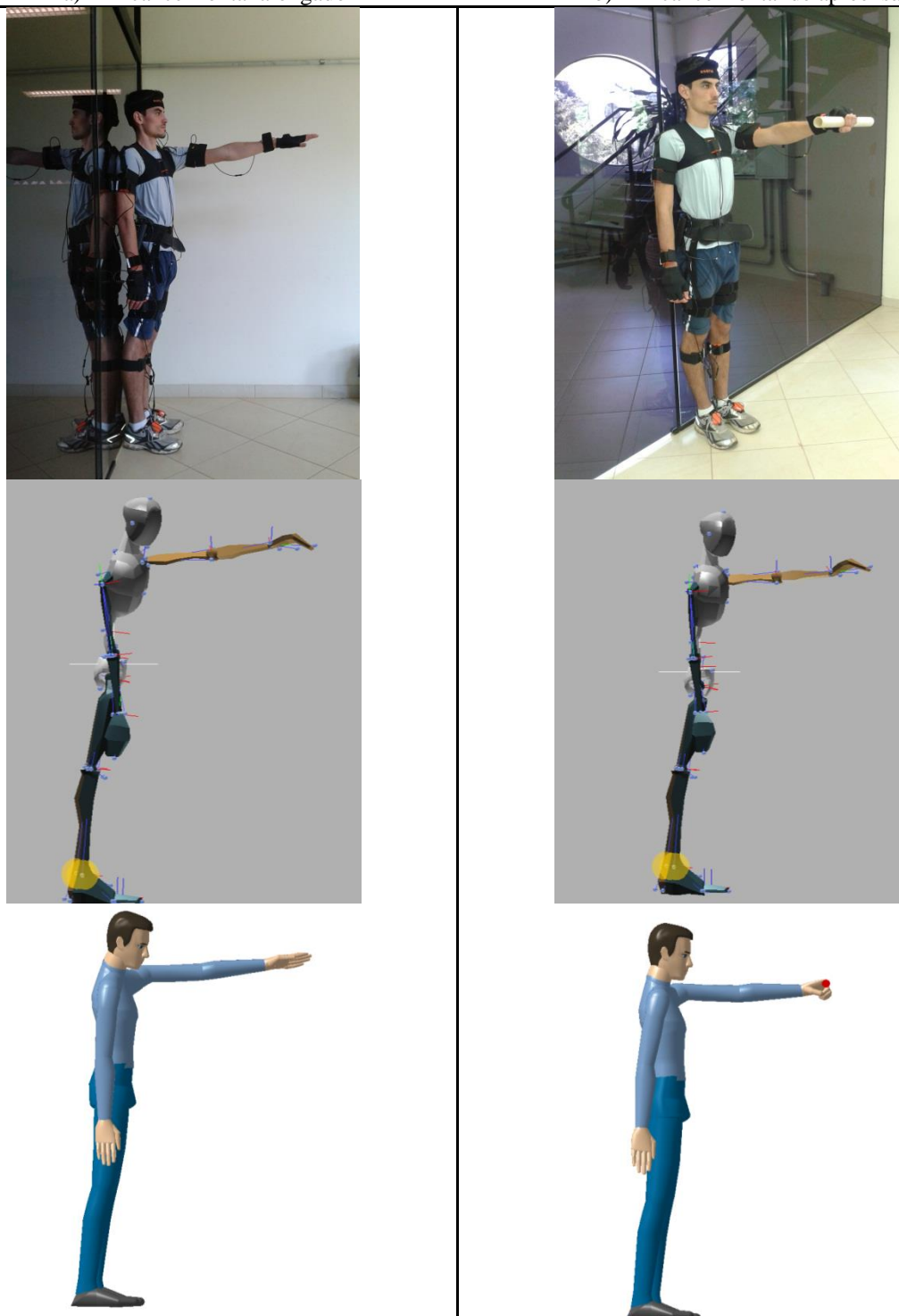
O ensaio de compatibilidade antropométrica deve ser analisado por dois aspectos. O primeiro pelo processo de obtenção de medidas antropométricas. É importante observar que as duas técnicas utilizadas para coleta das medidas apresentaram valores diferentes para a mesma medida antropométrica (altura, envergadura, tamanho do pé, altura até o quadril e largura do ombro), mostrando as dificuldades operacionais em se trabalhar com antropometria.

O segundo aspecto refere-se diretamente aos resultados obtidos, que evidenciam dificuldades em estabelecer relação antropométrica entre os “atores” do sistema. Estas dificuldades são aumentadas devido aos desvios posturais, devido ao *drift* em sensores localizados no meio do esqueleto (quadril, peito e ombro) que não possibilitam correção dos dados. Outro aspecto evidenciando foi a pouca diferença na posição do avatar e, conseqüentemente no Human com relação às posturas semelhantes, como o alcance frontal alongado e alcance frontal de apreensão, como ilustrado na Figura 4-26.

Figura 4-26: Pequena diferença observada entre posturas semelhantes

a) Alcance frontal alongado

b) Alcance frontal de apreensão



Fonte: Autor

Comparando-se os resultados entre as técnicas utilizadas para obtenção das medidas, a utilização da trena apresentou menor diferença total, em comparação com a utilização do sistema de MoCap. Isto pode ser justificado pela diferença obtida em diversas

medidas corporais, além disso, as medidas relacionadas com as posturas corporais funcionais também foram coletadas utilizando trena. Desta forma podem apresentar a mesma escala de erros experimentais.

Entre os resultados obtidos com a trena, verifica-se que a utilização do modelo antropométrico detalhado do MVN e detalhamento do Human apresentou melhor resultado. Realizando uma análise postura a postura, para estes modelos utilizados, as posturas que tiveram piores resultados foram as que apresentaram maiores desvios devido ao *drift* dos sensores.

Na próxima secção é apresentada uma discussão sobre os resultados de cada ensaio, conduzindo a criação dos procedimentos operacionais para utilização do sistema, com base nos requisitos estipulados.

4.5 Sistematização do sistema integrado

Retomando o processo de integração e sua relação com os ensaios realizados, conforme apresentado na Figura 3-24, serão discutidos os resultados experimentais e apresentados os procedimentos operacionais elaborados para utilizar o sistema integrado, em relação aos diferentes recortes abordados: posicionamento espacial de ambientes virtuais, qualidade dos dados capturados, cinemática do manequim digital e compatibilidade antropométrica.

4.5.1 Posicionamento espacial de ambiente virtual

A calibração do MVN é uma importante etapa no processo de integração do sistema. O local e a posição em que é realizada determina o posicionamento dos dados capturados no ambiente virtual. Os resultados do ensaio de posicionamento espacial demonstram diferentes conjuntos de configurações que possibilitam o posicionamento espacial de maneira adequada e correções que podem ser realizadas.

O conjunto de configurações mais simples de ser utilizado é **calibrando o cenário e utilizando o manequim como base para receber os movimentos**. A calibração do cenário gera movimentos do avatar do MVN em sistema de coordenadas local e definido, ao mesmo tempo, o manequim como base, faz com que o sistema de coordenadas do MVN seja compatível com o sistema do DELMIA. Porém, este conjunto de configurações exige que o ambiente seja livre de **materiais ferromagnéticos** que podem causar perturbações no campo

magnético, impendendo que a calibração seja realizada adequadamente. Nestes ambientes, a melhor estratégia é realizar a calibração do MVN e do cenário em um local que não possui interferência de materiais ferromagnéticos, para posteriormente realizar a captura no ambiente agressivo ao sistema. No momento de criar a integração com o DELMIA, **utilizar o carpete mágico** para transladar a origem dos dados para do MVN para o local desejado, posicionando a geometria com sua origem respeitando os sentidos do sistema de coordenadas que foi realizada a captura. Como o posicionamento espacial envolve configurações com as três tecnologias que integram o sistema, os procedimentos operacionais para posicionamento espacial de ambiente virtual são apresentados no Quadro 4-7, destacando-se as decisões em cada uma das tecnologias do sistema integrado.

Quadro 4-7: Procedimentos operacionais para posicionamento espacial de ambientes virtuais

Posicionamento espacial de ambiente virtual	Ambiente físico livre de perturbações de campo magnético?	<p style="text-align: center;">Sim</p> <ul style="list-style-type: none"> • realizar calibração do avatar no local da captura (MVN Studio); • calibrar o cenário (MVN Studio); • posicionar Human na origem do sistema de coordenadas criado (DELMIA); • utilizar manequim como base (RTI);
		<p style="text-align: center;">Não</p> <ul style="list-style-type: none"> • realizar calibração do avatar em local livre de perturbações de campos magnéticos (MVN Studio); • calibrar o cenário (MVN Studio); • utilizar o carpete mágico (RTI); • posicionar o carpete na origem do sistema de coordenadas Virtual (DELMIA);

Fonte: Autor

4.5.2 Qualidade dos dados capturados

A fidelidade de reprodução dos movimentos realizados pelo corpo de captura em ambiente virtual depende de diversos procedimentos para integrar as tecnologias. Neste ponto, o primeiro aspecto a ser considerado é a qualidade dos movimentos capturados, que depende essencialmente dos procedimentos de setup e configuração do sistema de captura. Conforme abordado no capítulo 2, todo sistema de MoCap possui restrições e erros associados a sua própria tecnologia. Em especial, o sistema inercial abordado nesta pesquisa está sujeito ao desvio de posicionamento (*drift*).

Os resultados do ensaio de mitigação de seu efeito mostram a impossibilidade de criar ciclos de captura longos sem a presença de erros. Além disso, é possível concluir a existência de uma relação entre o tempo total de captura e a presença de materiais ferromagnéticos. Quando o ciclo de captura é curto (máximo 1 minuto) e o ambiente possui baixa interferência de materiais ferromagnéticos, a utilização dos magnetômetros ajuda a reduzir os erros gerados. Porém quando o ciclo é longo, é recomendável desliga-los para estabilizar o erro global. Quanto maior o tempo de captura, maior será o erro acumulado durante o ciclo de captura. Este fato era previsto, conforme Carvalho (2011) e observado durante os ensaios.

Em ambos os casos, é possível melhorar os dados capturados pelo processo de truncamento da aceleração do giroscópio, conforme apresentado por Young (2010). Para que se obtenha êxito neste processo é necessário conhecer as coordenadas (x, y, z) do corpo de captura no ambiente real, para serem colocadas no MVN Studio para correção do posicionamento. Isto aponta a necessidade de criar um sistema de coordenadas Real, onde são identificados vários pontos, além da origem, onde são conhecidas as distâncias entre os pontos e a origem nos três eixos. Analisando-se os resultados obtidos com o tratamento dos dados, o menor *drift* global foi obtido com a configuração que não utiliza os magnetômetros.

O posicionamento espacial de um ambiente virtual também contribui neste processo. Com a planta do local de trabalho no ambiente CAD do DELMIA, é possível conhecer as coordenadas (x, y, z) que corpo de captura assumiu no ambiente real. Desta forma, definem-se os procedimentos para mitigação do *drift* (Quadro 4-8), relacionado com a configuração dos magnetômetros (MVN) e posicionamento de ambientes virtuais (RTI e DELMIA).

Quadro 4-8: Procedimentos para configuração dos magnetômetros

Mitigação do <i>drift</i>	<ul style="list-style-type: none"> • utilizar o modo com os magnetômetros desligados (MVN); • criar um ambiente virtual posicionado em relação ao ambiente real (ensaio 1); • estabelecer pontos (x, y, z) para corrigir o posicionamento; • tratar os dados de captura utilizando os pontos determinados para correção do posicionamento (MVN).
--------------------------------------	--

Fonte: Autor

É importante observar que a consideração do ambiente virtual em relação ao ambiente real, contribui para a simulação em dois aspectos. O primeiro é pela superação da técnica tradicional da simulação com manequins utilizando mouse e teclado. Este problema é

superado pela utilização do sistema de MoCap isoladamente, onde são obtidas posturas e movimentos mais realísticos. Porém, a interação destas posturas e movimentos depende da relação entre o ambiente físico e o ambiente virtual. Ao ignorar esse segundo aspecto, a problemática de posicionamento do manequim para utilização das análises presentes no *software* DHMS (envelope de alcance, campo visual, análises biomecânicas e fisiológicas) contínua.

4.5.3 Cinemática manequim digital

O comportamento cinemático do Human é definido pela escolha do cenário de realização da captura, que determina qual ponto de referência permanecerá fixo para gravar os dados de captura. Os diferentes cenários ensaiados ilustram uma gama de possibilidades de movimentos que podem ser reproduzidos no ambiente virtual, respeitando a movimentação do corpo de captura em um ambiente real de trabalho.

A escolha do cenário adequado depende das características da atividade de trabalho e dos objetivos pretendidos com a simulação. Por exemplo, ao simular um piloto dentro de um *cockpit*, onde se deseja analisar o alcance dos membros inferiores a painéis ou pedais, é necessário escolher o cenário que mantem a pélvis fixa para impossibilitar que o ponto de referência seja o calcanhar direto e fazendo com que o Human se desloque do ponto que está sentando. De outra forma, quando o objetivo é avaliar todo conteúdo de uma atividade, através da visualização dos deslocamentos e interações com o ambiente, é necessário escolher um tipo de cenário que permita livre movimentação. Também pode ser necessário dividir a captura em mais de uma parte, para que seja possível trocar o cenário entre uma parte e outra, por exemplo, um trabalho que exija interações em dispositivos na posição sentada e deslocamentos horizontais.

Para determinar a relação entre as características da atividade e dos objetivos da simulação, foi criado quatro tipo de interações:

- i) interações somente no plano horizontal: andar, pegar objetos, manusear ferramentas, carregamento de cargas;
- ii) interações somente em posição sentada: trabalho em equipamentos em posição sentada, dirigir, pilotar;
- iii) interações no plano horizontal e vertical: subir escadas, gabaritos, plataformas e outros;

- iv) interações mistas: compostas por trabalhar em posição sentada e também deslocamentos (horizontais e ou verticais).

Para cada tipo de interação foi elaborado o Quadro 4-9 para tomada de decisão sobre o cenário a ser utilizado para captura dos movimentos e os procedimentos de uso.

Quadro 4-9: Escolha do cenário com base no tipo de interação desejado

Cinemática do manequim digital	Tipo de interação?	Interações somente no plano horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Escolher cenário padrão (MVN Studio); • Definir pé direito como referência do Human (DELMIA).
		Interações somente em posição sentada	<ul style="list-style-type: none"> • Escolher cenário pélvis fixa (MVN Studio); • Definir “ponto H” como referência do Human (DELMIA); • Medir a altura entre o piso do ambiente virtual e o “ponto H” (DELMIA).
		Interações em mais de plano	<ul style="list-style-type: none"> • Escolher cenário múltiplos níveis (MVN Studio); • Definir o pé direito como referência do Human (DELMIA); • Determinar os pontos de contato com piso (MVN Studio).
		Interações mistas	<ul style="list-style-type: none"> • Dividir a captura conforme o tipo de interação exigida (MVN Studio); • Utilizar os procedimentos dos tipos de interações escolhidas.

Fonte: Autor

4.5.4 Compatibilidade antropométrica

A compatibilidade antropométrica entre os “atores” do sistema representa um grande desafio para sua utilização análises precisas e refinadas dos movimentos. Este problema está pautado em três aspectos. O primeiro envolve especificamente o sistema de captura MVN que não realiza a captura dos movimentos das mãos. Isto impossibilita de ter movimentos precisos em atividades manuais. Existe no mercado luvas que permitem a captura dos movimentos das mãos.

Já o segundo é pela diferença entre os modelos biomecânicos e antropométricos dos “atores” do sistema. O corpo de captura (ser humano real) possui mais de 200 articulações e inúmeras possibilidades de medidas antropométricas. Este modelo real é reproduzido no ambiente virtual do DELMIA por pelo Human que possui, no máximo, 104 medidas antropométricas e uma estrutura formada por 50 segmentos articulados, que representam as juntas. A integração destes dois atores é “intermediada” pelo avatar do MVN que possui no máximo 9 medidas antropométricas e 22 juntas. Além disso, devem ser

observados os graus de liberdade dos modelos biomecânicos computacionais. Apesar do Human não possuir um modelo estruturado com juntas, os movimentos permitidos para cada segmento respeita o funcionamento do corpo humano. Em compensação, todas as juntas do modelo biomecânico do MVN possuem 3 graus de liberdade, o que não representa a realidade humana. Estes aspectos mostram uma redução da complexidade de representação humana, dificultando a compatibilidade.

Este fato ilustra as diferentes racionalidades na concepção das tecnologias do sistema. O sistema de MoCap MVN não limita os graus de liberdade das juntas, buscando a reproduzir a riqueza dos movimentos humanos, ou seja, não restringindo as possíveis variabilidades de movimentos que existem entre os indivíduos. Ao contrário disso, o DELMIA, possui um manequim digital configurado para não ultrapassar limites de movimentos considerados aceitáveis para o ser humano, pois sua funcionalidade é auxiliar o projetista durante a concepção, sobre variáveis pertinentes de projeto.

O terceiro aspecto está relacionado com o processo de obtenção das medidas antropométricas a serem usadas no modelo MVN e no Human. As diferenças obtidas em variáveis antropométricas iguais evidenciam a dificuldade em obter dados antropométricos com precisão. Além disso, destacam-se as dificuldades operacionais em: i) obter a quantidade de medidas antropométricas presente no Human e ii) realizar processo iterativo com os modelos matemáticos dos *softwares* para proporcionar a compatibilidade. Estas mesmas dificuldades são relatadas por Braatz et al. (2012) na validação de manequins digitais para o *software* Jack.

Um dos benefícios do método experimental utilizado neste ensaio foi a possibilidade de salvar os movimentos capturados em posturas dentro do *software* CAD (DELMIA). Com isto é possível utilizar tais posturas em análises no ambiente virtual (zonas de alcance, campo visual e ferramentas de análise). Além disso, o DELMIA possui um modelo humano parametrizado, onde é possível utilizar a mesma postura para avaliar diferentes percentis populacionais. Contudo, existe um limite a ser considerado. Pessoas com diferentes dimensões realizam diferentes movimentos para assumir uma mesma postura. Por exemplo, na Figura 4-27 é evidente a diferença do ângulo de flexão do ombro para os dois manequins, que representam no alcance de objetos.

Figura 4-27: Diferença de alcance para dois percentis



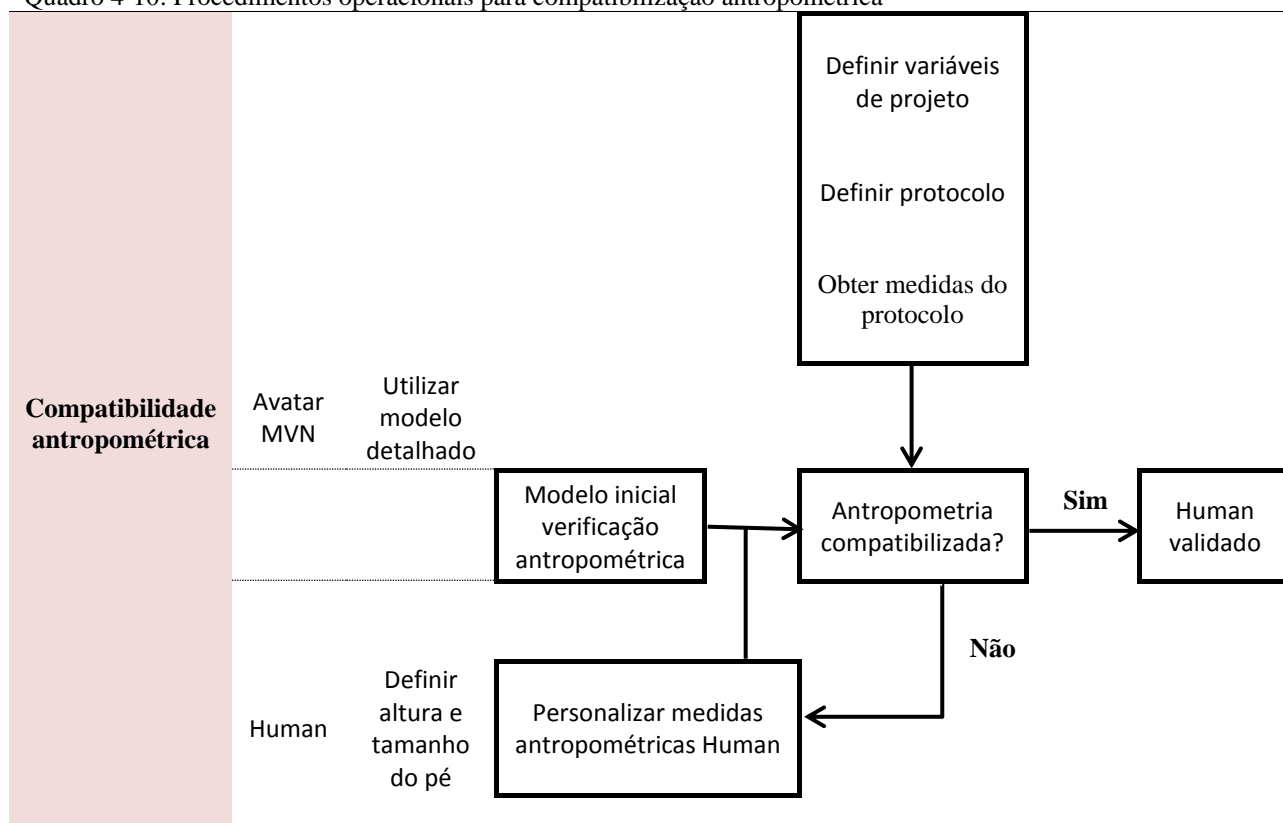
Fonte: Panero e Zelnik (2002)

Alinhado a isso, os princípios antropométricos discutidos por Menegon et al. (2002) recomendam o projeto de dispositivos considerando 90% da população, ou seja, referência as medidas dos manequins 5% e 95% para as variáveis importantes de projeto. Logo para a utilização de movimentos capturados em projetos, é necessário escolher corpos de captura que possuem as medidas antropométricas que atendam aos extremos da população para as variáveis importantes de projeto, para validação dos movimentos capturados.

Os resultados do ensaio de compatibilidade antropométrica mostram que é possível compatibilizar a antropometria com certo nível de erros. As medidas antropométricas utilizadas não podem ser definidas como uma relação determinística para atingir os resultados. A compatibilidade deve ser realizada dentro do contexto, no qual acontecerá a captura, em um processo iterativo utilizando-se como protocolo antropometria dinâmica.

Desta forma, são estabelecidos os procedimentos operacionais para compatibilidade antropométrica no Quadro 10. Partindo-se das variáveis de projeto, deve-se definir um protocolo de posturas relacionadas ao trabalho (antropometria dinâmica) onde são coletados os valores para servir de base de comparação no processo iterativo de definição das medidas antropométricas do Human. Logo, deve ser criado um modelo inicial para o processo de verificação antropométrica. Este modelo deve ser composto pelo modelo detalhado do MVN e um modelo inicial do Human com as medidas de altura e tamanho do pé. Com as posturas definidas no protocolo, é necessário capturá-las e iniciar o processo iterativo para validação do Human.

Quadro 4-10: Procedimentos operacionais para compatibilização antropométrica



Fonte: Autor

4.6 Considerações finais sobre os resultados experimentais

Este capítulo cobriu a parte prática deste trabalho onde foram apresentados os resultados dos quatro ensaios realizados, relacionados com as principais etapas do processo de integração do sistema. A partir disso foram elaborados procedimentos práticos para configuração do sistema.

O primeiro ensaio foi realizado buscando definir uma relação entre um sistema de coordenadas real, com um sistema de coordenadas virtual para possibilitar o posicionamento espacial de objetos no ambiente virtual, referenciado pelo sua posição no ambiente real. Os resultados deste ensaio mostram diversas possibilidades de estabelecer uma relação entre os sistemas de coordenadas, destacando-se:

- i) a necessidade de calibrar o cenário no *software* do sistema de MoCap MVN, para que a movimentação do corpo de captura ocorra em um sistema de coordenadas local e paralelo ao sistema de coordenadas do DELMIA;
- ii) criação de dois sistema de coordenadas (real e outro virtual), onde é estabelecida uma relação entre os dois, para posicionar a origem do sistema virtual de forma sobreposta a origem do sistema real no ambiente virtual.

Com a sobreposição dos sistemas de coordenadas, foi possível realizar o segundo ensaio, onde foram analisados os diferentes modos de configuração dos sensores inerciais e possibilidade de tratamento dos dados, para avaliar os erros de captura gerados (*drift*) e como diminuí-los. Os resultados deste ensaio mostram que é possível diminuir o *drift* gerado ao longo do tempo de captura pelo tratamento dos dados, sem prejudicar o posicionamento do manequim digital, em relação ao ambiente virtual. Para isto é necessário criar pontos no sistema de coordenadas real e no sistema de coordenadas virtual, onde é possível realizar a correção do posicionamento. Estes pontos devem ser criados de forma que o tempo entre as correções não ultrapasse 1 minuto.

O terceiro ensaio buscou analisar a relação existente entre os cenários utilizados para realizar a captura de movimentos e o resultado cinemático do Human no DELMIA. Os resultados evidenciaram que cada cenário mantém fixo um ponto no avatar do MVN, que é utilizado como referência para gerar os movimentos (devido às características da tecnologia inercial) e, este mesmo ponto fixo é mantido quando a captura é integrada com o DELMIA. Desta forma, foram criados 4 tipos de interações, relacionando as características da atividade a ser simulada e os objetivos da simulação para escolha do tipo de cenário adequado.

Por fim, foi realizado o ensaio de compatibilidade antropométrica entre o corpo de captura, avatar do MVN e manequim digital Human do DELMIA. Neste ensaio foram testados os dois modelos biomecânicos do MVN, com a personalização de diferentes medidas antropométricas no Human Builder (antropometria estática), buscando validar o manequim digital através das dimensões corporais funcionais (antropometria dinâmica). Os resultados evidenciam que a compatibilização é dificultada pelas diferenças estruturais (biomecânica) e funcionais (segmentos/juntas articuladas) dos três atores do sistema e pelo efeito do *drift* do sistema de MoCap. Para possibilitar a compatibilidade, foi criado um processo iterativo, onde são validadas as principais medidas, relacionadas com os aspectos de projeto.

A sistematização dos resultados organizada sob o foco do processo de integração mostram as considerações importantes a cerca de cada etapa ensaiada e confirmam a possibilidade de utilização do sistema integrado de forma a atender a diferentes objetivos estipulados para simulação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado na introdução deste trabalho, existe um consenso dos principais pesquisadores da área sobre o potencial de utilização da tecnologia de captura de movimentos para solucionar os problemas da simulação de manequins. Os resultados obtidos nos ensaios com o sistema integrado mostram que é possível criar um ambiente virtual, onde são reproduzidos movimentos capturados em ambiente físico real, para analisar aspectos de ergonomia, porém sua utilização demanda uma série de procedimentos para operacionalizá-lo de forma eficaz, para confirmar a sua potencialidade.

Desta forma, estrutura-se este capítulo, iniciando-se por uma reflexão sob o prisma do problema, questões de pesquisa e racionalidade metodológica. Em seguida, é apresentada uma conclusão da pesquisa frente aos objetivos estipulados e as contribuições para o processo de simulação humana. Após, faz-se necessário discutir as limitações tecnológicas e dificuldades encontradas. Por fim, é realizada uma reflexão sobre o sistema integrado em abordagens de concepção, apresentando as continuidades da pesquisa.

5.1 Reflexão sobre o problema e questões de pesquisa

Partindo-se da questão principal de pesquisa, que estabeleceu entender **como um sistema de captura de movimentos integrado com um *software* de modelagem e simulação humana pode ser utilizado para analisar as questões de ergonomia em ambientes virtuais**, neste estudo foi explorada a tecnologia e funcionalidades do sistema de captura de movimentos inercial MVN, integrado com *software* de modelagem e simulação humana DELMIA, através do *plugin* de integração RTI.

Conforme apresentado por Carvalho (2011), os sensores inerciais não possuem sistema de coordenadas absoluto, e a posição de um objeto capturado é determinada em relação a algum referencial. Estabelecendo o objeto a ser capturado um ser humano no contexto do trabalho desenvolvendo sua atividade, foi necessário entender **as restrições de movimentos impostas pelo sistema**. Os procedimentos criados a partir do ensaio de cinemática do manequim digital definem quatro tipos de interações, que relacionam os movimentos realizados na atividade com os objetivos pretendidos com a simulação, para eliminar o problema cinemático.

Ainda em relação às características do sensor inercial, a posição e orientação de referenciados pelo sistema de coordenadas terrestre, trazem problemas para aplicações

onde são necessárias **análises de posição, distâncias e dimensões, em relação a ambientes virtuais**. Em contra partida, o sistemas CAD possuem um sistema de coordenadas absoluto e transformações matriciais matemáticas que possibilitam translação, rotação e escalonamento (BESANT, 1986). Os procedimentos elaborados, conforme os resultados do ensaio de posicionamento espacial de ambientes virtuais, trazem uma forma de referenciar o sistema de MoCap inercial a partir do sistema de coordenadas CAD.

A tecnologia de MoCap utilizada nesta pesquisa é composta de sensores inerciais, que estão sujeitos ao **desvios de posicionamento, denominado drift** (CARVALHO, 2011). Neste aspecto a integração com CAD, onde são conhecidas as coordenadas do corpo de captura, através de seu sistema de coordenadas, permitiu reduzir o efeito do erro de posicionamento, sem prejudicar a posição dos movimentos capturados durante a simulação.

A última questão de pesquisa foi estruturada de forma a entender **como compatibilizar as medidas antropométricas entre os atores relacionados ao sistema: corpo de captura, avatar do sistema de MoCap MVN e o manequim digital Human**. Esta problemática envolveu o relacionamento de diversos aspectos para sua compreensão e resolução. O primeiro aspecto foi entender o processo de *retargeting*, conforme classificado por Chung e Lee (2004), onde um modelo biomecânico articulado, proveniente do MVN com os dados capturados, é integrado ao DELMIA, possibilitando adaptar ao modelo biomecânico do Human, que possui diferentes características. O segundo aspecto refere-se às dificuldades operacionais em obter medidas antropométricas em duas dimensões, utilizando antropometria estática e, adaptá-las aos modelos tridimensionais. Por fim, do ponto de vista da compatibilização dos modelos, é necessário um processo iterativo, levando-se em consideração medidas importantes no projeto em desenvolvimento, para validação do modelo do Human.

Do ponto de vista metodológico, a pesquisa foi conduzida pela visão clássica da engenharia, sob o olhar da Ciência do Projeto (*Design Science*) de Hubka e Eder (1995), onde a *projetação* ocorre pela transformação de requisitos e necessidades em uma descrição estruturada do que o sistema técnico pode fazer para atender tais e exigências, pela transformação do próprio sistema técnico (Figura 5-1).

Figura 5-1: Modelo de transformação de sistemas técnicos



Fonte: Hubka e Eder (1995)

Para Béguin (2008), “a concepção contínua no uso”, mostrando que os operadores modificam as formas de uso *crystalizadas* pelos projetistas, desenvolvendo margens de manobra para utilizarem os dispositivos técnicos (*plasticidade*). Logo, o método de pesquisa utilizado segue a mesma lógica de transformação do sistema técnico. Os ensaios experimentais foram elaborados visando entender as transformações resultantes no sistema integrado, das diferentes possibilidades de configuração de maneira isolada e pela combinação destas (delineamento fatorial). Com isto foi possível compreender cada parte da estrutura do sistema, seus componentes e inter-relações, para desenvolvimento dos procedimentos de operacionalização do sistema atendendo aos requisitos estipulados. É possível concluir que o sistema técnico estudado, transpõe os modelos de uso *crystalizados* pelos projetistas no desenvolvimento das diferentes tecnologias, para atender aos requisitos para criação de simulações com manequins digitais, ampliando assim, as possibilidades de uso.

5.2 Conclusões acerca dos objetivos de pesquisa

Sob a perspectiva dos objetivos específicos norteadores da pesquisa, é possível concluir que obteve-se êxito em disponibilizar conhecimentos sobre um ferramental tecnológico pouco desenvolvido no campo da ergonomia, suportado pela revisão bibliográfica acerca das características tecnológicas e sobre os sistemas de captura de

movimentos, sobretudo pelo desenvolvimento prático, onde os diferentes ensaios cobriram grande parte das funcionalidades dos sistema integrado.

Com relação ao objetivo de demonstrar as possibilidades de configuração do sistema, baseado nas características da atividade simulada, foi observado que é possível criar situações de captura para diferentes tipos de interações entre o corpo de captura e o ambiente físico e reproduzir no ambiente virtual, mesmo com as restrições técnicas do sistema inercial.

Por fim, quanto aos procedimentos operacionais para utilização do sistema, é possível concluir que os conhecimentos sistematizados para as diferentes etapas de configuração, transformam o processo geral de integração do sistema e, contribuem para sua utilização prática, de forma específica e contextualizada.

5.3 Contribuições do sistema integrado para o projeto de situações produtivas

As abordagens de concepção em ergonomia discutidas na revisão bibliográfica deste trabalho apresentam-se fundamentadas em uma dupla construção: técnica e social. A construção técnica está pautada nos métodos e instrumentos que permitem análise e validação de dispositivos considerando o trabalho futuro, destacando-se as simulações. Para Daniellou (2002, p. 33), estes métodos devem ser precisos “para permitir que essas simulações desemboquem efetivamente em uma abordagem realista da atividade futura possível nas novas instalações”.

O processo de criação de ambientes virtuais de modelagem e simulação apresentado por Ziolk e Kruithof (2000), é dividido em três áreas: ambiente CAD, criação de manequins e análise da interação dos manequins com ambientes CAD. Nesta perspectiva, o sistema integrado MoCap-CAD é inserido, contribuindo em dois aspectos relevantes. O primeiro aspecto está relacionado com a presença simultânea de manequins digitais, juntamente com um sistema CAD, onde os ambientes (geometrias) são modelados e podem ser editadas no mesmo ambiente. Este fato facilita a criação da simulação, pois não são necessários processos de exportação e importação de geometrias, como para outros simuladores humanos presentes no mercado, como por o exemplo o Jack (BRAATZ, 2009).

O segundo aspecto está relacionado com a criação das análises. Para Ziolk e Kruithof (2000 p. 826), “uma das primeiras formas de avaliação e análise a serem realizadas é criação da postura e posicionamento do manequim no ambiente virtual”, porém são fontes de erros pelo não posicionamento adequado dos manequins, posturas inconsistentes e teste de posturas únicas. Isto ocorre pela dificuldade e tempo despendido para manipular as juntas e

segmentos dos manequins de forma manual e discricionária. A utilização sistema integrado permite capturar movimentos reais realizados pelos trabalhadores e posicioná-los no ambiente virtual, referenciando o local real de trabalho, contribuindo para redução do tempo de criação deste tipo de análise, e melhoria dos erros de construção postural e posicionamento associado ao “mouse e teclado”.

A reflexão sobre a técnica de simulação humana integrada com tecnologia de com captura de movimentos, como meio de comunicação entre os diferentes atores (como um objeto intermediário) parece válida. Para Bucciarelli (1996), a abordagem participativa necessita de espaços de discussão e construção de consensos, onde são confrontados mundos-objeto dos diferentes atores sociais. Os cenários de simulação (modelos) criados pelos ergonomistas buscam representar uma realidade futura da situação de trabalho, que deve ser discutida e validada na presença dos participantes do projeto. Desta forma, os modelos criados utilizando sistema de captura de movimentos, que possui a vantagem de possibilitar movimentos mais realistas e contextualizados em relação técnica tradicional, integrado com o sistema CAD, que possibilita conhecer os erros e os limites inerentes da tecnologia, contribuindo para utilizar o cenário criado como objeto intermediário e aumentar a credibilidade do mundo-objeto do ergonomista frente aos outros atores sociais.

O objeto de intermediação é discutido sobre uma plataforma CAD, típica da racionalidade de projetistas e com possibilidade de exclusão de outros atores, como operadores. Porém a interação do CAD com manequim digital ocorre pelos movimentos capturados, pela racionalidade da atividade desenvolvida, focalizando as trocas entre os atores. Tomando a abordagem dialógica apresentada por Béguin (2008), o sistema integrado pode ser utilizado para conceber as hipóteses instrumentais de maneira síncrona e estabelecendo a evolução do cenário simulado para dois lados: de um lado para o projetista que terá os resultados da simulação salvos em seu software de projeto (CAD); e por outro lado pelos operadores, que poderão colocar em movimento as suas necessidades, tornando esta técnica de simulação motor da concepção.

5.4 Limitações tecnológicas e dificuldades operacionais

Os resultados obtidos apontam que a utilização do sistema integrado pode ser considerada uma forma robusta para simulação dos movimentos humanos para projetos industriais. Porém existem limitações sobre tal aspecto. A primeira limitação é referente à situação e ao ambiente em que o sistema técnico foi explorado para obtenção dos resultados.

Em comparação com situações e ambientes reais de trabalho, o laboratório utilizado possui menor, complexidade e características, que limitam os aspectos tecnológicos do sistema. Contudo, os procedimentos operacionais foram desenvolvidos buscando incorporar tais limitações, principalmente a relacionada com a tecnologia dos sistemas de MoCap inerciais (presença de materiais ferromagnéticos). A segunda é de ordem temporal sobre as conclusões desta pesquisa, devido ao rápido desenvolvimento de novas tecnologias de captura de movimentos e *softwares* de modelagem e simulação humana, que transformam as técnicas atuais de simulação dos movimentos humanos.

É importante destacar que, a incorporação de movimentos aos manequins digitais com a utilização de sistemas de captura de movimentos, não simplifica o processo de utilização de manequins digitais, em comparação com o processo tradicional. Pelo contrário, torna-se mais latente a necessidade de usuários treinamentos para trabalharem com as diferentes tecnologias.

5.5 Continuidades da pesquisa

No contexto no qual está inserido o objeto de pesquisa e seus objetivos e aplicações, sua utilização está pautada na dupla construção de processos de projeto, discutida ao longo deste trabalho. Desta forma, vislumbra-se para estudos futuros discutir dois aspectos.

O primeiro no plano técnico que visa adicionar mais corpos de captura, ou seja, mais trabalhadores nas situações de captura. Novamente esta novidade técnica traz novos problemas operacionais, que devem ser investigados, buscando uma nova melhoria para as técnicas de simulação.

No plano conceitual, é importante discutir a contribuição efetiva deste ferramental para abordagens de concepção. Retomando a articulação metodológica para condução de projetos, proposta por Menegon (2008) e apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a partir do processo iterativo que utiliza diversas ferramentas na criação de cenários de simulação para possibilitar espaços de interação entre ergonomistas, projetistas e operadores. A construção destes cenários demanda recursos computacionais, humanos e principalmente de tempo para proporcionar qualidade na **Reconstrução da Atividade**. Portanto, a utilização de um sistema de captura de movimentos integrado com um *software* de simulação humana, capaz de reproduzir os movimentos humanos com fidedignidade em ambiente virtual, possui potencial para: i) aprimorar as possibilidades de

simulação, pela melhora da consideração dos movimentos humanos e ii) aumentar a quantidade de **Cenários Evolutivos** elaborados, sem infringir a temporalidade do projeto.

Como destacado por Béguin (2008 p. 74), “a introdução de uma novidade técnica, numa dada situação, permite resolver antigos problemas, mas ela modifica a natureza da tarefa e cria novos problemas para os quais novas formas de ação serão necessárias”. Portanto é necessário utilizar o sistema integrado em projetos de concepção, para validar suas contribuições e estabelecer novos desafios para o uso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, J.; SZNELWAR, L. I.; SILVINO, A.; SARMET, M.; PINHO, D. **Introdução à Ergonomia: da Prática à Teoria**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- AGOSTON, M. K. **Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms**. Estados Unidos: Springer, 2005.
- AUTODESK. Autodesk Exchange. **AutoCAD Mechanical**, 2011. Disponível em: <http://exchange.autodesk.com/autocadmechanical/ptb/online-help/AMECH_PP/2012/PTB/pages/WS1a9193826455f5ff-6ab24494122f0f3d6b8-1b39.htm>. Acesso em: maio 2013.
- AUTODESK. AutoCAD 2013. **AutoCAD Help**, 2012. Disponível em: <<http://docs.autodesk.com/ACD/2013/PTB/index.html?url=files/GUID-9DACE807-BC9D-4357-B47E-C6199F6AF1A2.htm,topicNumber=d30e58918>>. Acesso em: maio 2013.
- BADLER, N. **Virtual Humans for Animation, Ergonomics, and Simulation**. University of Pennsylvania, Philadelphia, 1997. Disponível em: <<http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1052&context=hms>>. Acesso em: maio 2013.
- BAPTISTA, M. N.; CAMPOS, D. C. **Metodologia de pesquisa em ciências: análises quantitativa e qualitativa**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- BESANT, C. B. **CAD/CAM: projeto e fabricação com auxílio de computador**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1986.
- BÉGUIN, P. Argumentos para uma abordagem dialógica da inovação. **Laboreal**, v. 4, p. 72-82, 2008.
- BÉGUIN, P.; DUARTE, F. A inovação entre o trabalho dos projetistas e o trabalho dos operadores. **Laboreal**, v. 4, p. 10-14, 2008.
- BRAATZ, D. **Análise da aplicação de ferramenta computacional de modelagem e simulação humana no projeto de situações produtivas**. 2009. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). PPGEP/DEP Universidade Federal de São Carlos, São Carlos 2009.
- BRAATZ, D.; MENEGON, N. L.; FONTES, A. R. M.; TONIN, L. A. Simulação humana digital na concepção de postos de trabalho: estudo comparativo de casos. **Gestão e Produção**, v. 19, p. 79-92, 2012.
- BUCCIARELLI, L. **Designing engineers**. Massachusetts: MIT press, 1996. 230 p.
- CARVALHO, A. G. **Influência da modelagem dos componentes de bias instabilidade dos sensores inerciais no desempenho do navegador integrado SNI/GPS**. 2011. 146 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.

CHUNG, H. S.; LEE, Y. MCML: motion capture markup language for integration of heterogeneous motion capture data. **Computer Standards & Interfaces**, v. 26, p. 113-130, 2004.

DANIELLOU, F. Métodos em ergonomia de concepção: A análise de situações de referência e a simulação do trabalho. In: DUARTE, F. (Org). **Ergonomia e projeto na indústria de processo contínuo**. Rio de Janeiro: Lucerna, 2002. p. 29-33.

DANIELLOU, F. Questões epistemológicas levantadas pela ergonomia de projeto. In: _____ (Org.). **A ergonomia em busca de seus princípios: debates epistemológicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

_____. A ergonomia na condução de projetos de concepção de sistemas de trabalho. In: FALZON, P. (Editor). **Ergonomia**. São Paulo: Editora Blucher, capítulo 21, p. 303-315, 2007.

_____. **La prise en compte des facteurs humains et organisationnels dans le projet de conception d'un système à risques**. Les cahiers de la sécurité industrielle. Toulouse: FONCSI, 2013. 84 p.

DUARTE, H. E.; **Anatomia Humana**. Florianópolis: Biologia/EaD/UFSC, 2009, 174p.
Disponível em:

<http://www.cos.ufrj.br/~alfredo/classnotes/LUIS%20ALFREDO%20Livro_Anatomia_Humana_Professor_Hamilton.pdf>. Acesso em: nov. 2013.

EDER, W. E. Theory of technical system and engineering design science: legacy of Vladimir Hubka. In: International Design Conference, 10., 2008, Dubrovnik. **Proceedings...** Dubrovnik: Design Society, 2008. p. 19-30.

FARREL, K. **Kinematic human modeling and simulation using optimization-based posture prediction**. 2005. 93 p. Dissertação (Mestrado) - The University of Iowa, Iowa, 2005. Disponível em: <<http://www.loomingsuspensions.com/docs/thesis.pdf>>. Acesso em: maio 2013

FOLCHER, V. Appropriating artifacts as instruments: when design-for-use meets design-in-use. **Interacting with Computers**, v. 15, p. 647-663, 2003.

GLEICHER, M. Retargeting motion to new characters. In: SIGGRAPH, 25., 1998, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ACM, 1998. p. 1-10.

GOMIDE, J.V. B.; FLAM, D. L.; PACHECO, D.; ARAÚJO, A. A. Captura de movimento e Animação de Personagens em Jogos. In: Brazilian Symposium on Games and Digital Entertainment, 8., 2009, Rio de Janeiro. **Simpósio...** Rio de Janeiro: PUC, 2009. p. 1-15.

GROCHOW, K.; MARTIN, S.; HERTZMANN, A.; POPOVIC, Z. Style-based inverse kinematics. **ACM Transactions on Graphics**, New York, v. 23, n. 3, p. 522-531, 2004.

GUÉRIN, F. et al. **Compreender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. 200 p.

HOREJSI, P.; GORNER, T.; KURKIN, O.; POLASEK, P.; JANUSKA, M. Using Kinect technology equipment for ergonomics. **MM Science Journal**, p. 388-393, 2013.

HUBKA, V.; EDER, W. E. **Design Science**: introduction the needs, scope and organization of engineering design knowledge, 2. ed. Nova York: Springer, 1995.

IIDA, I. **Ergonomia**: Projeto e Produção. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 614 p.

IPI SOFT. Motion Capture for the Masses. Demo videos, 2012. Disponível em: <<http://ipisoft.com/gallery/>>. Acesso em: maio 2013.

KANG, B.; LEE, D.; CHUNG, M.; KYUNG, G.; NAM, K. A Method to Create Dynamic Motions of Digital Human Models and a Case Study. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 56, 2012, Boston. **Proceedings...** Boston: SAGE, 2012. p. 2542-2546.

LÄMKULL, D.; HANSON, L.; ÖRTENGREN, R. A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles. **International Journal of Industrial Ergonomics**, n. 39, p. 428-441, 2009.

LEAKE, J.; BORGERSON, J. **Manual de desenho técnico para engenharia**: desenho, modelagem e visualização. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MAGISTRIS, G.; MICAELLI, A.; EVRARD, P.; ANDRIOT, C.; SAVIN, J.; GAUDEZ, C.; MARSOT, J. Dynamic control of DHM for ergonomic assessments. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 43, p. 170-180, 2013.

MANSSOUR, I. H. **Introdução à VRML 2.0**, 2000. Disponível em: <<http://www.inf.pucrs.br/manssour/VRML/ConceitosImportantes.html>>. Acesso em: jan. 2013.

MÁSCULO, F. S. Biomecânica. In: MÁSCULO, F. S.; VIDAL, M. C (Orgs). **Ergonomia**: trabalho adequado e suficiente. Rio de Janeiro: Elsevier/ABEPRO, 2011. p. 167-195.

MENEGON, N. L.; BRAATZ, D.; SECCHIN, V. M. S.; REGAZZINI, M. L. L.; LA SALVIA, A. B. N.; PEREIRA, W. A.; NAVEIRO, D. M.; ZAMBERLAN, M. C. P. L.; PASTURA, F. C. H. Pesquisa Antropométrica Embraer. In: ABERGO, 12., 2002, Recife. **Anais...** Recife: ABERGO, 2002.

MENEGON, N. L.; **Projeto de processos de trabalho**: o caso da atividade do carteiro. 2003. 259 p. Tese (Doutorado em Produto) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

MENEGON, N. L. **Termo de cooperação que entre si celebram a Petróleo Brasileiro S.A. e a Universidade Federal de São Carlos**: desenvolvimento e transferência de tecnologia de ergonomia através da fundação de apoio institucional ao desenvolvimento científico e tecnológico. Cubatão, 2008.

MENEGON, N.L.; BRAATZ, D.; TONIN, L. Simulação Humana. In: MÁSCULO, F.; VIDAL, M. **Ergonomia**: trabalho adequado e eficiente. Rio de Janeiro: Elsevier/ABEPRO, 2011. p. 365-393.

META MOTION. Gypsy Motion Capture System. **Workflow**, 2010? Disponível em: <<http://www.metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system-workflow.htm>>. Acesso em: maio 2013.

MONTMOLLIN, M. Ergonomias. In: CASTILLO, J. J.; VILLENA J. (Org.). **Ergonomia: conceitos e métodos**. Lisboa: Dinalivro, 2005. p. 103-111.

MULDER, A. G. E. Simon Fraser University. Hand Centered Studies of Human Movement Project. **Human movement tracking technology**, 1994. Disponível em: <<http://xspasm.com/x/sfu/vmi/HMTT.pub.pdf>>. Acesso em: maio 2013.

NATURALPOINT. NaturalPoint Tracking Toolkits. **Users Manual: Getting Started**, 2008.

PINTO, S. B. **Visualização de objetos 3D**. ATCS, 1990? Disponível em <<http://www.atcsystems.com.br/upload/nt-01/ComputacaoGrafica.htm>>. Acesso em: maio 2013.

POIRSON, E.; DELANGLE, M. Comparative analysis of human modeling tools. In: International Digital Human Modeling Symposium, 2, 2013. **Proceedings...** Ann Arbor: University of Michigan, 2013.

POLHEMUS. Motion Tracking. **Liberty Latus**, 2012? Disponível em: <http://www.polhemus.com/?page=Motion_Liberty_Latus>. Acesso em: maio 2013.

QUEIROZ, D. P. **Avaliação de métodos de rastreamento de marcadores para um sistema óptico de captura de movimento**. 2011. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

RAMÓN, J. A. C.; CANDELAS, F. A.; MEDINA, F. T. Captura de Movimento y Localización en Interiores Aplicadas a Entornos Industriales. In: Jornadas de Automática, 28., 2007. **Jornada**. Huelva: Comité Español de Automática, 2007. p. 331-339.

ROETENBERG, D. **Inertial and Magnetic Sensing of Human Motion**. 2006. 126 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Twente, Alemanha, Enschede, 2006.

ROETENBERG, D.; LUINGE, H.; SLYCKE, P. MVN: **Xsens MVN: Full 6DOF Human Motion Tracking Using Miniature Inertial Sensors**, 2013.

ROSADO, V. O. G. Universidade Estadual Paulista - Câmpus de Guaratinguetá. **DESENHO TÉCNICO: Fundamentos Teóricos e Introdução ao CAD**, 2005. Disponível em: <http://www.esmf.pt/paginas/cursos/energias_renovaveis09/desenho_tecnico_10e/m3_recursos/linhas_e_projeccoes.pdf>. Acesso em: março 2013.

SANTOS, W. R.; TOLEDO, P. R.; BRAATZ, D.; COSTA, M. A. B.; MENEGON, N. L. Using Game Engine as communication and interactive tool in design of productive situations. In: International Digital Human Modeling Symposium, 2., 2013, Ann Arbor. **Proceedings...** Michigan: University of Michigan, 2013.

SCHWARTZ, Y. Ergonomia, filosofia e exterritorialidade. In: DANIELLOU, F. (Coord.). **A ergonomia em busca de seus princípios: debates epistemológicos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. p. 141-179.

SILVA, F. W. S. Engenharia de Sistemas e Computação (COPPE/UFRJ) - Laboratório de Computação Gráfica (LCG). **Motion Capture: Introdução à Tecnologia**, 1997. Disponível em: <<http://www.visgraf.impa.br/Projects/mcapture/publ/lcg-02.pdf>>. Acesso em: maio 2013.

SUNDIN, A.; ÖRTENGREN, R. Digital Human Modeling for CAE Applications. In: SALVENDY, G. (Ed.). **Handbook of Human Factors and Ergonomics**. New Jersey: John e Wiley & Sons., 2006 p. 1053 -1078

TOSETO, T.; MENEGON, L. N. Aplicação de dados antropométricos e variáveis biomecânicas na construção de bibliotecas de posturas para utilização em ambiente simulado. In: ENEGEP, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008.

TOZZI, C. L. **PAC: projeto auxiliado pelo computador**. Campinas: UNICAMP/Editora Papyrus, 1986.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção: Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 2012.

VICON. Life Science Case Study. **The dance of love**: Northumbria University, 2013. Disponível em: <http://www.vicon.com/company/documents/Northumbria_jan13.pdf>. Acesso em: maio 2013.

WU, R. L.; VOLPE, L. A. A.; SANTOS, W. R.; TONIN, L. A.; MENEGON, N. L. **Projeto Conforto: Relatório sobre atividades desenvolvida pela equipe UFSCar entre Junho e Outubro de 2009**. Laboratório de Ergonomia, Simulação e Projeto de Situações Produtivas (PSPLab) do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, 2009, (material cedido).

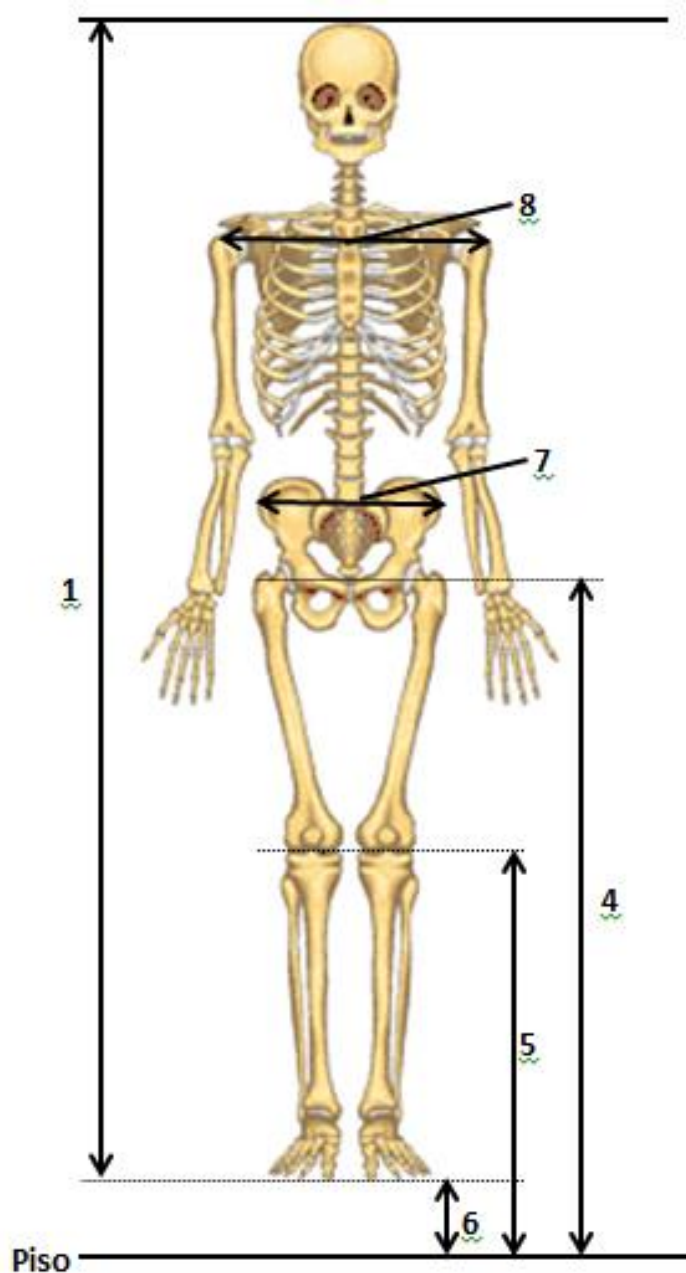
XSENS. Moven Motion Capture System. **MVN: user manual**, 2012.

YOUNG, A. D. **From posture to motion: the challenge for the real time wireless inertial motion capture**. International Conference on Body Area Networks, 5, 2010. ACM: New York, 2010, p. 131-137.

ZHANG, Z. Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. **IEEE MultiMedia**, v. 19, n. 2, p. 4-10, 2012.

ZIOLEK, S. A.; KRUIHOF, P. C. J. Human modeling & simulation: a primer for practioners. In: HFES, 44., 2000. **Proceedings**. San Diego: HFES, 2000. p. 825-827.

APÊNDICE A – Descrição medidas antropométricas do MVN



Identificação	Medida	Descrição
1	Altura	Altura do piso até o topo da cabeça em pé.
2	Envergadura	Topo dos dedos da mão direita até o topo dos dedos da mão esquerda em posição "T".
3	Tamanho do pé	Ponta do sapato até o final do calcanhar.
4	Altura quadril	Altura do piso até a proeminência óssea do trocânter maior.
5	Altura joelho	Altura do piso até epicôndilo lateral do osso femoral.
6	Altura maléolo	Altura do piso até a ponta distal do maléolo.
7	Largura quadril	Distância entre a espinha ilíaca ântero-superior direita e esquerda.
8	Largura ombro	Distância entre ponta distal do acrômio direito e esquerdo.
9	Espessura sola do sapato	Distância entre o maléolo e a espessura da sola do sapato utilizado durante a captura.

APÊNDICE B – Dimensões corporais funcionais no ambiente virtual

Nos Quadros abaixo são apresentadas as medidas antropométricas resultante no ambiente virtual do DELMIA, obtidas utilizando-se sistema de MoCap e trena respectivamente.

Quadro: Medidas antropométricas utilizando-se sistema de MoCap

Dimensões de referência	Utilizando sistema de captura de movimentos (valores em cm)					
	MVN simplificado e Human simplificado	MVN detalhado e Human intermediário	MVN detalhado e Human simplificado	MVN simplificado e Human intermediário	MVN simplificado e human detalhado	MVN detalhado e Human detalhado
Alcance frontal alongado	99,0	93,0	102,0	95,0	105,0	98,0
Comprimento nádega-calcanhar	124,8	125,0	125,0	90,0	130,0	130,0
Alcance vertical sentado	140,0	134,0	137,0	137,0	137,0	135,0
Alcance frontal de apreensão	94,0	90,0	95,0	90,0	95,0	85,0
Alcance lateral do braço	95,0	88,0	95,1	88,0	95,1	93,0
Alcance vertical de apreensão	222,0	215,0	219,0	217,0	219,0	224,0

Fonte: Autor

Quadro: Medidas antropométricas utilizando-se sistema de MoCap

Dimensões de referência	Utilizando trena (valores em cm)					
	MVN simplificado e Human simplificado	MVN detalhado e Human intermediário	MVN detalhado e Human simplificado	MVN simplificado e Human intermediário	MVN simplificado e human detalhado	MVN detalhado e Human detalhado
Alcance frontal alongado	96,0	103,0	107,0	103,0	92,0	100,0
Comprimento nádega-calcanhar	124,8	130,0	125,0	128,0	122,8	128,0
Alcance vertical sentado	145,0	142,0	145,0	142,0	139,0	137,0
Alcance frontal de apreensão	93,0	90,0	93,0	90,0	86,0	86,0
Alcance lateral do braço	95,0	94,0	94,0	97,0	92,0	95,0
Alcance vertical de apreensão	222,0	223,0	225,0	222,0	222,0	223,0

Fonte: Autor