

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMATIZAÇÃO DO PROJETO DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS  
PARA O EMPREGO DE FLUIDOS BIODEGRADÁVEIS

Tese submetida à  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

YESID ERNESTO ASAFF MENDOZA

Florianópolis, setembro de 2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mendoza, Yesid Ernesto Asaff

Sistematização do projeto de circuitos hidráulicos para o emprego de fluidos biodegradáveis / Yesid Ernesto Asaff Mendoza ; orientador, Victor Juliano De Negri ; co-orientador, Hubertus Murrenhoff. - Florianópolis, SC, 2013. 228 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Sistemas hidráulicos. 3. Fluidos biodegradáveis. 4. Sistematização de projeto. 5. Sistemas especialistas. I. De Negri, Victor Juliano. II. Murrenhoff, Hubertus. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMATIZAÇÃO DO PROJETO DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS  
PARA O EMPREGO DE FLUIDOS BIODEGRADÁVEIS

**YESID ERNESTO ASAFF MENDOZA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

**DOUTOR EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

---

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng. - Orientador

---

Prof. Hubertus Murrenhoff, Dr. - Ing. - Co-orientador

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng. - Coordenador do  
Curso



## BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr. Eng. (UNIJUI) - Relator

---

Dr.- Ing. Heinrich Theissen (IFAS – RWTH Aachen University)

---

Prof. Acires Dias, Dr. Eng.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.

---

Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.



*“Abre a mente ao que eu te revelo e  
retém bem o que eu te digo, pois não é  
ciência ouvir sem reter o que se  
escuta.”*

*Dante Alighieri*



*Para meus amores  
Cindy & Hana Sofia*



## AGRADECIMENTOS

À Deus por dar-me sabedoria, espírito e o livre arbítrio.

À minha esposa Cindy e minha filha HanaSo, as luzes, alegrias e inspirações da minha vida.

À família na minha terra que me apoiando e me incentivando à distância, se priva de minha companhia para que eu alcance minhas próprias conquistas.

Ao meu orientador, Victor Juliano De Negri pela amizade, orientação e incentivo em todas as etapas deste trabalho.

Ao Prof. Jonny da Silva, pelo suporte e contribuição durante o processo de desenvolvimento do protótipo do sistema especialista.

Ao Institute for Fluid Power Drives and Controls IFAS (RWTH-Aachen University), especialmente ao Prof. Hubertus Murrenhoff e ao Dr. Heinrich Theissen pelo suporte dado no intercambio acadêmico.

Aos *Laship boys*, pela amizade, ajuda, parceria, incentivo e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa cedida e incentivo ao desenvolvimento da pesquisa acadêmica.

Ao DAAD (German Academic Exchange Service) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do intercambio acadêmico na RWTH Aachen University.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional.



## SUMÁRIO

Lista de figuras .....	17
Lista de tabelas .....	21
Resumo.....	23
Abstract .....	25
1. Introdução .....	27
1.1 Definição do problema.....	28
1.2 Justificativas.....	31
1.3 Objetivo.....	33
1.3.1 Objetivos específicos .....	34
1.4 Estrutura do trabalho.....	34
2. Sistemas baseados em conhecimento (SBC).....	37
2.1 Conceitos básicos sobre SBC.....	37
2.2 Sistemas especialistas .....	39
2.2.1 Aquisição do conhecimento .....	43
2.2.2 Representação do conhecimento .....	44
2.2.3 Regras .....	45
2.2.4 Redes semânticas .....	46
2.2.5 Orientação a objetos.....	46
2.2.6 Implementação.....	48
2.2.7 Verificação e validação.....	49
2.3 Estado da arte dos sistemas especialistas.....	50
2.4 Observações finais sobre o capítulo .....	52
3. Fluidos biodegradáveis.....	53
3.1 Tipos de fluidos biodegradáveis.....	56
3.1.1 HETG - Fluidos hidráulicos à base de óleos vegetais.....	58
3.1.2 HEES - Fluidos hidráulicos sintéticos à base de ésteres .....	59
3.1.3 HEPG - Fluidos hidráulicos sintéticos à base de poliglicóis..	60
3.1.4 HEPR – Fluidos hidráulicos à base de polialfaolefinas ou hidrocarbonetos sintetizados.....	61
3.2 Propriedades dos fluidos hidráulicos e efeitos em seu desempenho .....	62
3.3 Fluidos biodegradáveis na hidráulica de potência.....	63
3.4 Conclusões sobre o capítulo.....	66
4. Estudo da influência de contaminantes em fluidos biodegradáveis ..	67
4.1 Descrição dos testes .....	69
4.1.1 Teste de estabilidade à oxidação.....	71
4.1.2 Teste de estabilidade hidrolítica.....	72
4.1.3 Teste de biodegradabilidade .....	73
4.1.4 Testes de viscosidade e TAN.....	74

4.2 Resultados.....	75
4.2.1 Estabilidade à oxidação .....	75
4.2.2 Viscosidade e TAN como resultado do teste de oxidação.....	78
4.2.3 Viscosidade e TAN como resultado do teste de hidrólises....	80
4.2.4 Ensaios de biodegradabilidade .....	81
4.3 Conclusões do capítulo .....	82
5. Sistematização do projeto de sistemas hidráulicos com fluidos biodegradáveis - SHBIO .....	85
5.1 Sistemas hidráulicos .....	85
5.2 Disponibilidade de informações .....	86
5.3 Proposta da sistematização do projeto de sistemas hidráulicos ...	87
5.4 Fase 1 Seleção do fluido biodegradável.....	91
5.4.1 Atividade 1.1 Campo de aplicação do sistema hidráulico .....	93
5.4.2 Atividade 1.2 Contato ou interação com água e/ou outros fluidos.....	96
5.4.3 Atividade 1.3 Rotulagem ecológica internacional.....	98
5.4.4 Atividade 1.4 Biodegradabilidade e ecotoxicidade .....	99
5.4.5 Atividade 1.5 Estabilidade ao envelhecimento (oxidação, hidrólise e anti-desgaste) .....	101
5.4.6 Atividade 1.6 Relação temperatura-viscosidade.....	103
5.4.7 Atividade 1.7 Apresentação das soluções: Tipo de fluido...	106
5.5 Fase 2 - Seleção de componentes.....	108
5.5.1 Atividade 2.1 Circuito de aplicação.....	111
5.5.2 Atividade 2.2 Reservatório .....	112
5.5.3 Atividade 2.3 Dispositivos de troca de calor e aquecimento	120
5.5.4 Atividade 2.4 Acumulador .....	122
5.5.5 Atividade 2.5 Filtros.....	123
5.5.6 Atividade 2.6 Bomba e/ou motor hidráulico .....	130
5.5.7 Atividade 2.7 Sistema de atuação.....	132
5.5.8 Atividade 2.8 Apresentação da solução: Componentes selecionados.....	132
5.6 Fase 3 - Monitoração do sistema .....	132
5.6.1 Atividade 3.1 Tipo de monitoração .....	135
5.6.2 Atividade 3.2 Pontos de monitoração ou coleta de amostras	138
5.6.3 Atividade 3.3 Apresentação da solução.....	139
5.7 Fase 4 – Apresentação de soluções – Relatório final.....	141
5.7.1 Atividade 4.1 Relatório final .....	141
5.8 Observações finais sobre o capítulo.....	141
6. Protótipo SHBIO.....	143
6.1 Descrição do protótipo SHBIO.....	143

6.1.1	Introdução .....	143
6.1.2	Funções .....	144
6.1.3	Entradas do sistema: requisitos de projeto .....	144
6.1.4	Saídas do sistema .....	145
6.1.5	Implementação .....	146
6.1.6	Método de inferência .....	146
6.1.7	Estrutura funcional.....	147
6.2	Aquisição do conhecimento .....	147
6.3	Representação do conhecimento .....	148
6.3.1	Orientação por objetos .....	148
6.3.2	Regras .....	149
6.4	Interface .....	150
6.5	Verificação & Validação.....	151
6.5.1	Verificação do protótipo .....	152
6.5.1.1	Especificações do sistema.....	152
6.5.1.2	Erros de semântica e sintática.....	152
6.5.1.3	Verificação de subsistema .....	152
6.5.2	Validação do protótipo.....	153
6.5.2.1	Validação informal .....	155
6.5.2.2	Validação formal .....	156
6.5.3	Estudo de caso (teste) .....	160
6.5.3.1	Observações e recomendações do especialista (estudo de caso).....	166
6.6	Considerações e síntese do capítulo.....	166
7.	Considerações finais.....	169
7.1	Contribuições .....	169
7.2	Conclusões .....	169
7.3	Sugestões para trabalhos futuros.....	172
8.	Referências bibliográficas .....	173
	Apêndices .....	190
A.	Propriedades dos fluidos hidráulicos biodegradáveis.....	191
B.	Base de dados de fluidos hidráulicos biodegradáveis comerciais 204	
C.	Arvores de decisão das principais regras.....	210
D.	Questionario de validação do protótipo.....	221
E.	Manual do protótipo – CLIPS .....	225



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variáveis para o projeto de sistemas hidráulicos .....	30
Figura 2. Acidentes com vazamentos de fluido hidráulico: a) Usina Sayano na Rússia; b) Campo Paru da Petrobras .....	31
Figura 3. Contextualização de SBC e SE dentro dos SI (REZENDE, 2005). .....	39
Figura 4. Arquitetura de um Sistema Especialista (SE) (adaptado de GIARRATANO e RILEY (1998)).....	40
Figura 5. Desenvolvimento de um sistema especialista (adaptado de SAJJA e AKERKAR, (2010)). .....	42
Figura 6. Exemplo de redes semânticas .....	46
Figura 7. Exemplo de estrutura orientada a objetos (Classes e subclasses).....	48
Figura 8. Fontes para produção de bio-óleos .....	54
Figura 9. Distribuição dos fluidos hidráulicos no mercado industrial (Murrenhoff, 2004) .....	55
Figura 10. Rotulagem para produtos ambientalmente corretos.....	55
Figura 11. Selos verdes no Brasil.....	56
Figura 12. Selo Verde Qualidade Ambiental .....	56
Figura 13. Classificação dos fluidos hidráulicos (adaptado de MANG and DRESEL, 2001) .....	57
Figura 14. Trator florestal Timberjack. (JOHN DEERE, 2010).....	64
Figura 15. Sistema hidráulico usando fluido biodegradável. a) Servomotor do regulador de velocidade; b) Unidade de potência das comportas.....	65
Figura 16. Unidade hidráulica de potência na Usina hidrelétrica de Langkampfen (Austria).....	65
Figura 17. Causas e efeitos do envelhecimento.....	68
Figura 18. Estratégia da pesquisa.....	70
Figura 19. a) Bancada experimental para determinar a estabilidade à oxidação, b) Procedimento do teste RPVOT .....	72
Figura 20. Ensaio experimental para determinar a estabilidade hidrolítica (adaptado de Klaas et al (2003).) a) banco de testes; b) Procedimento de ensaio .....	73
Figura 21. Testes de biodegradabilidade. a) amostras em frascos de vidro, b) Cromatógrafo de gás .....	74
Figura 22. Comparação visual do fluido A. (a) fluido novo, (b) fluido após o teste de oxidação, (c) fluido com óleo mineral (2%) após o	

teste de oxidação, (d) fluido com óleo mineral (10%) após o teste de oxidação.....	76
Figura 23. Estabilidade à oxidação do fluido A.....	77
Figura 24. Estabilidade à oxidação do fluido B.....	77
Figura 25. Estabilidade à oxidação do fluido C.....	78
Figura 26. Viscosidade após o teste de oxidação.....	79
Figura 27. TAN após o teste de oxidação.....	79
Figura 28. Viscosidade após o teste de hidrolises.....	80
Figura 29. TAN após o teste de hidrolises.....	81
Figura 30. Testes de biodegradabilidade do fluido A.....	82
Figura 31. Circuito hidráulico: a) Ilustração; b) Diagrama do circuito. (LISINGEN, I. VON e DE NEGRI, 2012).....	86
Figura 32. Representação gráfica do modelo do processo de desenvolvimento integrado de produtos – PRODIP (BACK et al., 2008).....	88
Figura 33. Visão geral da sistematização de projeto proposta para sistemas hidráulicos (SHBIO).....	90
Figura 34. Parâmetros que definem a seleção do fluido biodegradável	92
Figura 35. Estrutura da Fase 1- Seleção do fluido biodegradável.....	94
Figura 36. Aplicações industriais da hidráulica de potência.....	95
Figura 37. Aplicações móveis da hidráulica de potência.....	95
Figura 38. Grau ISO VG de viscosidade cinemática (ISO 3348).....	105
Figura 39. Diagrama viscosidade-temperatura (V-T) de fluidos hidráulicos biodegradáveis tipo HEES (Rexroth, 2010).....	106
Figura 40. Estrutura da Fase 2- Seleção de componentes (continua)..	109
Figura 41. Estrutura da Fase 2- Seleção de componentes (continuação).....	110
Figura 42. Circuito hidráulico de uma injetora de plástico (BOSCH REXROTH, 2012).....	111
Figura 43. Circuito hidráulico móbil (CATERPILLAR, 2012).....	112
Figura 44. Reservatório hidráulico (adaptado de TRINKEL, (2012))	113
Figura 45. Dimensionamento ótimo do reservatório.....	115
Figura 46. Dimensionamento de um reservatório reduzido.....	116
Figura 47. Leiautes de reservatórios hidráulicos. a) convencional horizontal, b) convencional vertical, c) forma de L, d) suspenso (adaptado de TRINKEL, (2012)).....	117
Figura 48. Configurações de placas defletoras (chicanas).....	119
Figura 49. Difusores para remoção de ar.....	119
Figura 50. Regras da localização dos tubos de sucção e retorno.....	120
Figura 51. Trocador de calor óleo-água (HYDAC, 2013).....	121

Figura 52. Aquecedor elétrico (BIG CHIEF, 2012) .....	121
Figura 53. Tipos básicos de acumuladores, a) de peso morto, b) mola, c) gás (separação diafragma ou bexiga), d) gás (sem separação gás/fluido), e) gás (separador de pistão) .....	123
Figura 54. Localização dos vários tipos de filtros .....	124
Figura 55. Disposição dos filtros em um circuito móbil (adaptado de (DONALDSON, 2012)).....	125
Figura 56. Disposição dos filtros em um circuito industrial (adaptado de (DONALDSON, 2012)).....	125
Figura 57. Detalhes de um respiro de ar dessecativo (Air Sentry®, 2012) .....	129
Figura 58. Pressões máximas de bombas hidráulicas vs. pressões máximas permitidas para fluidos biodegradáveis .....	131
Figura 59. Diferentes condições e definições no fluido. Adaptado de Riedel and Murrenhoff (2009). .....	133
Figura 60. Estrutura da Fase 3 - Monitoração do sistema .....	134
Figura 61. Tipos de sensores .....	136
Figura 62. Tipo de monitoração .....	137
Figura 63. Pontos de monitoração on-line e/ou coleta de amostras de laboratório .....	140
Figura 64. Estrutura da Fase 4 – Apresentação das soluções – Relatório final .....	141
Figura 65. Estrutura funcional do protótipo SHBIO .....	147
Figura 66. Diagrama de classes e subclasses do sistema.....	149
Figura 67. Interface de entrada CLIPS .....	150
Figura 68. Visualização da interface gráfica de saída HTML.....	151
Figura 69. Representação gráfica dos resultados da validação do SE, segundo os especialistas consultados .....	158
Figura 70. Tela de apresentação do protótipo SHBIO .....	161
Figura 71. Tela do SHBIO (mensagem de ajuda e confirmação de respostas).....	162
Figura 72. Tela inicial do relatório final.....	163
Figura 73. Soluções (fluidos selecionados) geradas pelo protótipo ....	164
Figura 74. Tela de solução da fase 2 do protótipo (reservatório) .....	165
Figura 75. Tela da solução da fase 3 do protótipo (tipo de monitoração) .....	165
Figura A1. Relação viscosidade-temperatura entre o bio-óleo (HETG 32) e óleo mineral (adaptado de Theissen (2006)).....	192
Figura A2. Densidade típica de fluidos hidráulicos (adaptado de YEAPLE (1990)).....	193

Figura A3. Formação de espuma (adaptado de SUZUKI et. al (2002)).....	196
Figura A4. Comparação da propriedade de anti-desgaste (adaptado de HAMID (2008)).....	198
Figura A5. Comparação da biodegradabilidade de fluidos (adaptado de HENKE (1994)).....	200
Figura A6. Biodegradabilidade de bio-óleos hidráulicos. (adaptado de IN-SIK (2008)).....	201
Figura C1. Arvore de decisão 1 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos.....	211
Figura C2. Arvore de decisão 2 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos.....	212
Figura C3. Arvore de decisão 3 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos.....	213
Figura C4. Arvore de decisão 4 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos.....	214
Figura C5. Arvore de decisão 5 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos.....	215
Figura C6. Arvore de decisão 6 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos.....	216
Figura C7. Arvore de decisão 7 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos.....	217
Figura C8. Arvore de decisão das regras que definem a compatibilidade de vedações com fluidos biodegradáveis .....	218
Figura C9. Arvore de decisão das regras que definem a compatibilidade de materiais de fabricação com fluidos biodegradáveis.....	219
Figura C10. Arvore de decisão das regras que selecionam o tipo de bomba hidráulica.....	220
Figura E.1 Carregando o protótipo no ambiente CLIPS.....	227
Figura E.2 Tela de apresentação do protótipo SHBIO.....	227
Figura E.3 Tela de apresentação de soluções do arquivo de saída.....	228

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais diferenças entre os sistemas convencionais e os sistemas baseados no conhecimento (Rezende, 2005).....	38
Tabela 2. Fluidos hidráulicos biodegradáveis utilizados nos testes .....	71
Tabela 3. Fluido biodegradável listado na base de dados.....	93
Tabela 4. Valores limites residuais de fluido mineral para os fluido biodegradáveis de acordo com a norma ISO 15380 (2002). .....	98
Tabela 5. Métodos padrões internacionais para medir a biodegradabilidade (modificado de Willing (2001)).....	100
Tabela 6. Modelo de apresentação do relatório final (seleção do fluido) .....	107
Tabela 7. Compatibilidade de vedações com fluidos biodegradáveis .	108
Tabela 8. Compatibilidade dos fluidos biodegradáveis com materiais de fabricação de componentes hidráulicos .....	114
Tabela 9. Classes de limpeza de acordo com a norma ISO 4406 (ISO, 1999) .....	127
Tabela 10. Razão Beta/Eficiências.....	127
Tabela 11. Níveis de limpeza recomendados para componentes hidráulicos segundo norma ISO 4406 (ISO, 1999).....	128
Tabela 12. Tabela da verdade para validação da fase 1 do sistema especialista .....	154
Tabela 13. Métricas de avaliação do protótipo.....	155
Tabela 14. Resultados da validação do SE, segundo os especialistas consultados.....	157
Tabela 15. Requisitos de projeto do Problema 1 .....	163
Tabela A.1 Comparação de toxicidade de fluidos hidráulicos (adaptado de CHENG et al. (2001)).....	202



## RESUMO

A presente tese trata da sistematização do processo de projeto para sistemas hidráulicos com o uso de fluidos biodegradáveis. Atualmente a tendência de aumento de potência nos sistemas hidráulicos é alcançada por meio do emprego de maiores pressões de operação e conseqüentemente, utilizando componentes menores. Altas pressões implicam em maior possibilidade de vazamentos e, por conseguinte, derramamento de fluido. Esses acidentes podem trazer sérios prejuízos ao meio ambiente como, por exemplo, no setor de geração de energia elétrica, e em especial nas Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), cujos volumes de fluido hidráulico mineral são da ordem de centenas de litros e que usualmente operam desassistidas e monitoradas a distância, de forma que não é possível agir rapidamente para evitar que eventuais vazamentos contaminem os recursos hídricos. Outra perspectiva deste problema refere-se aos derrames existentes em sistemas hidráulicos móveis como, por exemplo, máquinas agrícolas, onde estudos indicam que são derramados anualmente no solo de cultivos milhares de litros de óleo mineral conseqüente de falhas e vazamentos nestes sistemas hidráulicos. Neste contexto e com o intuito de evitar ou mitigar a questão do risco ambiental, identifica-se no Brasil e no mundo um caminho de incentivos a procura de desenvolvimento de sistemas e/ou produtos ecologicamente corretos, tal como o uso crescente de fluidos biodegradáveis nos sistemas hidráulicos de potência, substituindo o atualmente usado fluido mineral. Sendo assim, no presente trabalho apresenta-se uma solução para o projeto de sistemas hidráulicos que possam empregar fluidos biodegradáveis, a qual foca-se na sistematização de procedimentos para especificação e análise dos requisitos de sistemas hidráulicos, com o fim de adequar e otimizar o desempenho e a vida útil dos componentes assim como do próprio fluido. Com estratégias adequadas de projeto, empregando-se conceitos de sistemas hidráulicos, análise de fluidos, monitoração e tecnologia ambiental, a sistematização de projeto garante a minimização dos problemas intrínsecos na utilização de fluidos biodegradáveis nos sistemas hidráulicos apresentando ao mesmo tempo, uma solução no âmbito ecológico e de projeto para o desenvolvimento de novas tecnologias para os sistemas hidráulicos, seja na área industrial ou móbil. A estruturação da sistematização é orientada por meio do desenvolvimento de um protótipo de sistema computacional inteligente, utilizando a técnica de sistema baseado no conhecimento (SBC). Baseando-

se nos requisitos de projeto, o protótipo incorpora critérios para análise e tomada de decisão, o qual resulta na seleção (especificação) de um ou vários fluidos biodegradáveis, a seleção dos principais componentes do circuito hidráulico, assim como a definição de diretrizes de monitoração do sistema hidráulico. Finalmente, a sistematização sintetizada no protótipo SBC é verificada e validada por meio de avaliações de especialistas de diferentes domínios de conhecimento.

## ABSTRACT

This thesis deals with the systematization of design process for hydraulic systems using biodegradable fluids. Nowadays, the trend in power increase in hydraulic systems is achieved through of the use of high operating pressures and therefore, using small components. High pressures require a greater chance of leakage and as result, spilling of fluid. These accidents can cause serious damage to the environment, for example, in the electric power generation sector, especially in the Small Hydro Power (SHP), whose volume of mineral hydraulic fluid is the order of hundreds of liters and usually operate unattended and monitored from a distance, so that it is not possible to act quickly to prevent contamination of water resources due to any incidental leaks. Another perspective to this problem relate to leakage existing in hydraulic mobile systems, for example, agricultural machines, where studies indicate that are annually poured on farmland thousands of liters of mineral oil, resulting from failures and leakages in these hydraulic systems. In this context and in order to avoid or mitigate the issue of environmental risk is identified in Brazil and the world a way of incentives in search of systems development and / or environmentally friendly products, such as the increasing use of biodegradable fluids in hydraulic systems, replacing currently used mineral fluid. Therefore, in this work a solution for the design of hydraulic systems that may employ biodegradable fluids is proposed, which focuses on the systematization of procedures for specifying and analyzing the requirements of hydraulic systems in order to adapt and optimize the performance and component life, as well as the fluid itself. With appropriate strategies of design, using concepts of hydraulic systems, fluid analysis, monitoring, and environmental technology, the systematization guarantees the minimization of the problems inherent in the use of biodegradable fluids in hydraulic systems, where is presented at the same time a solution within ecological and design scopes for the development of new technologies for hydraulic systems, whether in industrial or mobile sector. The structuring of the systematization is oriented through the development of a computational intelligent system prototype, using the technique of the knowledge-based system (SBC). Based on the design requirements, the prototype incorporates criteria to analysis and decision making, which results in the selection (specification) of one or various biodegradable fluids, the selection of the main components of the hydraulic circuit, well as defini-

tion of guidelines monitoring of the hydraulic system. Finally, the systematization which is encapsulated in the prototype is verified and validated by expert reviews of different knowledge domains.

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho é abordada a estruturação do processo de projeto de sistemas hidráulicos introduzindo uma nova variável aos requisitos do projeto, a qual é o uso de fluidos biodegradáveis como fluido de transmissão de potência. Devido à natureza fundamentalmente heurística de projetos de sistemas hidráulicos, especialmente na seleção dos componentes, à seleção do fluido e à exigência de conhecimento altamente especializado envolvido nessa atividade, são utilizadas para este trabalho técnicas de Inteligência Artificial (IA) conhecidas por Sistemas Baseados em Conhecimento (SBC) com o objetivo de estruturar de forma prática a sistematização proposta.

Atualmente a grande preocupação de proteger o meio ambiente tem incentivado pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias através de um importante esforço por parte de governos, a indústria privada e o surgimento de uma nova consciência ecológica, que já não se manifesta apenas por grupos ambientalistas, mas vem sendo incorporada por um número cada vez maior de fabricantes preocupados com produtos ecologicamente corretos. Algumas dessas pesquisas e aplicações na indústria têm quebrado o paradigma de uso de sistemas hidráulicos com óleo mineral, disponibilizando soluções hidráulicas com fluido biodegradável.

Fluidos hidráulicos biodegradáveis, alguns dos quais são baseados em óleos vegetais, ésteres naturais ou água, representam uma interessante solução ecologicamente aceitável tendo muitas vantagens como elevada biodegradabilidade, não-tóxicos para organismos vivos e não-poluíntes para a água, solo e ar.

Enquanto os fluidos baseados em ésteres são os mais produzidos comercialmente e usados em aplicações industriais, os fluidos de base vegetal (colza, soja, girassol, palma etc), que são um dos recursos naturais disponíveis em abundância, são considerados os mais prováveis candidatos a um fluido hidráulico, totalmente biodegradável.

A principal função do fluido hidráulico seja biodegradável ou mineral é transmitir potência de forma eficiente, devendo possuir características que se somem às dos componentes do sistema hidráulico e que favorecem a operação adequada destes sob diversas circunstâncias de operação, tais como ambientes agressivos ou temperaturas e pressões de operação altas. Dentro de este contexto, o enfoque principal do trabalho

é estruturar a sistematização do projeto de sistemas hidráulicos com a utilização de fluidos biodegradáveis, focalizando na seleção do fluido, seleção de componentes e na descrição de um sistema de monitoração.

A estruturação deste processo de projeto é feita por meio de um sistema baseado no conhecimento no domínio dos fluidos biodegradáveis e projeto de sistemas hidráulicos, o qual se suscita na maioria das vezes na experiência de especialistas humanos, e por tanto, de forma heurística, são baseados em regras causa e efeito, os quais podem ser codificadas. A técnica de SBC é uma solução aproximada muito bem sucedida para o problema de se programar inteligência. Nessa técnica, conhecimento humano altamente especializado é adquirido e representado de tal modo que seja possível manipulá-lo computacionalmente, reproduzindo o raciocínio do especialista. Como o projeto de sistemas hidráulicos junto à seleção de fluidos biodegradáveis são fortemente baseados em conhecimento humano, essa técnica é adequada para a abordagem do problema.

## 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O valor agregado da utilização de fluidos biodegradáveis está relacionado à vida útil do fluido, redução de impostos por políticas ecológica corretas, ações em função de créditos de carbono e principalmente na cobrança de multas devido a acidentes relacionados a vazamento de óleo na água ou no solo. Como tal, fluidos biodegradáveis podem sim ser competitivos financeiramente, tornando-os mais atraentes para o uso em aplicações industriais. Theissen (2006) e Honary (2007) apresentam esta competitividade econômica por meio de uma comparação de preços entre os fluidos minerais e fluidos biodegradáveis usados em sistemas hidráulicos em aplicações industriais.

Os derramamentos ou acidentes mencionados ocorrem quando o próprio equipamento quebra ou quando ocorre um vazamento nas linhas ou mangueiras. Na maioria das plantas industriais, se isso acontecer um plano de recuperação do óleo existe e o fluido derramado pode ser recuperado, mas na maioria dos outros equipamentos não é implementado por razões econômicas um plano de recuperação. Os derramamentos de óleo ou vazamento dessas unidades alcançam águas subterrâneas e, posteriormente, chegam a rios e lagos, onde poluem a água potável, podendo causar danos ambientais à vida selvagem e vegetação.

Unidades hidráulicas menores projetadas para operar sob altas temperaturas e pressões de funcionamento são mais propensas à ruptura acidental e liberação de fluidos hidráulicos para o ambiente. A fim de controlar ou minimizar danos ao meio ambiente, a indústria principalmente nos países da União Européia tem respondido com fluidos hidráulicos biodegradáveis e ambientalmente amigáveis.

Em alguns casos particulares, como em centrais hidrelétricas, o sistema hidráulico é empregado para a realização de várias funções como fechamento/abertura de comportas, acionamento de válvulas borboleta em dutos de adução e outras funções complementares, além da função principal de controle de posição de servomotores (cilindros). Circuitos hidráulicos também são empregados com a função de lubrificação de mancais de rolamento e mancais de escora do grupo gerador, havendo casos de máquinas em que um mesmo fluido é empregado para transmissão de potência e lubrificação.

O volume de fluido presente em reservatórios, nas tubulações e nas câmaras de cilindros (servomotores) é tipicamente de centenas a milhares de litros, dependendo da potência de cada máquina. Por exemplo, máquinas de 10 MW utilizam cerca de 200 litros enquanto que uma máquina de 350 MW emprega 20.000 litros de óleo mineral para transmissão de potência além de cerca de 4.000 litros de óleo mineral para as funções de lubrificação em mancais. Estes números referem-se a cada máquina em uma central hidrelétrica, a qual pode incluir mais de 20 turbinas hidráulicas instaladas.

Por princípio, o fluido destes sistemas, assim como de qualquer sistema hidráulico industrial ou móbil deve ter suas propriedades físico-químicas monitoradas e quando não é mais possível recuperá-lo, este precisa ser substituído. Além disto, a manutenção de equipamentos requer muitas vezes a retirada do óleo de parte do circuito para recolocá-lo posteriormente. Estas operações implicam em potenciais riscos de contaminação. Por sua vez, vazões típicas de uma bomba são da ordem de 3 mil a 5 mil litros/minuto, podendo-se concluir que um significativo volume de óleo pode ser lançado no meio externo no caso de rompimento de um componente ou tubulação.

Um exemplo que mostra a dimensão do problema refere-se às pequenas centrais hidrelétricas, cuja construção tem sido fortemente estimulada pelo governo brasileiro e cujos volumes de fluido hidráulico mineral são da ordem de centenas de litros. Tipicamente estas centrais operam desassistidas, monitoradas a distância, de forma que não é possível agir rapidamente para evitar que eventuais vazamentos contami-

nem o recurso hídrico. Outra perspectiva não menos importante, são os derrames que existem na utilização de sistemas hidráulicos de potência nas máquinas ou equipamentos agrícolas, o que traz ao solo de cultivos milhares de litros de óleo consequente de falhas nestes sistemas hidráulicos.

Com o intuito de evitar ou mitigar a questão do risco ambiental, identifica-se no Brasil e no mundo um caminho de incentivos a procura de desenvolvimento de sistemas e/ou produtos ecologicamente corretos, como por exemplo, o uso crescente de fluidos biodegradáveis nos sistemas hidráulicos de potência, substituindo o atualmente usado fluido mineral.

Mas o foco do problema identificado para este trabalho está na deficiência de processos de projeto para sistemas hidráulicos que se adéquem para a utilização destes em conjunto aos fluidos biodegradáveis. Para isto precisa-se de um domínio que inclui a otimização de sistemas hidráulicos relacionado com os requisitos de projeto. Conforme apresentado na Figura 1 estes requisitos de projeto estão em função de algumas variáveis definidas para o sistema tal como a concepção do circuito, seleção de componentes, boas práticas de manutenção e operação, caracterização do fluido e monitoração do sistema.

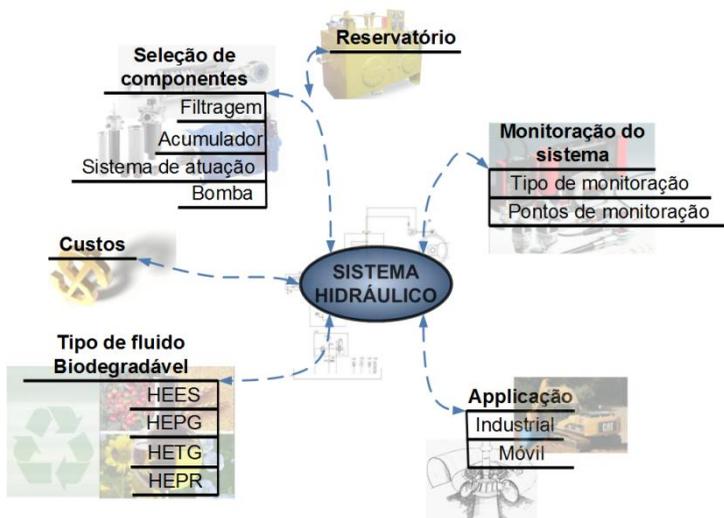


Figura 1. Variáveis para o projeto de sistemas hidráulicos

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Existe uma crescente preocupação sobre o impacto ambiental de fluidos a base de petróleo e não-biodegradáveis. Uma estimativa conservadora é que mais de 600-900 milhões de litros de fluidos de sistemas hidráulicos entram no ambiente a cada ano (HAMID, 2008). Trata-se principalmente de vazamentos, acidentes ou derramamento de fluido hidráulico. Os derrames envolvem grandes custos de limpeza e eliminação, no entanto, um grande número de derrames passa despercebido. Para citar alguns exemplos relacionados à derrames, devido a um acidente na Usina Hidroelétrica de Sayano-Shushenskaya na Rússia em agosto de 2011, 30000 litros de fluido hidráulico foram despejados no Rio Yenisei provocando um acidente ecológico sem precedentes naquele país. Já no Brasil, em maio de 2012 a Petrobrás confirmou o vazamento de 200 litros de fluido hidráulico no campo de Paru na costa do estado de Alagoas, devido a problemas na manutenção de equipamentos (PETROBRAS, 2012). Na hidráulica móbil, um estudo apresentou que na Usina São Martinho (Brasil) foi desperdiçado a quantidade de 108.622 litros de óleo hidráulico das colheitadeiras durante o ano 2003, em consequência de falhas do sistema hidráulico (TOMAZELA, 2007).

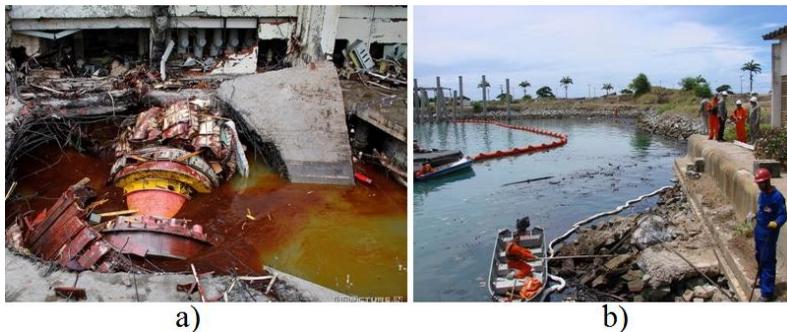


Figura 2. Acidentes com vazamentos de fluido hidráulico: a) Usina Sayano na Rússia; b) Campo Paru da Petrobras

O domínio sobre sistemas hidráulicos utilizando fluidos não-agressivos ao meio ambiente é um marco importante para aplicação em outros setores industriais e de serviços, uma vez que os preceitos básicos de projeto de um circuito hidráulico são válidos para todas as aplicações. Pesquisadores e fabricantes de fluidos têm identificado potenciais setores para uso de fluidos biodegradáveis como: embarcações, equipamen-

tos florestais, siderurgia, indústria cerâmica, indústria automobilística e usinas hidrelétricas. Além disto, o gradativo aumento de pressão de trabalho, que possibilita maiores potências a partir de menores componentes hidráulicos, aumenta também os riscos de vazamentos devido à falha em componentes, motivando a busca por alternativas ao óleo mineral.

No âmbito do Brasil é importante estimular o desenvolvimento e uso de fluidos biodegradáveis, já que há um interesse crescente na produção mundial de combustíveis e de lubrificantes derivados de óleos vegetais e ésteres naturais. Como exemplo, o governo alemão instituiu desde o ano 2000 o Programa de Introdução no Mercado intitulado “Biolubrificantes e biocombustíveis” visando estimular sua utilização. Os principais fabricantes de lubrificantes e combustíveis já disponibilizam comercialmente fluidos biodegradáveis (ex.: Shell, Basf, Mobil) além de outros fabricantes especializados em biolubrificantes (ex.: Total, Panolin, Fuchs).

Fora do Brasil, várias organizações ligadas à indústria (ISO, BfPA (Inglaterra), NFPA (Estados Unidos), VDMA (Alemanha)) estão estimulando e organizando as informações relativas ao uso de fluidos biodegradáveis. Academicamente, estudos relacionados ao desenvolvimento de fluidos e de componentes apropriados vêm ocorrendo a mais de uma década (CHENG et al., 1991; HONARY, 1995; GLANCEY et al., 1996, 1998; KODALI, 2002).

Na década de 90, vários métodos de ensaios de bombas hidráulicas foram propostos e utilizados para avaliar a evolução das propriedades dos óleos hidráulicos biodegradáveis (PEREZ and BRENNER, 1992; TOTTEN and BISHOP, 1995). A maioria dos métodos de ensaio e os equipamentos só foram destinados para fluidos lubrificantes. Por sua vez, Wan et al. (2007) mostra um estudo experimental do desempenho de uma bomba hidráulica utilizando fluido biodegradável a base de óleo de palma.

No contexto do projeto de sistemas hidráulicos, observa-se que o estudo de componentes hidráulicos é importante para o desenvolvimento do projeto e auxilia na análise e seleção correta dos componentes da instalação, possibilitando a verificação do desempenho final que será alcançado pelo sistema, como também, as limitações impostas por estes ao utilizar fluido biodegradável. Uma análise adequada dos componentes de um circuito hidráulico (bomba, reservatório, tipo de filtragem, cilindros, válvulas), permitirá a resolução de questões como estabilidade, capacidade para atender requisitos de força e velocidade e limitações

de potência; e no relacionado ao fluido, questões como custo, oxidação, hidrólises, contaminação, estabilidade térmica e propriedades anti-desgaste.

No presente, a solução destas questões relacionadas a projeto de sistemas, tem sido apresentada de forma muito abrangente. No LASHIP/EMC/UFSC tem sido estudados métodos de projeto de sistemas automáticos ou mecatrônicos. Alguns trabalhos, como o apresentado por Furst (2001), detalha a sistematização de dimensionamento e análise de componentes hidráulicos em circuitos que têm sido previamente concebidos. Souto (2005) e Belan (2007) mostram estruturas de projeto para sistemas automáticos. Já Matos Filho (2007) propôs uma metodologia para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos. Comercialmente, existem varias metodologias ou software de projeto como o programa de computação chamado HyPneu (HONG and TESSMANN, 1998), que mostra o projeto automatizado de sistemas hidráulicos e sua integração com sistemas pneumáticos e eletrônicos.

Visto que no âmbito industrial e científico não existem trabalhos ou publicações que mostrem a preocupação de adequar o projeto de sistemas hidráulicos utilizando fluido biodegradável, pretende-se com o presente trabalho inserir uma nova linha de pesquisa a qual associa o conhecimento destas duas áreas específicas.

Por meio do sistema baseado no conhecimento pretende-se interligar as várias áreas de conhecimento para alcançar meios que determinem as melhores soluções para um sistema hidráulico utilizando fluido biodegradável.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é a estruturação do processo de projeto incluindo a sistematização de procedimentos para especificação e análise dos requisitos de sistemas hidráulicos, com o fim de adequar e otimizar o desempenho e a vida útil dos componentes com a utilização de fluidos biodegradáveis.

A estruturação do projeto é feita a partir do desenvolvimento de um protótipo de sistema computacional inteligente, baseado na técnica de sistema baseado no conhecimento (sistema especialista). O protótipo é usado para apoio às fases de projeto conceitual e preliminar de sistemas hidráulicos, considerando a seleção do fluido, seleção de componentes e monitoramento do sistema em função dos requisitos de projeto. O protótipo apresenta características que não são encontradas em ne-

nhum sistema computacional disponível até o momento para esse domínio, tais como explicação da solução e geração de mais de uma solução para um mesmo conjunto de requisitos.

### 1.3.1 Objetivos específicos

No cenário exposto acima, têm-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Identificar formalmente uma lista de requisitos de projeto de sistemas hidráulicos novos ou modificados, dando uma base do conhecimento necessária para estabelecer ações ou tarefas ao projetista. Isto será feito fazendo um paralelo entre os sistemas hidráulicos com fluido mineral e fluido biodegradável.
- Obter uma base de conhecimento das principais propriedades dos fluidos biodegradáveis. Analisar e avaliar características destes fluidos tais como a toxicidade, biodegradabilidade, estabilidade à oxidação e hidrólises através de testes de envelhecimento (caracterização do fluido).
- Estabelecer uma série de regras para a seleção de componentes no sistema (bomba, reservatório, filtro etc.), baseando-se no conhecimento heurístico adquirido ou com informações a partir de especialistas na área, recomendações de fabricantes e bibliografia clássica.
- Definir diretrizes para a monitoramento da condição do fluido, dos componentes e do próprio sistema em função das variáveis de medição (tipo de sensoriamento) e da demarcação (posição) dos pontos de monitoração no circuito.
- Desenvolvimento, verificação e validação do protótipo de um SBC que organize e estruture a sistematização do processo de projeto de sistemas hidráulicos proposta neste trabalho.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto da tese está dividido em capítulos com as disposições e conteúdos descritos a seguir.

Com o intuito de familiarizar-se com a terminologia de IA, no capítulo 2 são revisados alguns conceitos sobre SE e SBC com base na literatura clássica da área, onde será mostrado o ciclo de desenvolvimento de um SBC, evidenciando sua definição e as etapas mais relevantes.

O capítulo 3 trata do estado da arte dos fluidos biodegradáveis. Dentro da abordagem dos benefícios fundamentais e alguns inconveni-

entes, são descritas as propriedades dos fluidos biodegradáveis fazendo um paralelo com os fluidos em base mineral atualmente utilizados.

Em seguida, no capítulo 4 apresenta-se um estudo experimental da influência de contaminantes em fluidos biodegradáveis, onde é feita uma análise e avaliação das características de envelhecimento e biodegradabilidade através de testes de oxidação, hidrólise, biodegradabilidade e toxicidade.

Por sua vez, no capítulo 5 focaliza-se a etapa de estruturação da sistematização (aquisição do conhecimento). Esse conhecimento foi obtido principalmente através de interação com especialistas, sendo complementado por literatura especializada da área e recomendações de fabricantes de componentes e fluidos biodegradáveis. Com relação á sistematização, propõe-se regras e normas na hora de selecionar o tipo de fluido, selecionar os principais componentes de um circuito hidráulico, assim com definir diretrizes de monitoração no circuito.

O capítulo 6 é dedicado ao desenvolvimento de um protótipo SBC. Neste capítulo são apresentadas a estrutura funcional, a verificação e validação, assim como as interfaces utilizadas no protótipo.

O trabalho se encerra com o capítulo 7, apresentando as conclusões da tese, as principais contribuições bem como os desdobramentos que podem culminar com propostas de trabalhos futuros em temas correlatos.



## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO (SBC)

Entre os vários ramos da inteligência artificial, a técnica de Sistemas Baseados no Conhecimento (SBC) é uma solução bem sucedida para o problema de se programar inteligência. Segundo Matelli (2008), nessa técnica, conhecimento humano altamente especializado é adquirido e representado de tal modo que seja possível manipulá-lo computacionalmente, reproduzindo o raciocínio do especialista. Como o projeto de sistemas hidráulicos com a inclusão do uso de fluidos biodegradáveis é fortemente baseado em conhecimento humano, seja de especialistas ou fabricantes, essa técnica é adequada para abordagem do problema. Neste contexto, os Sistemas Especialistas (SE) é uma das mais importantes técnicas de SBC.

#### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SBC

Os Sistemas de Inteligência Artificial usam técnicas que alcançam competência de alto nível na resolução de problemas em determinadas áreas. Tais sistemas, que utilizam um ou mais conhecimentos de especialistas para resolver problemas em um domínio específico, são chamados de Sistemas Baseados no Conhecimento

Rezende (2005) definiu os Sistemas Baseados no Conhecimento como programas de computador que usam conhecimento representado explicitamente para resolver problemas. Ainda segundo o autor, SBC manipulam conhecimento e informação de forma inteligente e são desenvolvidos para serem usados em problemas que requerem uma quantidade considerável de conhecimento humano e de especialização. De um ponto de vista análogo, Gonzalez e Dankel (1993), definem SBC como aqueles sistemas que refletem as habilidades que especialistas humanos possuem para resolver problemas pertencentes a um dado domínio e que, além disso, se utilizam dessas habilidades do mesmo modo que os especialistas humanos o fazem.

A comunidade de IA tem atribuído algumas características a um Sistema Inteligente para chamá-lo de SBC. Em resumo os SBC devem ser capazes de:

- Questionar o usuário, usando uma linguagem de fácil entendimento para reunir informações de que necessita;

- Desenvolver uma linha de raciocínio a partir dessas informações e do conhecimento existente na base para encontrar soluções satisfatórias;
- Explicar o raciocínio;

As características mencionadas acima definem funcionalidades que estão presentes em SBC, no entanto elas não demonstram as diferenças essenciais entre um sistema convencional e um SBC. Segundo Rezende (2005), os SBC distinguem-se de algoritmos ou sistemas convencionais em cinco conceitos fundamentais os quais podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Principais diferenças entre os sistemas convencionais e os sistemas baseados no conhecimento (Rezende, 2005)

<b>Sistemas Convencionais</b>	<b>Sistemas Baseados no Conhecimento</b>
Estrutura de dados	Representação do conhecimento
Dados e relações entre dados	Conceitos, relações entre conceitos e regras
Tipicamente usa algoritmos determinísticos	Busca heurística
Conhecimento embutido no código do programa	Conhecimento representado explicitamente e separado do programa que o manipula e interpreta
Explicação do raciocínio é difícil	Podem e devem explicar seu raciocínio

Historicamente, com relação aos SBC, tem-se usado também o nome Sistemas Especialistas (SE) com uma sutil distinção. Para a sequência deste trabalho, é importante diferenciar os SE dos SBC. Segundo Rigoni (2009), os SE são SBC que resolvem problemas ordinariamente resolvidos por um especialista humano, por isso eles requerem conhecimento sobre a habilidade, a experiência e as heurísticas usadas pelo especialista, portanto seu desenvolvimento requer uma profunda interação entre o Engenheiro de Conhecimento (EC) que ira modelar e/ou desenvolver o sistema e o especialista humano.

Assim os SBC podem ser classificados como SE quando o desenvolvimento do mesmo é voltado para aplicações nas quais o conhecimento a ser manipulado restringe-se a um domínio específico e conta com um alto grau de especialização e conhecimento heurístico e cujo funcionamento se processa de maneira isolada de outros sistemas

(REZENDE, 2005). A Figura 3 sintetiza as características destes sistemas no contexto dos Sistemas Inteligentes.

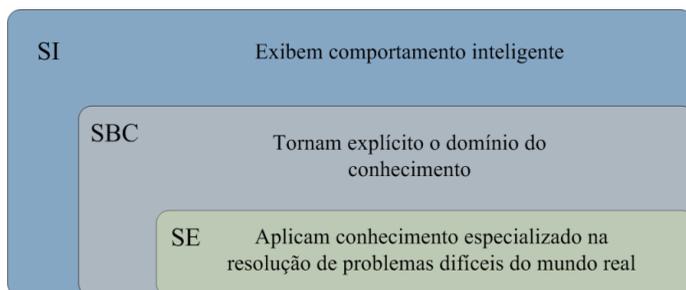


Figura 3. Contextualização de SBC e SE dentro dos SI (REZENDE, 2005).

## 2.2 SISTEMAS ESPECIALISTAS

SE é a mais difundida técnica de SBC. Giarratano e Riley (1994) apresentam uma definição de SE como um programa de computador inteligente, que utiliza conhecimento e métodos de inferência para resolver problemas complexos o suficiente para requerer significativo conhecimento especializado ou perícia de um ser humano. Em outras palavras, o programa emula a habilidade que um especialista humano tem ao tomar decisões.

Segundo Luadon (2002), com as características inerentes dos SE, estes não somente diferem dos sistemas de informação convencionais, que apenas facilitam a obtenção e o armazenamento da informação, como também se tornam úteis para a capacitação e o ensino.

Algumas características desejáveis para um sistema especialista citadas por Giarratano e Riley (1994) são descritas a seguir:

- Ter alta qualidade nas respostas;
- Apresentar boa confiabilidade e robustez não suscetíveis a panes ou erros;
- Fornecer tempos de respostas aceitáveis;
- Ser capaz de explicar seu raciocínio durante a execução de uma forma compreensível;
- Ter um mecanismo eficiente de adição, modificação, e retirada de conhecimento;

Para a construção destes sistemas existem diversas ferramentas e técnicas, tanto computacionais quanto conceituais. No entanto, SE pos-

suem uma estrutura básica cujos elementos integrantes são comuns a todos. Na Figura 4 é apresentada a estrutura genérica de um sistema especialista e seus componentes básicos onde o usuário fornece fatos, ou outras informações, ao sistema especialista e recebe conselhos ou respostas especializadas. Estes componentes mencionados são: a base de conhecimento, a máquina de inferência, a memória operacional e a interface de usuário. Os três primeiros formam uma subestrutura destinada ao armazenamento de conhecimento, enquanto o último forma uma subestrutura destinada à consulta a qual se preocupa com os métodos de interação com o conhecimento, procurando resolver os problemas apresentados.

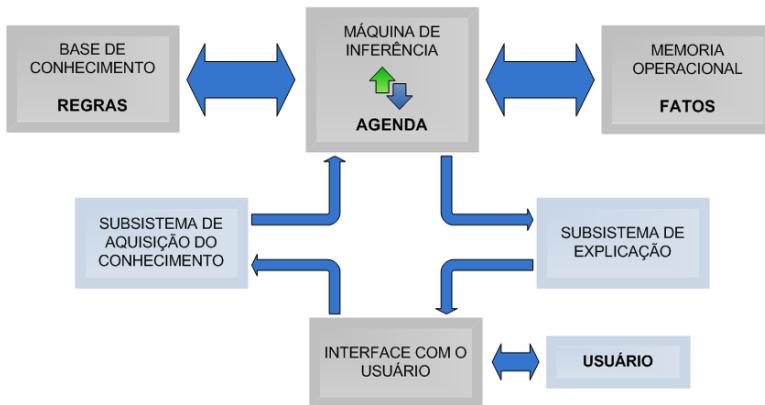


Figura 4. Arquitetura de um Sistema Especialista (SE) (adaptado de GIARRATANO e RILEY (1998))

Essencialmente a base de conhecimento representa uma memória de longo prazo, onde o conhecimento permanente na forma de um dos chamados esquemas de representação do conhecimento como as regras, frames, redes semânticas ou a própria lógica é armazenado. Segundo Vinadé (2003), a base de conhecimento é a parte do programa que contém o domínio de conhecimento do problema, que deve ser codificado de maneira inteligível para ser facilmente modificado e/ou reutilizado. O conhecimento é de natureza predominantemente heurística e pode ser representado como regras, conceitos (objetos ou quadros - frames) e relacionamentos (redes semânticas).

Já a memória de curto prazo pode ser representada pela memória operacional, pois armazena os fatos, relativos ao problema apresentado pelo usuário, durante o processo de solução do problema. Estes fatos

funcionam como uma memória auxiliar na inferência dos resultados e têm a função de representar o problema e as conclusões intermediárias inferidas pelo sistema.

A máquina de inferência, também conhecida como motor ou mecanismo de inferência consiste nos procedimentos gerais que permitem a manipulação de um domínio específico de conhecimento (GUIDA e TASSO, 1994). Este motor de inferência funciona como um processador de conhecimento que utiliza a informação disponível de um dado problema, dentro da memória operacional, combinando com o conhecimento armazenado na base de conhecimento para inferir conclusões e/ou recomendações.

Existem duas maneiras de implementar a inferência, o encadeamento para frente onde se inicia com uma evidência para se chegar a uma conclusão e o encadeamento para trás onde se inicia com uma conclusão e procura-se uma evidência que a comprove. Também é possível, em um sistema, a aplicação de ambos os métodos (FERNANDES, 2003).

A máquina de inferência possui um elemento chamado Agenda, que representa uma lista priorizada de regras ativadas pelo motor de inferência. A agenda funciona como uma memória de curto prazo auxiliar, para solucionar os conflitos que surgirem quando várias regras puderem ser aplicadas ao mesmo tempo. As regras na agenda são executadas de acordo com a prioridade especificada pela estratégia de controle, implementada na máquina de inferência

O subsistema de aquisição de conhecimento é utilizado para introdução ou remoção de conhecimentos da base de conhecimento, assim como o subsistema de explicação é empregado para explicar ao usuário a linha de raciocínio que o SE utilizou para chegar à conclusão (FERNANDES, 2003).

Um dos componentes mais importantes do SE é a interface com o usuário a qual fornecerá uma interação e comunicação de forma amigável do usuário do sistema com o próprio sistema inteligente. Segundo Gonzalez e Dankel (1993) a interface faz esta comunicação através do uso de menus, linguagem natural e visualização gráfica.

Caletti (2003) manifesta outra característica fundamental dos SE: a habilidade de explicação do programa, em relação às etapas de solução e às conclusões obtidas. Esta capacidade de explicação deve ser sempre buscada pelos engenheiros de conhecimento, para o sistema ser capaz de justificar as perguntas e respostas formuladas pelo sistema para o usuá-

rio, facilitando o entendimento deste sobre os questionamentos realizados e resultados alcançados.

Outros pontos mostram a importância da capacidade de explicação de um SE. Durante a fase de desenvolvimento, pode servir para corrigir erros de sintaxe ou conceitos mal entendidos pelo engenheiro do conhecimento; e também para o entendimento sobre o funcionamento do sistema, por parte dos envolvidos no desenvolvimento do SE, o que é difícil de ser feito somente através da leitura do código computacional do programa (SILVA, 1998).

Assim como em um programa ou software convencional, o processo de desenvolvimento de um sistema especialista é comumente dividido em etapas definidas pelos engenheiros de conhecimento de acordo com os recursos e natureza do problema (Figura 5).

As fases de desenvolvimento do SE seguidas neste trabalho são:

- Aquisição de conhecimento;
- Representação do conhecimento;
- Implementação;
- Verificação e validação do conhecimento implementado.

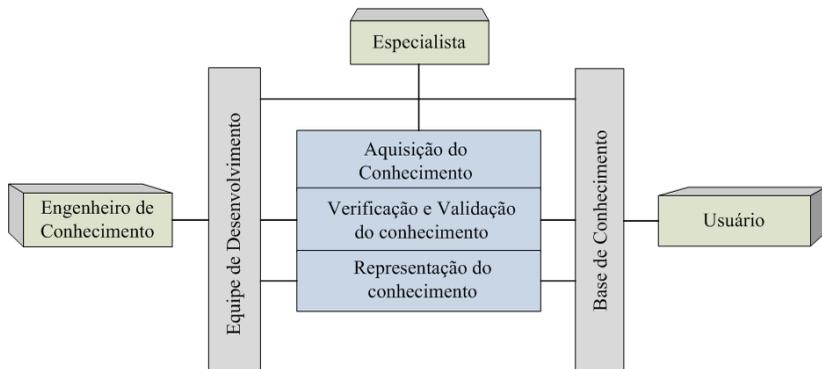


Figura 5. Desenvolvimento de um sistema especialista (adaptado de SAJJA e AKERKAR, (2010)).

Segundo Gonzalez e Dankel (1993), o desenvolvimento ou modelo incremental é o processo iterativo de aquisição, representação e confirmação do conhecimento em uma parte limitada do domínio do problema, com o objetivo de construir de maneira incremental a base de conhecimento do SE.

Utilizado nas pesquisas de Silva (1998), Vinadé (2003), Caletti (2003), Zimmermann (2003), Rigoni (2009) e Matelli (2009) o modelo

de desenvolvimento incremental foi o escolhido para ser usado neste trabalho. Por meio deste modelo é possível acrescentar pequenas partes do conhecimento total para cada etapa do ciclo de desenvolvimento do SE, permitindo retornos às etapas anteriores caso seja constatado algum tipo de erro ou inadequação em alguma tomada de decisão sobre o projeto do SE, seguindo assim os conceitos de Engenharia Simultânea propostos por Silva (1998).

### **2.2.1 Aquisição do conhecimento**

Esta fase de aquisição pode ser definida como um processo de dispor, codificar e transformar um conhecimento específico, o qual requer definir as fontes de conhecimento disponíveis como livros, catálogos de fabricantes, publicações técnicas ou a realização de entrevistas, onde ocorre a interação entre o engenheiro de conhecimento e o especialista.

Considerada por muitos especialistas na área, a aquisição do conhecimento, é possivelmente a fase mais complicada para o desenvolvimento de SE. Inclusive alguns autores como Dreyfus e Dreyfus (2010) afirmam não ser possível capturar com as técnicas clássicas usadas, o conhecimento integral do especialista, já que simplesmente ele pensa muitas vezes intuitivamente e não em termos de regras na resolução de problemas.

Diversos autores e especialistas listam varias técnicas de elicitação do conhecimento para contornar esta dificuldade mencionada no parágrafo anterior. Estas técnicas facilitam a codificação do conhecimento do especialista para um modelo ou estrutura formal

Segundo Rezende (2003) as técnicas manuais de elicitação do conhecimento podem ser classificadas como segue:

- Baseadas em descrições. Esta abordagem exige que o EC estude e analise os textos de referência do domínio e produza a base de conhecimento a partir deles.
- Baseadas em entrevistas. Envolvem um diálogo direto entre o EC e os especialistas. Esta abordagem não dispensa a investigação bibliográfica, mas a utiliza para criar uma linguagem de senso comum entre especialista e o EC. Existem diferentes tipos de entrevistas que podem ser utilizadas: entrevistas estruturadas, entrevistas não-estruturadas e acompanhamento de casos.

- Teachback. É uma técnica em que o engenheiro de conhecimento explica alguns conceitos da área ou faz a simulação de tarefas de uma área particular do conhecimento.
- Técnica Delphi. Consiste em obter as respostas de cada participante às questões pré-elaboradas, por meio de questionários ou outra forma de comunicação formalizada.

O projeto de sistemas hidráulicos caracteriza-se por ser uma atividade consolidada e de caráter prático. As informações sobre este tema podem ser encontradas em livros, publicações nacionais e internacionais, material técnico referente aos componentes hidráulicos, e também através de software fornecidos pelos próprios fabricantes de componentes. As informações obtidas, seja da base teórica ou através de entrevistas com especialistas na fase de aquisição de conhecimento, estão descritas no capítulo 5. Estas informações referem-se ao domínio do projeto de sistemas hidráulicos e da utilização de fluidos biodegradáveis em componentes hidráulicos.

### **2.2.2 Representação do conhecimento**

A representação do conhecimento pode ser definida como uma forma sistemática de estruturar e codificar o que se sabe sobre uma determinada aplicação. O conhecimento adquirido na fase de aquisição de conhecimento precisa ser representado de alguma forma para poder ser utilizado na implementação do SE.

Existem diversas formas de representação do conhecimento que podem ser usadas na implementação do sistema como uma ferramenta de apoio à fase de aquisição do conhecimento. A escolha de uma determinada representação depende fundamentalmente da avaliação do domínio de conhecimento considerado e da seleção de uma determinada ferramenta para a criação do SE a qual é feita de acordo com a representação escolhida.

A maioria das ferramentas de desenvolvimento de SE suportam representações do conhecimento por meio de regras, objetos e redes semânticas, que, devido às suas características, servem para modelar o conhecimento necessário para a solução de problemas complexos em engenharia, como é o caso da sistematização do projeto de sistemas hidráulicos.

### 2.2.3 Regras

A técnica de representação do conhecimento por regras é a mais utilizada no desenvolvimento de sistemas especialistas e é utilizada desde os primeiros sistemas baseados em conhecimento desenvolvidos. A representação de conhecimento através de regras centra-se no uso do formato “SE condição ENTÃO ação” (IF-THEN). A condição (ou premissa ou ainda antecedente) são as premissas que devem ser satisfeitas para que a regra tenha efeito, e o efeito (chamada ação, conclusão ou consequência), define os procedimentos a serem realizados quando a condição for atendida. Entre várias alternativas de representação, as regras constituem uma forma natural de representar o conhecimento de um especialista humano (REZENDE, 2003). Por exemplo, para a seleção do tipo de vedação para componentes de sistemas hidráulicos em função do tipo de fluido hidráulico biodegradável a ser usado no sistema, uma possível regra é:

SE (Fluido hidráulico HEPG – Poliglicol é selecionado)  
ENTÃO (Usar vedação tipo FPM (FKM) – Vitón)

Assim como as regras são as mais populares formas de armazenamento de conhecimento especializado, o disparo e encadeamento de regras é a técnica de inferência mais comum de ser utilizada para encontrar uma conclusão (KELLER, 1991).

Vale salientar que um novo conjunto de fatos derivados de uma regra pode ser utilizado como condição de uma nova regra, o que se chama de encadeamento. O encadeamento de regras pode ocorrer pela aplicação de duas estratégias diferentes, conhecidos como encadeamento direto e encadeamento reverso. O encadeamento direto é uma estratégia de inferência que começa com um conjunto de fatos conhecidos, deriva novos fatos usando regras cujas premissas combinam com fatos conhecidos, e continua este processo até que o estado final seja alcançado ou até não ter mais regras com premissas combinando com fatos conhecidos ou derivados (DURKIN, 1994). Já o encadeamento reverso começa a partir de uma hipótese, uma conclusão potencial deve ser provada através de fatos que apóiam a hipótese (GIARRATANO e RILEY, 1994).

## 2.2.4 Redes semânticas

A estrutura de uma rede semântica é representada através de nós conectados por arcos. Os nós servem para representar objetos, eventos ou conceitos relacionados ao domínio considerado. Os arcos conectam os nós representando relações ou associações existentes entre os conceitos. Os tipos mais comuns de ligações são “faz parte de” e “é um(a)”.

Segundo Waterman (1986, citado por VINADÉ, (2003)) as relações “é um(a)” e “faz parte de” estabelecem uma propriedade de herança e hierarquia na rede, isto é, os nós em níveis mais baixos podem herdar propriedades dos nós em níveis mais altos de uma rede. Sem estas relações o conhecimento é simplesmente uma lista de fatos não relacionados.

No contexto de sistemas hidráulicos, ou no domínio dos fluidos biodegradáveis, a Figura 6 mostra um exemplo de rede semântica, aplicada, contendo objetos da rede e relações do tipo “é um(a)” e “faz parte de”.

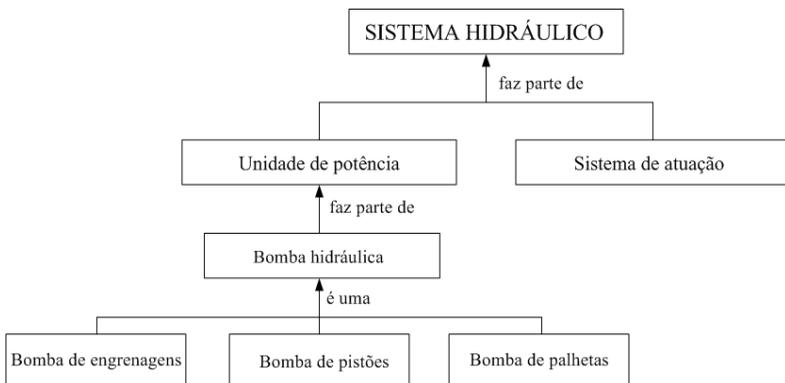


Figura 6. Exemplo de redes semânticas

## 2.2.5 Orientação a objetos

Conforme descrito em Caletti (2003), objetos são “pacotes” de informação que contém uma coleção de dados (os atributos ou variáveis) e de procedimentos (os métodos) relacionados, por exemplo, a uma determinada divisão de um sistema real. No contexto de sistemas hidráulicos, possíveis objetos são bombas hidráulicas, reservatórios, filtros ou até mesmo o fluido hidráulico.

A estratégia principal da orientação por objetos é representar o conhecimento como conjunto completo de objetos com comportamentos. Os objetos são definidos em classes hierarquicamente estruturadas, de modo que níveis inferiores na estrutura acessam atributos e relacionamentos de níveis superiores (REZENDE, 2003).

Devido ao fato de que vários objetos do mesmo tipo podem ser necessários na solução de um problema, as linguagens orientadas a objetos trazem a possibilidade de criação de *classes* de objetos, ou seja, modelos que definem os métodos e variáveis de um determinado tipo de objeto. Classes mais específicas, chamadas de *subclasses*, também podem herdar atributos e procedimentos de outras classes (as superclasses), uma característica poderosa (a *herança*) de linguagens orientadas a objeto.

As subclasses também podem definir seus próprios procedimentos e *atributos*, e redefinir, se for o caso, os métodos e variáveis herdados. Esta propriedade, que permite a uma subclasse comportar-se diferentemente da(s) sua(s) superclasse(s), é chamada de *polimorfismo*. O Polimorfismo segundo Gonzalez e Dankel (1993), permite que uma mesma mensagem seja respondida por diferentes classes de maneira própria de cada classe.

As *instâncias*, por fim, são objetos de classes com valores particulares para os seus atributos, que são criadas durante uma interação do sistema com o usuário.

Além da herança e do polimorfismo, outras propriedades das linguagens orientadas a objeto são importantes para a modelagem computacional de sistemas complexos: o *encapsulamento* e a *abstração* (GONZALEZ e DANKEL, 1993). Encapsulamento refere-se a ocultar seqüências de procedimentos em módulos do código; abstração, a ignorar aspectos de alguma entidade que não são relevantes ao problema em questão. A compreensão destas características auxilia o trabalho de desenvolvimento do sistema especialista, e a sua aplicação torna a técnica de orientação a objeto uma metodologia poderosa para representação do conhecimento (SILVA, 1998).

Na Figura 7 é apresentado um exemplo da organização de conhecimento através do conceito de classes e subclasses. Por simplicidade, já que o sistema apresentado neste trabalho é modelado em várias classes, apresenta-se somente um resumo da classe Fluido hidráulico com ênfase em sua subclasse Fluido Biodegradável.

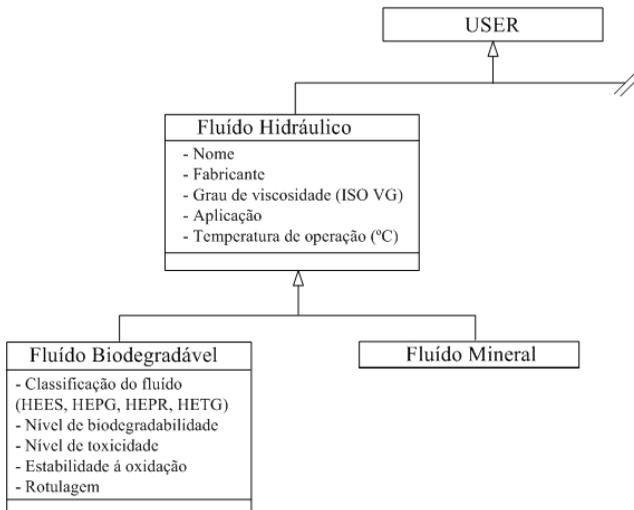


Figura 7. Exemplo de estrutura orientada a objetos (Classes e subclasses)

### 2.2.6 Implementação

A implementação do sistema especialista consiste na elaboração do seu código fonte. Esta tarefa é realizada em ciclos, de maneira iterativa com as fases de aquisição e validação do conhecimento, de acordo com o modelo de desenvolvimento. É durante a implementação que o engenheiro traduz, na forma computacional, toda a base de conhecimento adquirida por meio de entrevistas com os especialistas humanos. Dois pontos fundamentais para a implementação do sistema é a escolha do modelo e da ferramenta computacional a ser utilizada.

A ferramenta para o desenvolvimento de SE pode ser desde programas especialmente desenvolvidos para um fim específico até linguagens de programação já existentes. A escolha da ferramenta irá determinar a facilidade de implementação das funções desejadas, assim como o tempo necessário para isto. Esta escolha de uma determinada ferramenta depende de fatores como adequação com a representação de conhecimento desejada, disponibilidade, confiabilidade, treinamento para o seu uso e custo, e costuma-se afirmar que a sua seleção é difícil e fundamental para o sucesso de desenvolvimento de um SE.

Um SE pode ser implementado de duas maneiras: utilizando-se uma linguagem de programação (C, Pascal, LISP, PROLOG) ou utili-

zando-se um ambiente shell. As linguagens shell para implementação de sistemas especialistas incluem uma máquina de inferência e são desenvolvidas para certos tipos de aplicação, pois precisam conter recursos específicos para a técnica de representação de conhecimento adotada. A idéia básica no desenvolvimento de um shell é fornecer um ambiente onde o usuário (engenheiro de conhecimento) precisa apenas fornecer a base de conhecimento (CASTELANI, 2003).

Neste trabalho utilizou-se a ferramenta CLIPS com uma interface de saída desenvolvida em HTML. Os detalhes da ferramenta CLIPS utilizada neste trabalho e os motivos que levaram ao seu uso estão apresentados no capítulo 6.

### **2.2.7 Verificação e validação**

Um objetivo da verificação é garantir a existência de uma relação adequada entre as especificações do sistema e o que ele realmente faz. Gonzalez e Dankel (1993) sugerem alguns pontos para avaliar a conformidade em relação às especificações do sistema:

- O paradigma de representação de conhecimento é adequado;
- O método de inferência empregado é adequado;
- O sistema é modular;
- O sistema interage satisfatoriamente com programas externos;
- A interface com o usuário satisfaz as especificações;
- A explicação das conclusões é apropriada;
- O sistema é suficientemente rápido;

Um segundo objetivo da verificação é procurar por erros de semântica ou sintaxe que podem ter sido introduzidos pelo engenheiro de conhecimento no desenvolvimento da base de conhecimento. A verificação de erros de sintaxe em um sistema baseado em regras deve considerar os seguintes pontos (GONZALEZ e DANKEL, 1993):

- Regras redundantes;
- Regras conflitantes;
- Regras cíclicas;
- Premissas desnecessárias;
- Falta de regras;
- Regras cujas premissas nunca são satisfeitas.

Segundo Rigoni (2003), a validação determina a eficácia do sistema final com relação às necessidades do usuário final e ao mesmo

tempo avalia se o SE executa a tarefa desejada com um nível suficiente da perícia. A validação analisa as exigências explícitas e implícitas do sistema. As exigências explícitas são aquelas definidas na fase de planejamento e especificação do SE, e que necessitam ser confirmadas e testadas.

Conforme Giarratano (1994) os aspectos a ter em conta na hora de validar o sistema desenvolvido são:

- Robustez: saídas corretas para entradas corretas, sistema confiável contra travamentos etc.
- Expansibilidade: capacidade e facilidade de crescimento da base de conhecimento do programa.
- Modularidade: relativo à estruturação e representação do conhecimento.

Para a análise, métricas são definidas, de acordo com as especificações desejadas. Giarratano e Riley (1994) e Silva e Back (2000) sugerem algumas métricas a serem adotadas durante a validação do sistema: saídas corretas para entradas corretas; saídas completas para entradas corretas; saídas consistentes para mesmas entradas; utilizável e preferencialmente amigável ao usuário; de fácil manutenção e melhoramento; comprovado que satisfaça as necessidades do usuário; facilidade de explicação; código compreensível, sistema preciso; base de conhecimento verificável; e código reutilizável para outras aplicações.

Existem alguns métodos que podem ser empregados na validação dos SE, os quais não são exclusivos e pelo contrario recomenda-se aplicar simultaneamente para que a tarefa de validação seja detalhada e abrangente. Alguns métodos de validação são a validação informal, validação por testes e os testes em campo.

O processo de verificação e validação do protótipo do SE desenvolvido neste trabalho está detalhado no Capítulo 6.

### 2.3 ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS ESPECIALISTAS

Os primeiros sistemas especialistas tal como DENDRAL<sup>1</sup>, eram de um tipo que apresentavam a base de conhecimento misturado com a máquina de inferência. Posteriormente, outros ambientes para implementação de SE surgiram a partir do desenvolvimento do sistema

---

<sup>1</sup> O DENDRAL é um sistema especialista pioneiro em inteligência artificial, que começou a ser desenvolvido em 1965, na Universidade de Stanford a pedido da NASA, com o objetivo de desenvolver soluções para a análise química do solo de Marte.

MYCIN<sup>2</sup>, o qual separou explicitamente a base de conhecimento da máquina de inferência. Segundo Vinadé (2003) com esta nova concepção possibilitou-se desenvolver sistemas especialistas reusando-se o seu núcleo (shell), assim pode-se criar um novo sistema mais rapidamente do que o sistema do tipo DENDRAL, uma vez que permite retirar um conhecimento antigo e colocar um outro conhecimento de uma área diferente.

Na última década, programas especialmente desenvolvidos para a criação de sistemas especialistas já possuem a máquina de inferência implementada, apresentando características de alta velocidade de processamento, portabilidade e baixo custo. As ferramentas (programas) especialmente desenvolvidos para a criação de sistemas especialistas já possuem a máquina de inferência implementada, e geralmente o treinamento é mais rápido e o uso é mais fácil. Como exemplos destas ferramentas, podem ser citados o *shell* KAPPA PC, da IntelliCorp<sup>7</sup>, e o CLIPS (*C Language Integrated Production System*), este último desenvolvido pela NASA.

Os sistemas especialistas já foram usados em diversas aplicações com diferentes objetivos tais como diagnósticos, instrução, monitoração, seleção, simulação e planejamento. Também foram usados no auxílio de projetos na área da engenharia mecânica e eletrônica (VINADÉ, 2003)

Especificamente para o projeto de sistemas hidráulicos, pesquisas realizadas na UFSC proporcionaram o desenvolvimento de protótipos de sistemas especialistas com diferentes objetivos (SILVA (1998), ALVES (2001), CALETTI (2003), VINADÉ (2003), ZIMMERMANN (2003))

Silva (1998) apresentou uns dos primeiros protótipos de sistemas especialistas para o projeto conceitual de sistemas hidráulicos denominado *Schemebuilder Expert Fluid Power Module* o qual tem o objetivo de gerar um conjunto de diagramas de sistemas hidráulicos viáveis, conforme os parâmetros de precisão, facilidade de operação, eficiência, economia e facilidade de manutenção, com base em atributos qualitativos e parâmetros operacionais definidos pelo usuário. Já Alves (2001) desenvolveu um sistema especialista para o diagnóstico de falhas em circuitos hidráulicos de sistemas de navegação de grandes embarcações.

Seguindo a linha de pesquisa instaurada por Silva (1998), Caletti (2003) desenvolveu um protótipo de sistema baseado no conhecimento

---

<sup>2</sup> O MYCIN foi desenvolvido em 1970 para identificar as bactérias causadoras de infecções graves, tais como bacteremia e meningite, e para recomendar antibióticos, com a dose ajustada para o peso corporal do paciente.

voltado ao projeto de unidades de potência hidráulica de sistemas industriais.

Com o propósito de recomendar manutenções preditivas, preventivas e corretivas para os componentes de um sistema hidráulico regulador de velocidade para turbinas Francis de pequeno e grande porte, Vinadé (2003) apresentou o protótipo de sistema especialista RCMEEX.

De uma forma mais elementar, mas não menos importante, Zimmermann (2003) focou o desenvolvimento de um SE como o objetivo de auxiliar o usuário (estudantes ou engenheiros com pouca experiência na área) na seleção de bombas hidrostáticas durante o projeto do circuito de potência hidráulica. Aplicações de SE em diferentes áreas da engenharia mecânica da UFSC e que apresentaram bons resultados, podem ser encontradas em Castelani (2003), Rigoni (2009) e Matelli (2009).

Fora do grupo de pesquisa da UFSC, recentes aplicações de SE em sistemas hidráulicos são apresentadas em Gao et. Al (2010) e Yin and Mei (2012).

Com relação a pesquisas ou trabalhos relacionados a aplicações de sistemas especialistas envolvendo fluidos, Daharan et al. (1989) apresentou o desenvolvimento de um SE para análise de propriedades de óleo (petróleo) em reservatórios. Já Chavanne e Perthuis (1992) apresentaram uma ferramenta (SE) utilizada para determinar a sequência de bombeio de fluidos na indústria petroquímica.

No contexto do estado de arte apresentado, não foram encontradas pesquisas ou trabalhos (no nível científico ou industrial) no domínio dos sistemas especialistas para assistir o projeto de sistemas hidráulicos com o uso de fluidos biodegradáveis.

## 2.4 OBSERVAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foram revisados alguns conceitos fundamentais sobre os sistemas baseados no conhecimento especificamente os sistemas especialistas, enfatizando-se as principais diferenças entre estes sistemas e a programação convencional. As principais etapas do desenvolvimento de um SE como a aquisição e representação do conhecimento, a validação e verificação do sistema foram também abordadas. Estas etapas ser. No capítulo seguinte se apresenta o conhecimento associado aos fluidos biodegradáveis.

### **CAPÍTULO 3**

## **FLUIDOS BIODEGRADÁVEIS**

Tradicionalmente, fabricantes e projetistas de sistemas hidráulicos têm selecionado fluidos hidráulicos à base de óleo mineral porque eles têm boas características físicas e químicas e são favoráveis economicamente. Fatores externos, no entanto, muitas vezes ditam a seleção de alternativas. Uma grande preocupação no setor industrial é o alto potencial de volatilidade do fluido hidráulico com base mineral. Grandes perdas de capital e de pessoal têm ocorrido por causa de incêndios relacionados a óleos hidráulicos (TOTTEN and WEBSTER, 1996) e hoje em dia os potenciais problemas ambientais associados com fluidos com base mineral ganharam notoriedade. Esses problemas incluem baixas taxas de biodegradabilidade, toxicidade nos meios aquáticos, a manipulação de material contaminado e os elevados custos de tratamento de resíduos. Sem contar com os possíveis problemas de disponibilidade ao longo prazo e as implicações de custo futuro como outra questão da viabilidade dos fluidos hidráulicos fabricados a partir do petróleo. Neste contexto surge como candidato potencial o fluido biodegradável como alternativa aos fluidos com base mineral.

Antes do século XIX, os principais fluidos lubrificantes eram naturais contendo óleo vegetal como a soja e a colza ou baseados em gorduras animais como banha (WILSON, 1998). Durante a Segunda Guerra Mundial, outros tipos de óleos de base foram introduzidos e utilizados em função da utilização dos aviões na guerra, os quais exigiam fluidos de resistência a altas temperaturas.

Especialmente para os fluidos hidráulicos biodegradáveis há uma vasta gama óleos com base química diferente. Também dentro dos fluidos biodegradáveis existem os chamados bio-óleos, como ilustrado na Figura 8, os quais são óleos com base vegetal. Estes começam a partir do óleo vegetal natural para aplicações de baixa temperatura e terminam com éster totalmente saturado como base para produtos com aplicações específicas. Não só a estabilidade ao envelhecimento, mas também o preço variam muito. Uma das soluções para isto é um acompanhamento e/ou monitoração online da condição do fluido que pode ajudar a aperfeiçoar o uso desses e garantir a confiabilidade do sistema hidráulico ao mesmo tempo. Isto poderá levar a uma maior aceitação destes fluidos ecológicos no mercado.



Figura 8. Fontes para produção de bio-óleos

O impacto ambiental global de um fluido biodegradável é determinado por uma série de fatores, incluindo o recurso renovável, a natureza e a quantidade de emissões resultantes durante a fabricação, as emissões durante o uso e, finalmente, a eliminação que podem incluir as emissões de energia. Embora o desenvolvimento de processos de refino tenha diminuído alguns dos perigos do óleo mineral tradicionalmente utilizado para lubrificantes, a atenção tem sido centrada em lubrificantes e fluidos derivados, a partir de óleos vegetais ou de fluidos sintéticos.

Embora o uso dos chamados biodegradáveis como fluido hidráulico têm inegáveis vantagens em termos de recursos renováveis, biodegradabilidade, toxicidade e de custos, eles sofrem de uma série de deficiências que promovem desempenho limitado na sua utilização nos sistemas hidráulicos de potência.

Os bio-óleos estão principalmente na sua forma natural como triglicerídeos e tendem a sofrer de problemas térmicos, estabilidade hidrolítica e oxidação em comparação com os óleos minerais. A maioria destes óleos não são capazes de resistir a temperaturas maiores de 80 ° C num reservatório, assim como, a presença de água e espuma pode causar problemas acentuados de degradação. As principais vantagens dos óleos vegetais sobre os óleos minerais foram identificados por Carruthers et al. (1995) como: alta biodegradabilidade, baixa toxicidade, alto ponto de inflamação, altos índices de viscosidade, alta lubrificidade e compatibilidade com tintas e selos.

A Figura 9 mostra a distribuição dos fluidos hidráulicos utilizados no mercado industrial e hidráulica móvel. Com 86%, o óleo mineral tem a maior quota de mercado seguido de fluidos resistentes ao fogo com cerca de 10% e os fluidos biodegradáveis com 4%. (Murrenhoff, 2004).

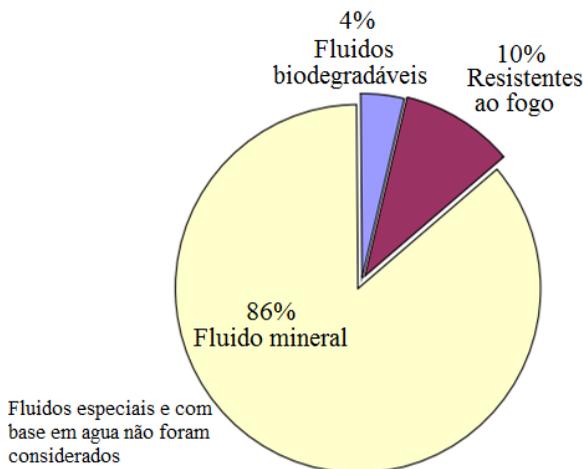


Figura 9. Distribuição dos fluidos hidráulicos no mercado industrial (Murrenhoff, 2004)

Em outro contexto, hoje em dia em vários países desenvolvidos existe um grande esforço em pressionar fabricantes de fluidos para desenvolver e produzir produtos ambientalmente seguros seguindo normas nacionais, regionais ou internacionais, as quais são divulgadas em forma de rótulos (Figura 10).



Figura 10. Rotulagem para produtos ambientalmente corretos

“Blue Angel” na Alemanha, “White Swan”, na Escandinávia, “Eco-label Trees” na Europa, “Japanese Eco Mark” no Japão, “Maple Leaf” no Canadá e “US Green Seal Program” nos Estados Unidos são



Para ter um maior entendimento dos fluidos biodegradáveis dentro dos fluidos hidráulicos em geral, uma classificação detalhada (Figura 13) é apresentada baseando-se na análise feita por Mang and Dresel (2001).

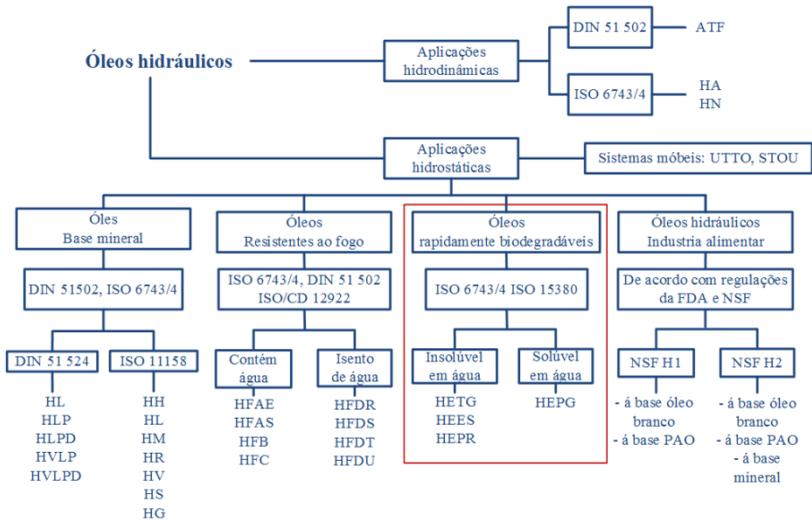


Figura 13. Classificação dos fluidos hidráulicos (adaptado de MANG and DRESEL, 2001)

Segundo estes autores, dependendo da destinação final os fluidos hidráulicos podem ser classificados em dois grandes grupos, quais sejam, fluidos para aplicação hidrostática e os fluidos para aplicação hidrodinâmica.

Os fluidos para aplicação hidrostática são divididos em subgrupos com relação às normas ISO, CETOP e DIN.

- Fluidos hidráulicos com base mineral: Normas DIN 51524 (DIN, 2006) ou ISO 6743/4 (ISO, 1997).
- Fluidos hidráulicos resistentes ao fogo: ISO 12922 (ISO, 1999), VDMA 24317 (VDMA, 2005), CETOP RP97H (CETOP,--) e DIN 51 502 (DIN, 1990)
- Fluidos hidráulicos rapidamente biodegradáveis: ISO 15380 (ISO, 2002) e ISO 6743/4 (ISO, 1997). Família H.
- Óleos para a indústria alimentícia (Food grade) NSF H1, H2 e FDA (Food and Drug Administration): NSF (International – The Public Health and Safety Company).

- Fluidos hidráulicos para aplicação móveis STOU (Super Tractor Oil Universal) e UTTO (Universal Tractor Transmission Oil).

A participação no mercado dos fluidos hidráulicos ambientalmente amigos e rapidamente biodegradáveis está crescendo rapidamente e estão substituindo os fluidos hidráulicos em base de óleo mineral em diversas áreas. Esta tendência foi acentuada pela criação de normas específicas como a VDMA 24568 (VDMA,--), que especifica os requisitos técnicos mínimos para HETG, HEES e HEPG e a inclusão destes três grupos de fluidos na ISO 6743/4 (ISO, 1997) em combinação com a especificação da nova ISO 15380 (ISO, 2002) (expandida para incluir HEPR). Esta classificação específica dos fluidos biodegradáveis é apresentada por importantes pesquisadores como Mang and Dresel (2001) e Kling et al. (2000).

Complementando a informação do parágrafo anterior, os fluidos hidráulicos rapidamente biodegradáveis são classificados de acordo com ISO 6743/4 e ISO 15380 (ISO, 2002) como:

- HETG (Hydraulic Oil Environmental TriGlyceride): Triglicérides (não solúveis em água, óleos em base vegetal).
- HEES (Hydraulic Oil Environmental Ester Synthetic): Tipos de éster sintético (não solúvel em água)
- HEPG: Tipos de poliglicóis (solúveis em água)
- HEPR: Polialfaolefinas e produtos relacionados a hidrocarbonetos.

### 3.1.1 HETG - Fluidos hidráulicos à base de óleos vegetais

Conforme apresentado por Mang e Dresel (2001), trata-se de fluidos hidráulicos com base natural (Triglicérides, óleo vegetal e ésteres naturais), por exemplo, o óleo de soja e o óleo de girassol. As propriedades físicas e químicas destes óleos resultam da sua distribuição de ácidos graxos.

Mang and Dresel (2001) citam que os triglicerídeos de éster natural são obtidos a partir de sementes de plantas oleaginosas como a colza ou girassol por prensagem ou extração. O óleo assim obtido é submetido a uma série de processos de purificação. Colza e outros ácidos graxos naturais podem ser usados como matéria prima para fluidos e/ou lubrificantes HETG ou como matéria prima para os ésteres sintéticos. Óleos hidráulicos HETG suportam menor carga térmica e de oxidação que os óleos minerais. São utilizados para aplicações com baixa pressão e tem-

peraturas médias entre  $-10^{\circ}\text{C}$  até  $60^{\circ}\text{C}$  (Max.  $70^{\circ}\text{C}$ ). Como outra característica está a compatibilidade com material para vedações NBR.

A aplicação dos óleos com base em Triglicérides vem diminuindo uma vez que as exigências na prática muitas vezes não são atendidas. Recomenda-se o emprego somente em instalações com poucas exigências.

Segundo Rexroth (2012), alguns pontos fracos dos óleos HETG são:

- Comportamento ruim a baixas temperaturas
- Baixa capacidade de carga térmica
- Comportamento ruim ao envelhecimento
- Sensível à hidrólise (evitar absolutamente entrada de água)
- Perigo de criação de resina

### **3.1.2 HEES - Fluidos hidráulicos sintéticos à base de ésteres**

Trata-se de fluidos hidráulicos sintéticos à base de ésteres. Segundo Bartz, (1995 apud MANG and DRESEL, 2001, p.298), estes fluidos são divididos em dois tipos: saturados ou insaturados parcialmente. Segundo a Rexroth (2012) e a Mannesmann Rexroth (1993) estes dois tipos podem ser divididos em função do número de iodios.

- Ésteres sintéticos não saturados ( $N^{\circ}$  de iodo  $> 10$ ). Estes apresentam propriedades melhores e mais estáveis do que os fluidos HETG naturais, mas mesmo assim só podem ser recomendados para cargas baixas e médias;
- Ésteres sintéticos saturados ( $N^{\circ}$  de iodo  $< 10$ ). Estes fluidos são melhor apropriados para as mais altas cargas hidráulicas (p.ex. para máquinas de construção civil);

As matérias primas para a síntese de ésteres são provenientes, por um lado, de produtos petroquímicos e, por outro lado, a partir de materiais naturais e sua transformação química.

Suas vantagens incluem a estabilidade à oxidação, a boa compatibilidade com materiais e excelente desempenho tribológico. Estes produtos, que são muito mais caros que os óleos minerais, são usados em alguns sistemas hidráulicos com alta pressão a alta temperatura.

Os requisitos mínimos para os óleos de éster são especificados pela norma ISO 15380.

Segundo a Mannesman Rexroth (1993) algumas vantagens dos fluidos HEES são:

- Excelente comportamento de temperatura, mesmo a baixas temperaturas;
- Boas propriedades lubrificantes;
- Boa proteção contra corrosão;
- Solúvel em óleo mineral;
- Altíssima estabilidade ao envelhecimento;
- Boa compatibilidade com vedações FKM;
- Boa compatibilidade com filtros apropriados;

Embora tenha o custo mais alto entre todos os fluidos biodegradáveis, este é compensado pelos intervalos de troca de óleo mais longos e com isto, dispor de compatibilidade ambiental mais eficiente.

Algumas considerações importantes para a utilização de fluidos do tipo HEES (REXROTH, 2012):

- De modo nenhum o teor de água deve ultrapassar 0,1%. Isso impede a hidrólise e a formação de ácidos nocivos;
- As construções de tanques não podem permitir a entrada de água no sistema;
- Usar filtros de fibra de vidro ou trama metálica. Filtros que possam absorver umidade;
- Limites de temperatura:  $-20^{\circ}\text{C}$  até  $+ 80^{\circ}\text{C}$  (tanque), local  $< 100^{\circ}\text{C}$  na instalação.

### 3.1.3 HEPG - Fluidos hidráulicos sintéticos à base de poliglicóis

Poliglicóis diferem dos fluidos hidráulicos já mencionados por serem solúveis em água. Dependendo das substâncias utilizadas para fabricar o poliglicol (óxido de polietileno, óxido de polipropileno), estes fluidos podem ser sintetizados por diferentes poliglicóis. Como resultado da sua solubilidade em água, os fluidos hidráulicos HEPG podem conter água.

Mang e Dresel (2001) explicam que a solubilidade em água e sua incompatibilidade com óleos minerais têm limitado a sua aceitação. Poliglicóis são utilizados principalmente na indústria de abastecimento de água, no sistema hidráulico de bloqueio de canais, em aplicações da indústria petroquímica, em geral em aplicações que levem à inevitável contaminação do fluido hidráulico pelo contacto com água. Como exemplo tem-se instalações à beira ou sobre água como eclusas, barragens, embarcações de dragagem, assim como também instalações misturadoras de concreto.

Algumas vantagens e desvantagens apresentadas em Rexroth (2012) são descritas.

Vantagens dos fluidos HEPG são:

- Boa resistência a envelhecimento;
- Boas propriedades lubrificantes;
- Vazamentos são facilmente laváveis e invisíveis na água;
- Faixa de temperatura possível  $-30^{\circ}\text{C}$  até  $+90^{\circ}\text{C}$ .

Desvantagens:

- Incompatível com óleo mineral;
- Percentual de óleo residual admissível  $< 1\%$  (com óleos de motor  $< 0,5\%$ );
- Incompatível com vedações de poliuretano;
- Incompatível com as pinturas convencionais;
- Ataca plexiglás;
- Elevada densidade ( $>1\text{g/ml}$ , atenção com bombas em operação de autosucção);
- Água penetrada só pode ser eliminada mediante evaporação;
- Comportamento espumante

O emprego de fluidos HEPG vem diminuindo. Mesmo em eclusas a tendência é para fluidos do tipo HEES.

### **3.1.4 HEPR – Fluidos hidráulicos à base de polialfaolefinas ou hidrocarbonetos sintetizados**

Fluidos do tipo HEPR são fluidos com base em polialfaolefinas ou hidrocarbonetos sintetizados (SHC) que têm melhores propriedades viscosimétricas sobre uma vasta gama de temperaturas que os fluidos a base mineral.

Para este tipo de fluidos, Mang e Dresel (2001) explicam que devido à sua biodegradabilidade e baixo peso molecular, os óleos a base de polialfaolefinas e os produtos derivados de hidrocarbonetos são classificados como fluidos hidráulicos ecológicos. Segundo a norma ISO 15380 estes produtos receberam o nome de fluidos HEPR. A inclusão deste novo grupo na norma ISO 15380 é uma extensão em comparação com a já utilizada norma VDMA 24568. Os fluidos HEPR são mais rapidamente biodegradáveis do que os óleos minerais, mas significativamente menos biodegradáveis que os óleos ésteres e óleos naturais. As características técnicas destes óleos são semelhantes às dos óleos minerais, mas

eles têm a vantagem de rápida biodegradabilidade. A faixa de temperatura admissível de operação para este tipo de fluido é de  $-35$  até  $80$  °C (Temperatura em reservatório de  $-30$  até  $100$ °C).

### 3.2 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS HIDRÁULICOS E EFEITOS EM SEU DESEMPENHO

Segundo Linsingen (2003), os fluidos possuem características que se coadunam com as características dos componentes as quais favorecem a operação adequada dos sistemas sob diversas circunstâncias, tais como ambientes agressivos ou elevadas variações de temperatura e pressão.

O desempenho hidráulico do sistema é afetado pelas propriedades físicas do fluido, que incluem principalmente a densidade, viscosidade, pressão de vapor, formação de espuma e várias propriedades térmicas. O conhecimento adequado dessas características é necessário para ter uma boa análise comportamental do sistema e permitir a adequação do fluido a um sistema em particular junto com suas condições de operação.

Estão listadas a seguir as propriedades dos fluidos hidráulicos biodegradáveis que lhe permitem realizar suas funções fundamentais e cumprir alguns ou todos os seus requisitos de qualidade. As principais propriedades estão detalhadas no apêndice A.

- Viscosidade
- Pressão de vapor
- Densidade
- Compressibilidade
- Capacidade de dissolução do gás
- Aeração
- Formação de espuma
- Demulsificação
- Ponto de fluidez
- Ponto de inflamação
- Lubrificação e propriedades anti-desgaste
- Biodegradabilidade
- Ecotoxicidade
- Estabilidade térmica à oxidação
- Estabilidade a hidrolises

### 3.3 FLUIDOS BIODEGRADÁVEIS NA HIDRÁULICA DE POTÊNCIA

Os resultados de uma pesquisa apresentada por Miller (2008) concluem que os fluidos à base vegetal podem ser usados como um substituto direto para um lubrificante convencional para um desempenho das funções sem modificações. Estes fluidos podem e devem ser utilizados por qualquer pessoa que necessite desempenho no lubrificante em um ambiente ecologicamente sensível.

Nos sistemas hidráulicos de potência, especificamente em bombas hidráulicas, já foram feitos ensaios de desempenho dos fluidos em base vegetal. Segundo Murrenhoff (2004), os fluidos amigos do ambiente têm atingido um elevado grau de sofisticação e de produção já existentes no mercado, muitas vezes excedem o desempenho dos óleos minerais. Os usuários de sistemas hidráulicos têm que olhar para o completo sistema e para os custos ao longo tempo de vida dos seus produtos. Fazendo isto, os custos adicionais para os fluidos e sua monitoração são pequenos em comparação com menos paradas ao longo da vida útil do produto (fluido) e um melhor desempenho durante o tempo de operação.

Em outro contexto, para melhor desempenho de todos os componentes hidráulicos, as diferentes propriedades físicas e químicas do fluido hidráulico têm que estar dentro de uma estreita faixa de especificações. No entanto, estas propriedades são sensíveis a mudanças durante sua utilização no sistema hidráulico. O envelhecimento do líquido, contaminação por água, poluição, sujidade e desgaste por partículas podem causar uma degradação do desempenho do fluido hidráulico com base biodegradável. Soluções a estes problemas que causam os fluidos biodegradáveis nos sistemas hidráulicos são descritas por Seyfert et al (2002) em função da utilização de um bom sistema de monitoração no circuito hidráulico.

Konishi et al. (1997) publicaram um estudo que descreve o desenvolvimento de um fluido hidráulico biodegradável de alto desempenho com boas propriedades como a redução do atrito e um coeficiente de desempenho da lubrificação excelente para pistões de bombas de alta pressão de retroescavadeiras. Já estudos em 1998 apresentaram aplicações do uso de fluidos biodegradáveis em sistemas hidráulicos móveis. Ahola (1998) mostrou uma aplicação do uso destes fluidos em tratores florestais Timberjack (Figura 14) do fabricante John Deere (JOHN DEERE, 2010).

Já no âmbito específico do projeto de sistemas hidráulicos, foi apresentado por Meindorf e Murrenhoff (2000) uma concepção otimizada no que diz às perdas de energia de um circuito hidráulico de uma colheitadeira agrícola.

Aplicação em sistemas hidráulicos com fluidos biodegradáveis usados em reguladores de velocidade de turbinas de centrais hidrelétricas, assim como nos sistemas de abertura e fechamento de comportas hidráulicas são encontradas atualmente, principalmente em países da Europa.



Figura 14. Trator florestal Timberjack. (JOHN DEERE, 2010).

Na Figura 15 é mostrado o sistema de atuação (a) e a unidade de potência de um sistema hidráulico usado para a regulação de uma turbina na Usina hidrelétrica de Böffinger Halde (Alemanha). Este sistema hidráulico, inicialmente funcionado com fluido mineral, emprega atualmente fluido biodegradável de base éster sintético PLANTOHYD 46 S (Panolin, 2012).

Na mesma área de aplicação (hidrelétricas), outro exemplo de projetos de sistemas hidráulicos empregando este tipo de fluido é encontrado na Usina de Langkampfen (Austria). Neste caso, o sistema hidráulico (regulador de velocidade e comportas) emprega desde seu início de funcionamento outro fluido de base éster (PANOLIN TURWADA SYNTH 68) da empresa Panolin (PANOLIN, 2011). A Figura 16 mostra a unidade de potencia do sistema hidráulico da usina de Langkampfen.



Figura 15. Sistema hidráulico usando fluido biodegradável. a) Servomotor do regulador de velocidade; b) Unidade de potência das comportas



Figura 16. Unidade hidráulica de potência na Usina hidrelétrica de Langkampfen (Austria)

No contexto dos fluidos com base em óleo vegetal, resultados de uma série de testes realizados para avaliar as propriedades tribológicas de fluidos com base em óleos de colza e girassol foram apresentados por Kržan and Vižintin (2003). Os resultados em bancadas hidráulicas demonstraram que o óleo de girassol pode corresponder ao desempenho de um fluido mineral em aplicações com temperaturas em torno de 70°C.

Michael et al (2008) faz um estudo detalhado do sistema de filtros nos circuitos hidráulicos utilizando fluidos em base vegetal, visando a vida útil e o desempenho das propriedades dos fluidos biodegradáveis.

Pesquisas detalhadas da otimização do projeto de bombas de pistões a serem usadas com fluidos biodegradáveis sintéticos foram mostradas por Enekes et al. (2010). Este estudo apresentou a influência do projeto geométrico e de novos materiais nas buchas de bombas hidráulicas.

cas, assim como o desempenho do fluido e seu comportamento ecotoxicológico em um circuito hidráulico.

### 3.4 CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO

Em conclusão, com este capítulo podemos observar que sob determinadas circunstâncias os fluidos biodegradáveis são adequados para diferentes aplicações, ex. laboratórios de pesquisa, hidrelétricas, assim como em aplicações móveis.

## **CAPÍTULO 4**

### **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE CONTAMINANTES EM FLUIDOS BIODEGRADÁVEIS**

Os requisitos básicos para um fluido hidráulico ambientalmente aceitável centram-se em ter uma elevada biodegradabilidade e baixa ecotoxicidade, mas também se exige que o desempenho do fluido garanta um funcionamento satisfatório nos componentes hidráulicos. No entanto, para manter um bom desempenho durante longos períodos de funcionamento, precisam-se manter estáveis as propriedades físico-químicas do fluido. Essas propriedades incluem um bom desempenho em altas e baixas temperaturas, boa estabilidade de oxidação e boa estabilidade térmica e estabilidade ao cisalhamento, proteção contra desgaste, baixa demulsibilidade, baixa tendência de formação de espuma e boa filtrabilidade.

Neste cenário, através de testes de envelhecimento é possível analisar quais e até que ponto essas propriedades são afetadas pelas diferentes condições de envelhecimento. A Figura 17. mostra os fatores que podem causar mecanismos de envelhecimento, tais como a polimerização, oxidação, quebra e hidrólise, as quais podem modificar as propriedades do fluido e, conseqüentemente, diminuir a sua capacidade de utilização.

A contaminação em fluidos hidráulicos biodegradáveis com fluido mineral tem sido discutida em Theissen (2009). O autor apresentou que o grau de deterioração não está correlacionado com a quantidade de fluido mineral adicionado, mas sim com a quantidade de metais introduzidos através de aditivos presentes em alguns fluidos minerais, os quais em níveis altos de contaminação podem trazer grandes problemas como a formação de espuma e a baixa liberação de ar. O impacto geral de catalisadores sobre a estabilidade à oxidação de fluidos biodegradáveis foi estudado por Murrenhoff e Schmidt (2002). As investigações mostraram que, de acordo com os resultados do teste de oxidação, o impacto sobre a estabilidade à oxidação de catalisadores metálicos é fortemente dependente da proporção entre a área de superfície do catalisador e da quantidade de fluido. Os mesmos autores analisaram o envelhecimento de fluidos biodegradáveis em função do atrito o desgaste (Murrenhoff e Schmidt, 2003).

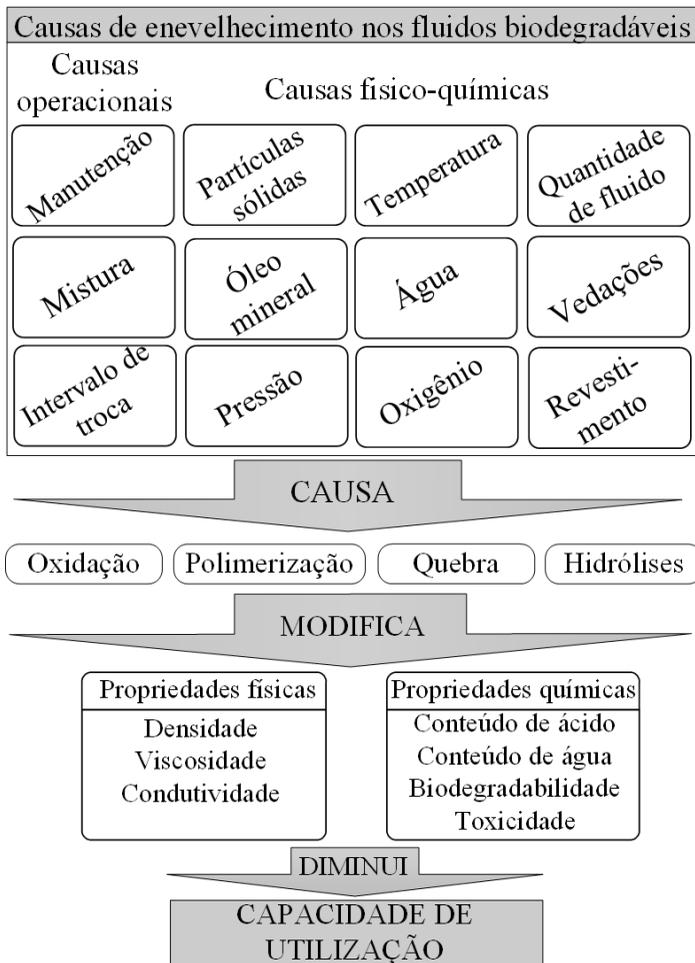


Figura 17. Causas e efeitos do envelhecimento

A biodegradabilidade é um processo natural conduzido pela ação de microorganismos. De acordo com a Rhee (2008), na presença de oxigênio, nitrogênio, fósforo e traços minerais, poluentes orgânicos podem suportar o crescimento microbiano e são convertidos para uma série de produtos de oxidação que geralmente terminam no dióxido de carbono e água. Uma visão geral de métodos de ensaio, bem como uma ilustração de alguns rótulos ecológicos é apresentada em Rhee (2011).

No contexto baseado nas referências citadas anteriormente e tendo em conta os objetivos específicos deste trabalho, esta seção apresenta um estudo relacionado à influência de contaminantes como água, oxigênio, fluido mineral e partículas sólidas sobre as características de biodegradabilidade e envelhecimento de fluidos hidráulicos biodegradáveis utilizados em circuitos hidráulicos de potência.

Esta pesquisa teve o objetivo de adquirir o conhecimento da influência de contaminantes nas características de biodegradabilidade e envelhecimento de fluidos hidráulicos biodegradáveis o qual é um pré-requisito para as aplicações de sucesso destes fluidos em sistemas hidráulicos. Essa pesquisa foi desenvolvida durante o ano 2011 no Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS) e no Institute of Hygiene and Environmental Medicine, ambos os institutos pertencentes à RWTH Aachen University (Alemanha). O estudo foi feito no escopo do doutorado sanduíche dentro do programa bilateral de cooperação DAAD – CNPq.

#### 4.1 DESCRIÇÃO DOS TESTES

A análise da influência de contaminantes em fluidos biodegradáveis foi realizada por meio de testes oxidação e testes de estabilidade hidrolítica. O procedimento e tarefas desta pesquisa são mostrados na Figura 18.

O primeiro passo da estratégia está relacionado aos requisitos, os quais incluem a seleção de diferentes tipos de fluidos hidráulicos biodegradáveis (HETG, HEES, HEPG ou HEPR) produzidos por diferentes fabricantes para ser utilizados nos testes. Para este efeito, três diferentes fluidos biodegradáveis (de acordo com os requisitos da norma ISO 15380 (ISO 15380, 2002)) de dois diferentes fabricantes foram usados nos testes de laboratório.

Os três fluidos são do tipo base éster sintético (HEES), os quais são identificados no documento como fluido A, B e C. A Tabela 2 mostra propriedades de interesse destes fluidos.

Os principais fatores associados com o envelhecimento do fluido hidráulico são oxigênio, temperatura, água e catalisadores metálicos (Stammen, 2003). Além dessas causas de envelhecimento, a contaminação com óleo mineral foi também considerada para a pesquisa apresentada nesta seção.

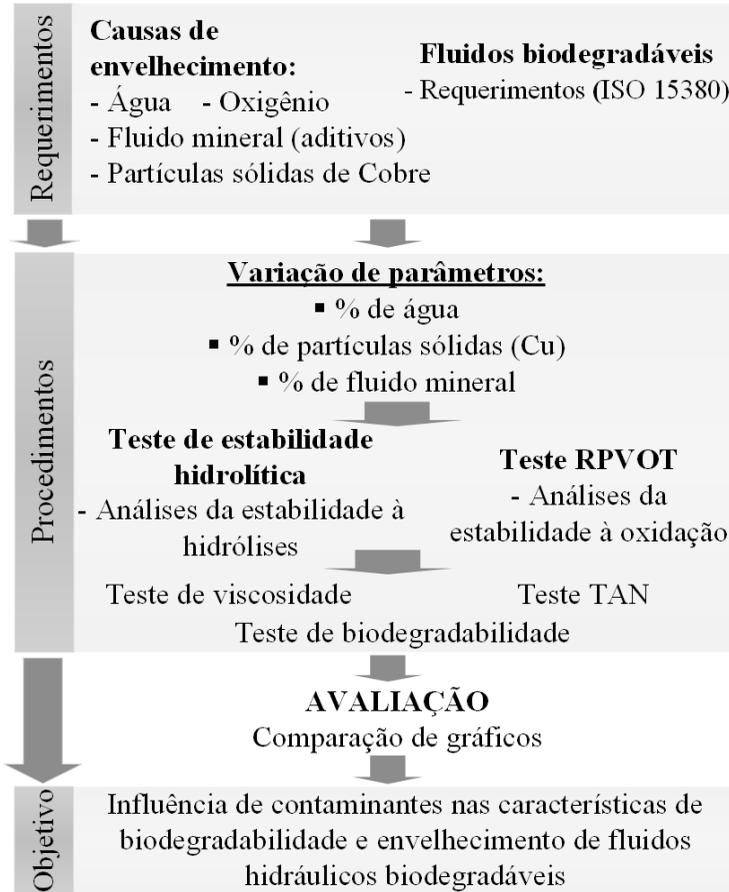


Figura 18. Estratégia da pesquisa

O teste de oxidação (rotary pressure vessel oxidation test – RPVOT), teste de hidrólise, testes de biodegradabilidade e testes de toxicidade foram realizados em diferentes temperaturas e em função da adição de percentagens conhecidas (amostras) de fluido mineral, água e partículas sólidas para os fluidos hidráulicos biodegradáveis.

Os parâmetros considerados para observar o envelhecimento dos fluidos foram a viscosidade e número de acidez total (TAN), nos ensaios de oxidação e hidrólise. Finalmente, os resultados foram processados e comparados por meio de gráficos.

Tabela 2. Fluidos hidráulicos biodegradáveis utilizados nos testes<sup>3</sup>

	Tipo de fluido	Viscosidade Cinem. a 40°C mm <sup>2</sup> /s <sup>a</sup>	Viscosidade Dinam. a 40°C mm <sup>2</sup> /s <sup>b</sup>	Biodegradabilidade OECD 301 <sup>a</sup>
Fluido A	Éster sintético	30.60	34.93	≈70%
Fluido B	Éster sintético	41.4 – 50.6	46.59	>70%
Fluido C	Éster sintético	≈68	69.05	>70%

<sup>a</sup> Dados de catálogo

<sup>b</sup> Dados experimentais (IFAS)

#### 4.1.1 Teste de estabilidade à oxidação

O RPVOT foi utilizado para determinar a estabilidade à oxidação dos fluidos, submetendo o fluido a condições de oxidação extremas. Este teste é normalmente realizado de acordo com ASTM D-2272 (ASTM, 2009), onde o fluido é colocado num recipiente de aço fechado sob pressão de oxigênio (6,25 bar), na presença ou não de um catalisador (normalmente cobre). O recipiente é submerso em fluido aquecido a 120 °C e mantido em um movimento circular a 100 rpm, o que provoca um aumento da pressão no interior do vaso. Para cada ensaio é registrado o tempo que leva a pressão cair 1,75 bar. Quanto maior o valor de tempo registrado, melhor estabilidade à oxidação do fluido.

Para a pesquisa aqui referida, o critério de medição foi modificado devido à grande quantidade de testes realizados. Para cada experiência um tempo de teste de 24 horas, foi aplicado. O critério utilizado para determinar a estabilidade à oxidação foi a queda de pressão no recipiente entre a pressão máxima atingida durante o ensaio e a pressão após as 24 horas. A bancada de testes disponível no IFAS assim como a descrição do ensaio experimental é mostrada na Figura 19.

---

<sup>3</sup> Dados obtidos do manual do fabricante

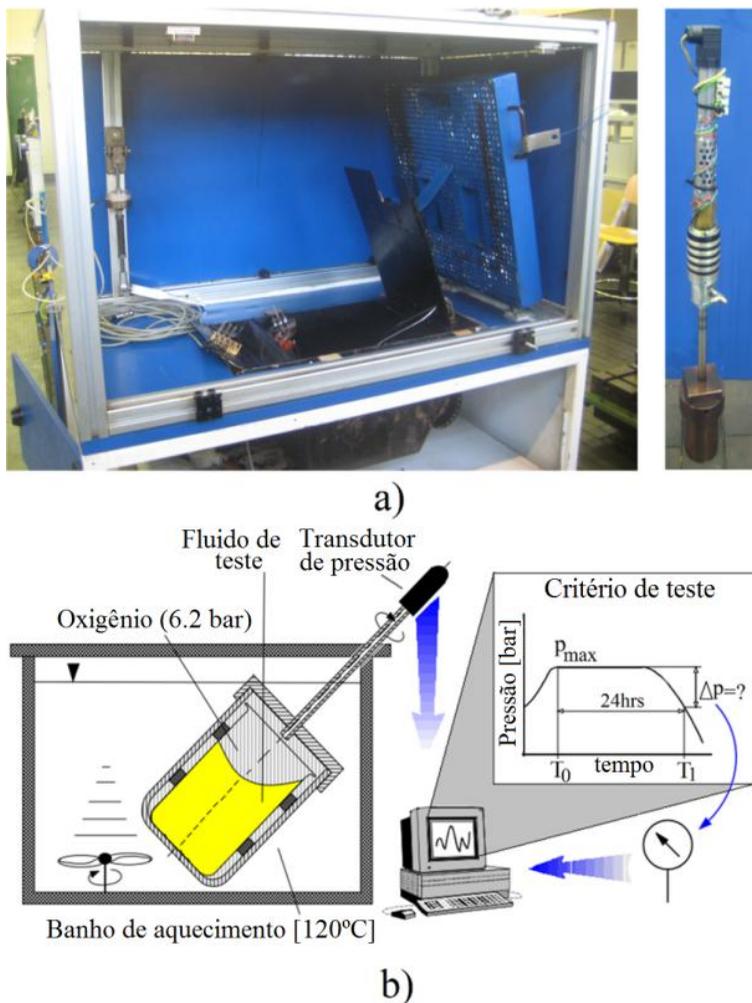


Figura 19. a) Bancada experimental para determinar a estabilidade à oxidação, b) Procedimento do teste RPVOT

#### 4.1.2 Teste de estabilidade hidrolítica

A investigação da estabilidade hidrolítica é de vital importância para a avaliação das propriedades úteis dos fluidos que são submetidas a uma rápida degradação biológica. Fatores que influenciam a hidrólise são principalmente o teor de água, a temperatura e o tempo de retenção

da água no fluido. Além disso, a presença de metais afeta significativamente a ação hidrolítica.

Quando os ésteres de fluidos são sintetizados a partir de ácidos gordurosos e alcoóis, água é gerada e esta é subsequentemente removida. Se entrar água no fluido durante a operação, o processo é invertido e o equilíbrio hidrolítico é ajustado e alcoóis e ácidos são produzidos.

A estabilidade hidrolítica dos fluidos de referência foi testada na presença de água (1%). A Figura 20 mostra a bancada para ensaios de estabilidade hidrolítica disponível no IFAS.

O procedimento de ensaio consiste em colocar uma amostra de fluido (70 g) com 1% de água num frasco de vidro fechado dentro de um recipiente de aço inoxidável. O recipiente é deixado dentro de um banho térmico (90 °C) durante um período específico, neste caso por 72 horas. O recipiente movimenta-se (rotação) a 50 rpm para garantir que a amostra seja misturada completamente (Figura 20).

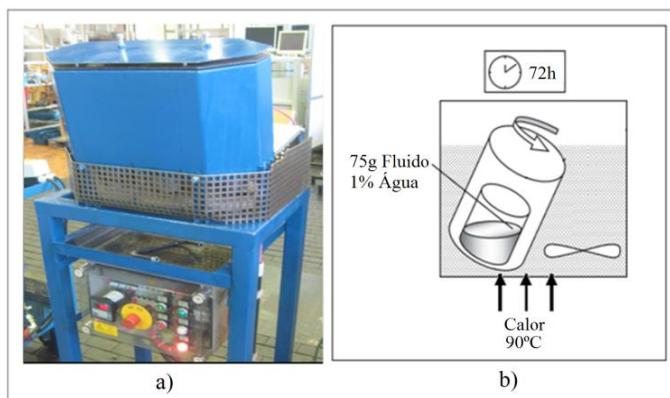


Figura 20. Ensaio experimental para determinar a estabilidade hidrolítica (adaptado de Klaas et al (2003).) a) banco de testes; b) Procedimento de ensaio

### 4.1.3 Teste de biodegradabilidade

Segundo Eisentraeger et al. (2002), a avaliação da biodegradabilidade pode ser feita através do teste " $O_2=CO_2$  com GC-TCD (Cromatografia Gasosa - Detecção de condutividade térmica)", que é feita de acordo com procedimentos normalizados da ISO 10708 (BODIS-Test) (ISO, 1997) e ISO 14593 (ISO  $CO_2$  Headspace Test).

O teste de biodegradabilidade combinado baseia-se na medição da mineralização aeróbia final (dióxido de carbono em água) da substância (fluido) em teste. Os resultados são expressos através da relação demanda biológica de oxigênio / ausência teórica de oxigênio (BOD/ThOD) e produção de dióxido de carbono / produção teórica de dióxido de carbono (TIC/ThIC).

Como descrito por Eisentraeger et al. (2002), o material de teste é introduzido num frasco contendo substrato mineral e um inoculo bacteriano (Figura 21a).

Depois de vibração ultra-sônica, os conteúdos do frasco são arejados com ar livre de dióxido de carbono. Qualquer dióxido de carbono libertado é absorvido em frascos contendo solução de hidróxido de bário. Periodicamente, a quantidade de solução de hidróxido de bário utilizado é determinada por ajuste com ácido clorídrico.

A biodegradabilidade é expressa como a percentagem da quantidade total de dióxido de carbono libertado durante o ensaio, em relação ao dióxido de carbono teórico que o material de teste pode ter produzido. A substância é avaliada como "biodegradável" se a degradação é superior a 60% no prazo de 28 dias de acordo á norma OCDE 301B (OECD, 1984



Figura 21. Testes de biodegradabilidade. a) amostras em frascos de vidro, b) Cromatógrafo de gás

#### 4.1.4 Testes de viscosidade e TAN

A viscosidade cinemática é uma medida da vazão relativa de um fluido sob a influência da gravidade. A determinação experimental da viscosidade foi realizada utilizando um sistema de medição de viscosidade (PVS) de acordo com DIN 51562 (DIN 1978). A medição foi rea-

lizada com viscosímetros capilares de vidro calibrados, em que o fluido passa através de um orifício de diâmetro fixo, sob a influência da gravidade, submerso em um banho térmico (óleo) a 40 °C.

O TAN foi medido de acordo com a norma DIN 51558 (DIN 1979). Este método abrange a determinação de ácidos em lubrificantes ou fluidos hidráulicos. A amostra é dissolvida numa solução de tolueno e água contendo álcool isopropílico.

## 4.2 RESULTADOS

O objetivo dos testes laboratoriais foi analisar como os contaminantes pode influenciar as características de biodegradabilidade e envelhecimento de fluidos biodegradáveis comerciais, assim como a obtenção de informações sobre quais efeitos ocorrem por diferentes concentrações e combinações de contaminantes (fluido mineral, partículas de cobre sólido e água).

Os fluidos hidráulicos biodegradáveis são padronizados pela norma ISO 15380 (ISO, 2002). Esta norma exige que a concentração da contaminação com fluido hidráulico mineral não deve exceder 2% (1% no caso de óleos de motor ou HLPD). O fluido mineral padrão utilizado foi o HLP 46. As concentrações usadas foram 2% (a quantidade limite de acordo com a ISO 15380) e 10%. A amostra de cobre utilizada como contaminante consistiu em partículas sólidas de 40 µm. A amostra usada no teste foi de 0,25 g (massa calculada de acordo com a superfície de cobre usada nos testes de oxidação acordo com a ASTM D 2272-02 (ASTM, 2009)). A outra quantidade de cobre utilizada nos ensaios foi de 1 g. A concentração de água usada foi de 1000 mg / kg (1000ppm) de acordo com as normas ISO 12937 (ISO, 2000) e ISO 6296 (ISO, 2002). No segundo teste uma amostra de água com 10000 mg / kg foi aplicada.

### 4.2.1 Estabilidade à oxidação

A estabilidade à oxidação dos fluidos foi investigada através da utilização do RPVOT modificado A comparação visual do fluido A, antes e depois dos ensaios de oxidação é mostrada na Figura 22. Nesta figura é possível observar que na maioria dos casos, uma inspeção visual pode fornecer uma indicação sobre a gravidade das alterações no fluido. Os resultados de reações químicas típicas sobre os fluidos após o teste de oxidação provocam uma aparência de cor escura no fluido.

A Figura 23 mostra os resultados de estabilidade à oxidação do fluido A. Tendo em conta que quanto menor a queda de pressão é maior estabilidade à oxidação do fluido, na Figura 23 é possível observar que o óleo mineral melhora a estabilidade à oxidação do fluido biodegradável em teste, contrariamente à influência do cobre e da água. Esta grande influência do óleo mineral pode ser visto também na Figura 24 e na Figura 25, as quais descrevem a estabilidade à oxidação do fluido biodegradável B e C, respectivamente.

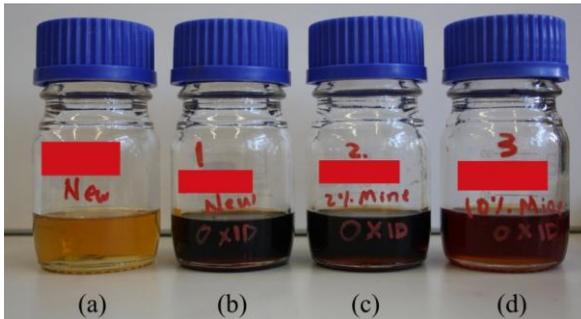


Figura 22. Comparação visual do fluido A. (a) fluido novo, (b) fluido após o teste de oxidação, (c) fluido com óleo mineral (2%) após o teste de oxidação, (d) fluido com óleo mineral (10%) após o teste de oxidação

Uma possível razão para esta baixa influência do óleo mineral sobre os fluidos biodegradáveis é que os efeitos da contaminação (aditivos do óleo mineral) podem demorar várias horas ou dias para poder ser observados nos testes. De acordo com Theissen (2009), os fabricantes de fluidos e pesquisas recentes têm sugerido que os efeitos principais de deterioração podem não ser causados pelo óleo mineral, mas sim pelo metal contido no aditivo do fluido, os quais levam à formação de verniz.

Continuando com a análise, os resultados apresentados na Figura 23, Figura 24 e na Figura 25 mostram claramente que o teor de água de 10000 mg/kg (=1%) pode afetar consideravelmente a oxidação dos fluidos biodegradáveis atingindo uma variação percentual cerca de 200% para o fluido A e B, em comparação aos resultados no fluido novo (Bio-oil). Já na Figura 25 pode ser visto a baixa estabilidade à oxidação do fluido C quando é misturado com cobre.

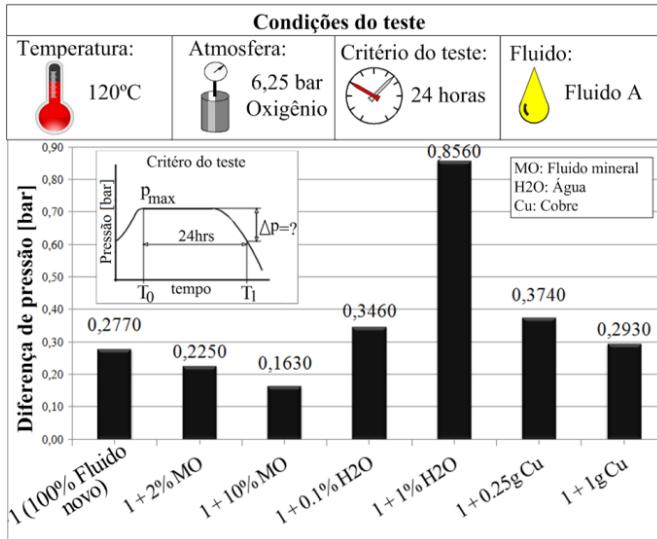


Figura 23. Estabilidade à oxidação do fluido A

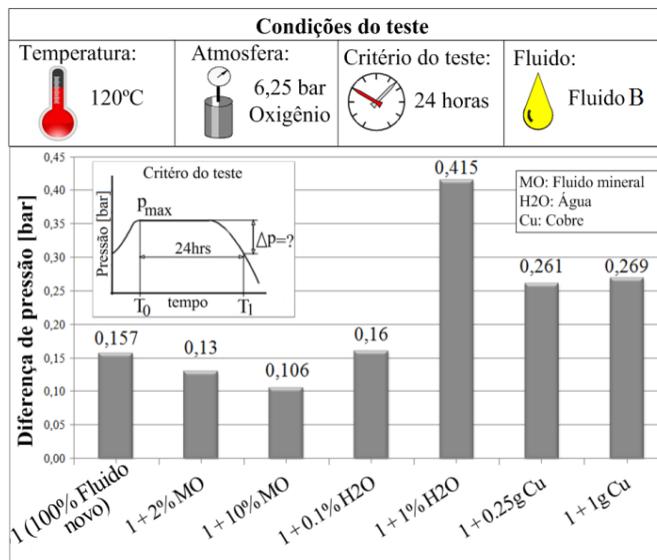


Figura 24. Estabilidade à oxidação do fluido B

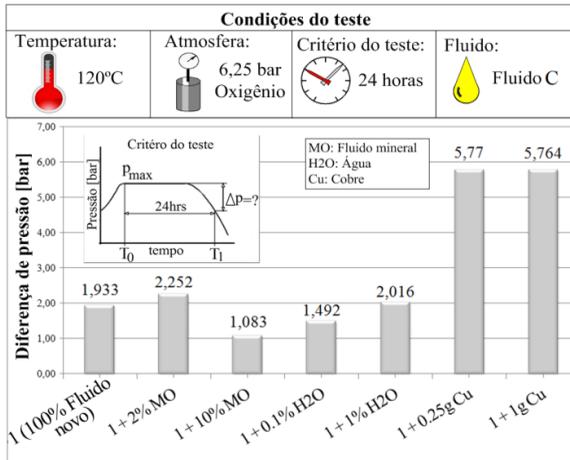


Figura 25. Estabilidade à oxidação do fluido C

#### 4.2.2 Viscosidade e TAN como resultado do teste de oxidação

A medição do atrito interno de um fluido é caracterizada pela sua viscosidade e esta é uma das propriedades mais importantes dos fluidos. A acidez dos fluidos expressada pelo TAN é de interesse porque indica o grau de oxidação do fluido. A acidez dos fluidos novos (ou seja, antes do teste de oxidação) é normalmente determinada pelo tipo e concentração do éster e materiais aditivos específicos. Tanto a viscosidade e TAN foram escolhidos para descrever o grau de envelhecimento dos fluidos hidráulicos e os resultados para estes parâmetros são apresentados na Figura 26 e na Figura 27 respectivamente.

A norma ISO 15380 (ISO, 2002) especifica que o aumento máximo da viscosidade a 40°C para os fluidos biodegradáveis após o teste à estabilidade de oxidação Baader (DIN 51554-3) é de 20%.

De acordo com a Figura 26, o aumento máximo na viscosidade dos fluidos A e B foi de 6% em relação a todos os contaminantes. Para Fluido C o aumento da viscosidade foi de cerca de 8% na presença de água e de óleo mineral e de 45%, na presença de cobre, ficando fora do limite na norma. A Figura 27 mostra uma comparação geral do TAN (mg/g). Nesta figura, mais uma vez, é possível observar que a influência da água em elevada concentração (10%), bem como partículas sólidas de cobre aumenta o TAN nos três fluidos, principalmente no fluido C que atingiu valores superiores a 50 mg/g.

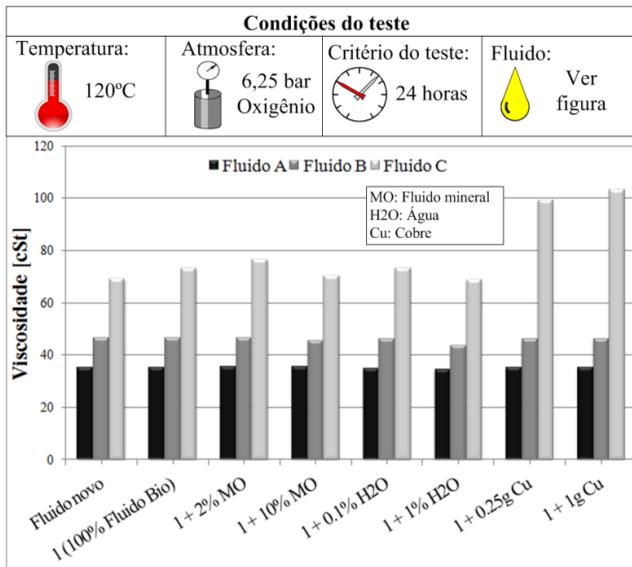


Figura 26. Viscosidade após o teste de oxidação.

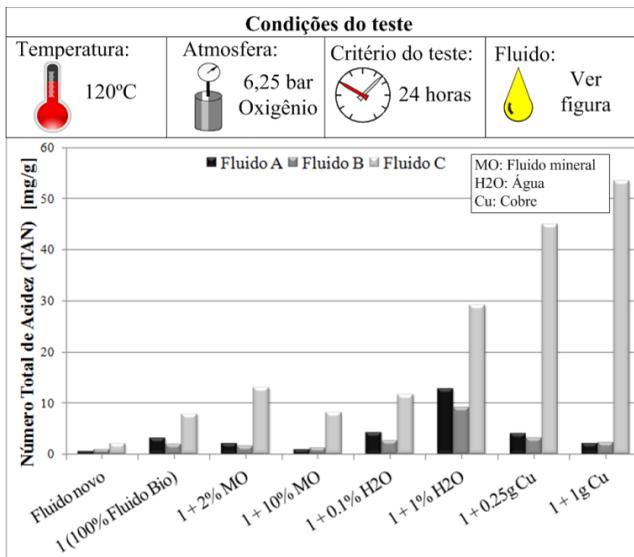


Figura 27. TAN após o teste de oxidação.

### 4.2.3 Viscosidade e TAN como resultado do teste de hidrólises

A baixa influência dos contaminantes na viscosidade, como resultado do teste de hidrólise é mostrada na Figura 28, na qual é observada uma variação máxima de 5% em todos os fluidos analisados com relação ao fluido novo (antes da hidrólise).

Em relação à influência dos contaminantes no TAN como resultado do teste de hidrólise, a Figura 29 mostra claramente que a presença de qualquer conteúdo de contaminantes (água, fluido mineral ou cobre), exerce uma influência significativa na produção de ácido nos fluidos biodegradáveis. A resistência do fluido à hidrólise é uma questão importante. Se a taxa de compensação do fluido, não é suficiente para equilibrar o grau de absorção de água, ácidos fortes podem ser causar corrosão no circuito hidráulico. A partir da Figura 29 pode ser visualizado o grande problema nos fluidos biodegradáveis causadas pela contaminação da água originando a produção de ácidos. Adicionalmente a isto, a presença de outros contaminantes como o cobre e fluido mineral em quantidades consideráveis aumenta a produção de ácidos e, conseqüentemente, aumenta o envelhecimento do fluido, reduzindo a usabilidade.

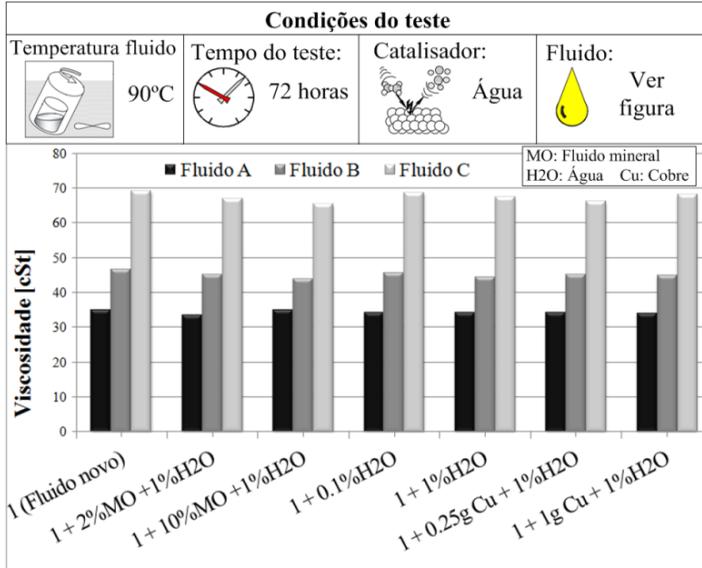


Figura 28. Viscosidade após o teste de hidrólises

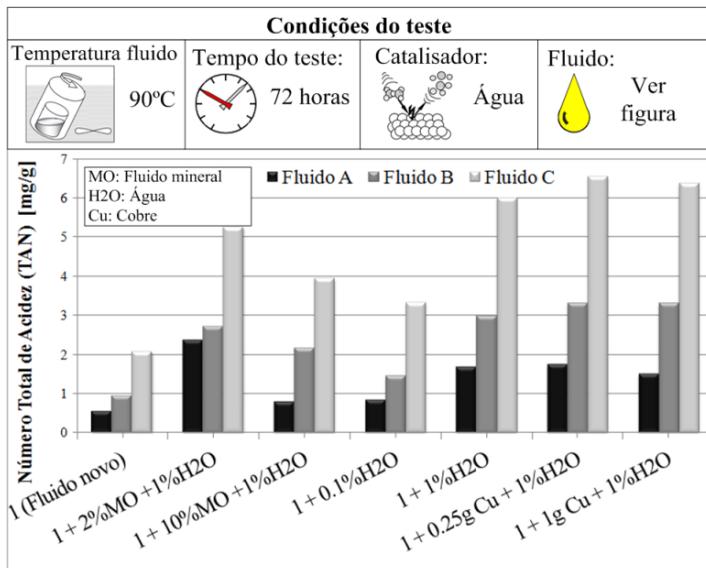


Figura 29. TAN após o teste de hidrolises

#### 4.2.4 Ensaios de biodegradabilidade

Para os testes de biodegradabilidade, a metodologia descrita por Eisentraeger et al. (2002) foi adotada. Nesta pesquisa, o grau de biodegradabilidade é expresso como uma porcentagem do consumo de  $O_2$  teórico (ThOD) ou da produção de  $CO_2$  (ThIC). Na Figura 30 são apresentados resultados obtidos de testes no fluido A. Estes testes foram realizados no Instituto de Higiene e Medicina Ambiental na RWTH Aachen University. Os resultados mostraram que a biodegradabilidade do fluido A (novo), quase atingiu o valor limite (60% para a biodegradabilidade imediata) da norma OCDE (OECD, 1984).

Como esperado, o fluido mineral é muito menos biodegradável do que os fluidos biodegradáveis analisados nesta pesquisa. Através da Figura 30 é possível ver que a biodegradabilidade do fluido A diminuiu entre 10% a 12 quando foi misturado com o fluido mineral comum.

Após o teste de estabilidade a hidrólise, o Fluido A apresentou uma diminuição de 4% na biodegradabilidade, provavelmente causada pela produção de ácidos e alcoóis. Em relação à biodegradabilidade do fluido após o teste de estabilidade à oxidação, foi observada uma dimi-

nuição de 21%, atingindo valores abaixo do valor limite da OCDE para biodegradabilidade.

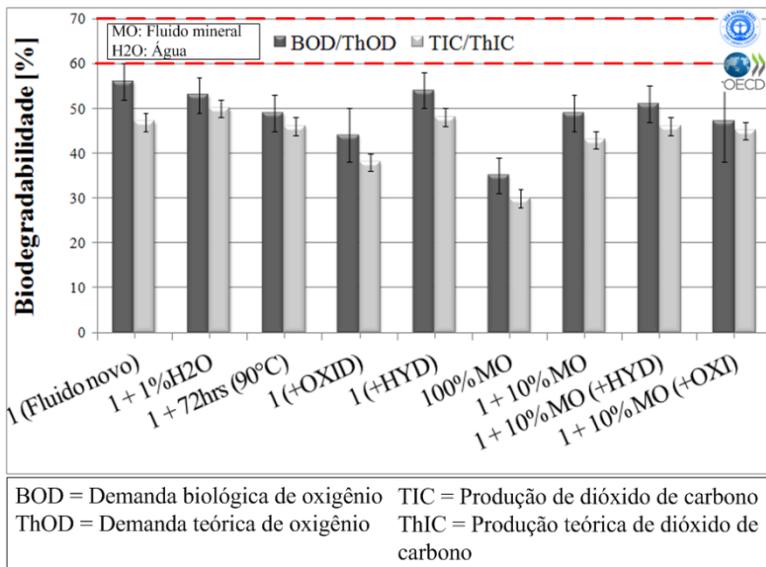


Figura 30. Testes de biodegradabilidade do fluido A

### 4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Nesta seção foi apresentado um estudo experimental do impacto geral de contaminantes sobre a estabilidade à oxidação e a estabilidade à hidrólise de fluidos biodegradáveis comerciais. Os fluidos biodegradáveis analisadas foram sensíveis à contaminação por partículas sólidas de cobre, oxigênio (oxidação), a água (hidrólise), alta temperatura (degradação térmica) e fluidos hidráulicos minerais.

De acordo com os resultados experimentais, foi possível observar a influência positiva do fluido mineral sobre a estabilidade à oxidação dos fluidos biodegradáveis, em contraste com a influência da água e do cobre. Além disso, o teste de RPVOT revelou que o efeito das partículas sólidas de cobre sobre a estabilidade à oxidação não é dependente da quantidade de cobre presente. Os resultados mostram claramente que o teor de água mais elevado do que 1000 mg / kg pode afetar consideravelmente a estabilidade à oxidação e à hidrólise dos fluidos biodegradáveis.

Para todos os fluidos analisados, a tendência da alteração do TAN resultante da oxidação é, em geral, na mesma tendência que a resultante da hidrólise. Isto implica que as condições (tipo de contaminante), que exercem uma influência negativa sobre a estabilidade à oxidação também exercem uma influência significativa sobre a hidrólise, os dois efeitos expressos em termos de um aumento do TAN.

Os contaminantes nas concentrações usadas mostraram um efeito negativo significativo sobre a biodegradabilidade dos fluidos biodegradáveis. Como esperado, os fluidos analisados tiveram uma diminuição entre 10 e 12% na biodegradabilidade, quando são misturados com fluido mineral

Uma conclusão importante da pesquisa é que apenas a biodegradabilidade em um fluido (novo) atingiu o valor limite da OCDE de 60% para biodegradabilidade imediata.



## **CAPÍTULO 5**

### **SISTEMATIZAÇÃO DO PROJETO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS COM FLUIDOS BIODEGRADÁVEIS - SHBIO**

Neste capítulo é apresentada a sistematização do processo de projeto de sistemas hidráulicos proposta, a qual é baseada na aquisição do conhecimento e aplicação de conceitos de metodologia de projeto.

O conhecimento associado ao uso de fluidos biodegradáveis, assim como da seleção de componentes hidráulicos é registrado. Esse conhecimento foi obtido principalmente como a interação com especialistas, sendo complementado por literatura (ex. normas, catálogos técnicos) especializada da área.

#### **5.1 SISTEMAS HIDRÁULICOS**

Os sistemas hidráulicos são geralmente representados por dois módulos bem definidos: o circuito de potência e condicionamento do fluido e o circuito de atuação. O circuito de atuação promove a atuação sobre a carga e é normalmente composto por válvulas acopladas a cilindros ou motores hidráulicos. Já o circuito da unidade de potência é responsável pelo suprimento de energia hidráulica para os circuitos de atuação e constitui-se fundamentalmente de reservatório, motor elétrico, bomba, válvula de alívio e filtro.

A Figura 31 apresenta a configuração de um sistema hidráulico típico, onde são detalhados alguns componentes primordiais como à bomba, reservatório, filtro, válvula direcional, cilindros entre outros. Estes componentes dos circuitos hidráulicos podem variar de acordo com a aplicação, incluindo diversos tipos de válvulas ou modificações no reservatório (componentes auxiliares).

Os sistemas hidráulicos são aplicados em praticamente todos os ramos da engenharia: maquinarias agrícolas, hidráulica industrial, em aplicações navais, aeronáutica, geração de energia elétrica entre outras; isso ocorre devido a algumas vantagens, como a versatilidade de sua configuração e a precisão no controle de dispositivos mecânicos pesados.

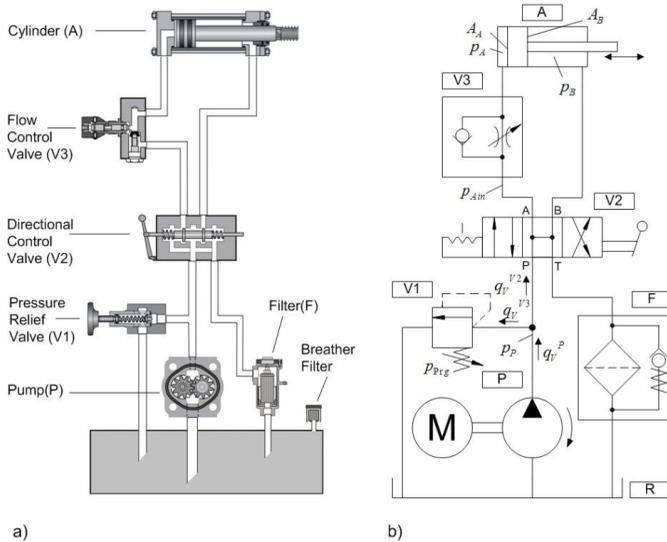


Figura 31. Circuito hidráulico: a) Ilustração; b) Diagrama do circuito. (LISINGEN, I. VON e DE NEGRI, 2012)

## 5.2 DISPONIBILIDADE DE INFORMAÇÕES

A aquisição do conhecimento para o desenvolvimento da sistematização proposta no presente trabalho foi feita a partir dos seguintes fontes:

1. Conhecimento teórico obtido através de uma serie de referências bibliográficas as quais incluem livros, artigos, estudos técnicos e catálogos de componentes hidráulicos e de fluidos biodegradáveis.
2. Conhecimentos heurísticos obtidos de entrevistas a especialistas em cada uma das áreas implícitas no protótipo.

*Especialistas em projeto de sistemas hidráulicos:*

- Prof. Dr. Eng. Victor Juliano De Negri (UFSC – Brasil)
- Eng. Fernando Amorim (Reivax – Brasil)
- Prof. Dr. Eng. Antonio Carlos Valdiero (UNIJUI – Brasil)
- Engenheiros e técnicos de fabricantes de componentes específicos para aplicações com fluidos biodegradáveis (Bosch, Sauer Danfoss).

*Especialistas em fluidos biodegradáveis:*

- Dr.-Ing. Heinrich Theissen (IFAS – Alemanha)
- Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff (IFAS – Alemanha)

- Dr. George E. Totten (Texas A&M University – Estados Unidos)
  - Mike Gent (Conestoga USA, Inc)
  - Dr. In-Sik Rhee (U.S. Army RDECOM-TARDEC)
  - Engenheiros e técnicos de fabricantes de fluidos biodegradáveis (Panolin, Bechem, Fuchs, BP).
3. Normas nacionais e internacionais disponíveis (ASTM, VDMA, ISO, DIN, OECD, CEC).
  4. Informações técnicas de monitoração para sistemas hidráulicos disponíveis através de catálogos ou documentos técnicos (Argos Hytos, Hydac, Fluidon).
  5. Rede de intercambio de conhecimentos entre o Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS) - Aachen University (RWTH) – Alemanha e o Laboratorio de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) – UFSC – Brasil.

### 5.3 PROPOSTA DA SISTEMATIZAÇÃO DO PROJETO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS

Como apresentado no primeiro capítulo, a proposição desta tese é uma nova sistematização para projetar um sistema hidráulico considerando o uso de fluidos biodegradáveis como fluido de potência, a qual é estruturada a partir de um sistema baseado no conhecimento. Além disso, esta sistematização vai ser desenvolvida dentro das fases iniciais do processo de projeto, onde o projetista trabalha com as concepções de projeto.

Para os sistemas hidráulicos, os princípios de solução utilizados para desenvolver as concepções de projeto, na grande maioria das vezes, baseiam-se nos componentes já disponíveis no mercado. A principal função do projetista é selecionar e adequar o arranjo ou leiaute desses componentes dentro do circuito hidráulico, para que os mesmos atendam os novos ou modificados requisitos de projeto e consequentemente as funções do sistema.

A inclusão de uma nova variável ao projeto de sistemas hidráulicos, como a utilização de fluidos biodegradáveis, mostra a necessidade de novos métodos de suporte ao projeto. O gerenciamento do projeto em função dos novos ou modificados requisitos ou especificações de entrada, exige o suporte diferentes campos de conhecimento como tribologia e química.

Este novo método ou metodologia tem que possibilitar a integração efetiva das equipes de projeto, unificar informações e proporcionar ao projetista maior segurança na tomada de decisões para poder solucionar a maioria dos problemas que aparecem na implementação do projeto.

Neste contexto da metodologia de projeto, existe uma ampla base bibliográfica e de pesquisa. Nos últimos anos, métodos para projeto de sistemas automáticos ou mecânicos, nos quais se inserem os sistemas hidráulicos, têm sido desenvolvidos pelo Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (De Negri (1996), Furst (2001), Souto (2005), Matos Filho (2007) e Porciúncula (2009)).

Dentro dos conceitos da engenharia de produto, o Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NEDIP/EMC/UFSC) tem publicado trabalhos sobre metodologias de desenvolvimento de produtos industriais para diferentes áreas de atuação. Romano (2003) apresenta um modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produtos, que se divide em três macro-fases: Planejamento do projeto, Elaboração do projeto do produto e Implementação, sendo estas compostas por fases, conforme apresentado na Figura 32. A macro-fase “Elaboração do projeto do produto”, formada pelas fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado, representa o período nas quais as atividades de projeto irão transformar necessidades e idéias em especificações, concepções e modelos detalhados do produto que será produzido. A síntese de vários trabalhos resultou no Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP) adotado pelo NEDIP e apresentado em Back, et al. (2008).

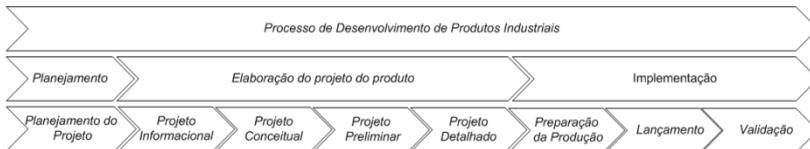


Figura 32. Representação gráfica do modelo do processo de desenvolvimento integrado de produtos – PRODIP (BACK et al., 2008)

No modelo de referência PRODIP são apresentadas, além das fases do processo de projeto, as entradas e saídas de cada fase do projeto. Para cada fase do projeto, definem-se etapas, subdivididas em tarefas específicas, que convergem para a definição de um sistema que atenda as diretrizes ou especificações iniciais de projeto.

De certa forma, a estrutura apresentada propõe atividades (fases) para o processo de projeto com características comuns que representam um conjunto de atividades com objetivos específicos tais como:

- Projeto informacional, com objetivo de estabelecer os requisitos de projeto;
  - Projeto conceitual, atividade que segue as especificações de projeto e busca uma concepção para obter princípios de soluções;
  - Projeto preliminar, trabalhos direcionados à configuração do produto, ou seja, dar formas, dimensões;
  - Projeto detalhado, atividades de engenharia onde são feitas, análises, seleção, especificação de materiais e processos etc.
- Estruturação da sistematização de projeto

Especificamente, o projeto conceitual é a fase do processo de projeto que gera, a partir das especificações, uma ou mais concepções para um produto que atenda da melhor maneira possível esta necessidade, sujeita às limitações de recursos e às restrições de projeto (FERREIRA, 1997; OGLIARI, 1999). Nessa seção, as especificações de projeto são processadas com base em ferramentas que as transformam em conceitos funcionais do produto.

Neste contexto e em função da não existência de uma metodologia específica para o projeto de sistemas hidráulicos que abarque todas as diretrizes que compõem o sistema, será proposta nesta seção a Sistematização de Projeto de Sistemas Hidráulicos usando Fluido Biodegradável (SHBIO). A SHBIO tem o intuito de sistematizar o processo de projeto de circuitos hidráulicos (campo industrial e móbil) empregando fluido biodegradável e está inserida na fase conceitual e preliminar da metodologia PRODIP.

A SHBIO visa auxiliar o projetista na tomada de decisão, baseado em regras, durante a atividade de avaliação da concepção do sistema. Desta forma, a análise será baseada nos requisitos de projeto e na base de conhecimentos obtida e sintetizada em um SBC. Conforme a Figura 33, a SHBIO envolve quatro fases e tem como resultado final a seleção de um ou vários fluidos biodegradáveis que podem ser usados em função dos requisitos de entrada solicitados pelo usuário, assim como também será definido a seleção dos principais componentes do circuito hidráulico. Adicionalmente a estes resultados, serão proporcionadas diretrizes de monitoração do sistema hidráulico.

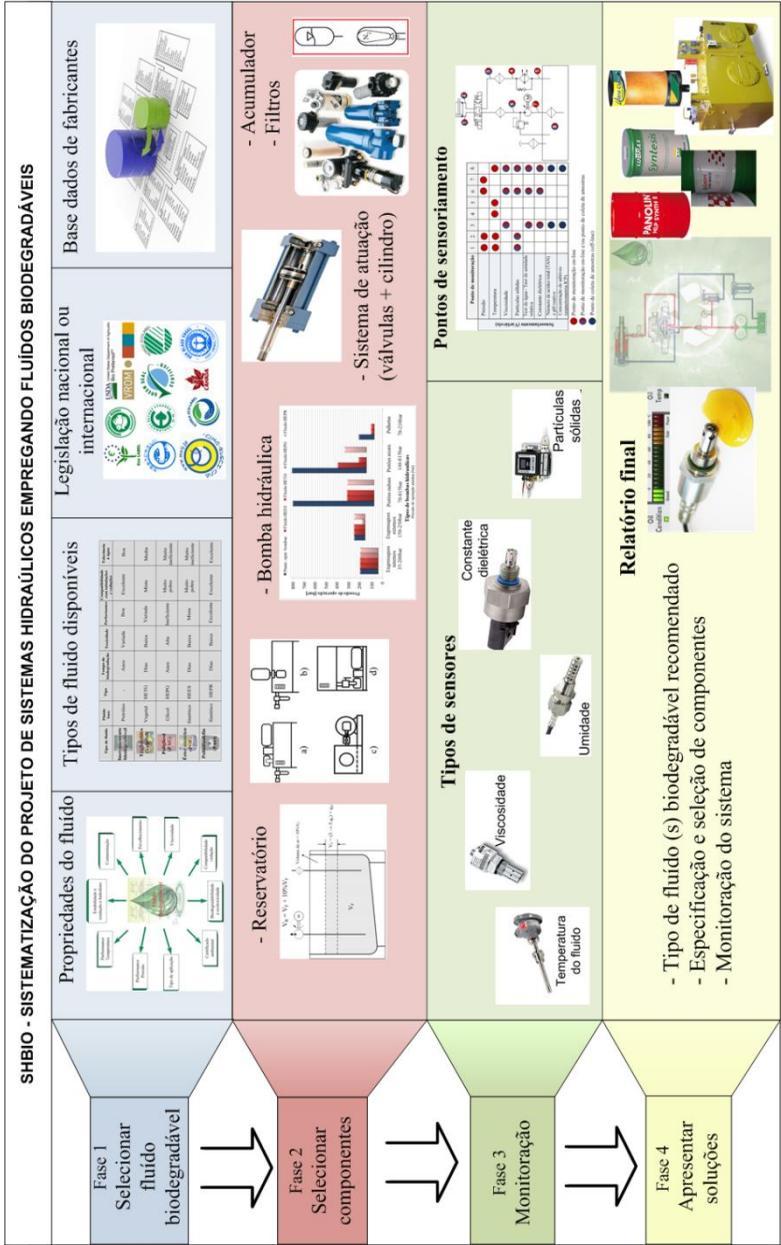


Figura 33. Visão geral da sistematização de projeto proposta para sistemas hidráulicos (SHBIO)

A primeira fase da sistematização é selecionar e/ou especificar o tipo (HEES, HEPG, HEPR ou HETG) de fluido biodegradável a ser utilizado no sistema hidráulico em função de uma série de requisitos de projeto iniciais.

Em função de um circuito de potência hidráulico padrão para o tipo de aplicação selecionado e tendo em conta as especificações e requisitos de projeto que o próprio fluido biodegradável selecionado determina, serão selecionados os principais componentes hidráulicos (reservatório, filtro, bombas, etc) de dito circuito (Fase 2). Seguidamente, na fase 3 são definidas diretrizes para a monitoração da condição do fluido, dos componentes, assim como do próprio sistema em função de tipos de sensores e da demarcação dos pontos de monitoração.

Na fase 4 o resultado final da sistematização (soluções) é apresentado em forma de relatório final.

#### 5.4 FASE 1 SELEÇÃO DO FLUIDO BIODEGRADÁVEL

Para garantir um bom projeto e um bom funcionamento do sistema hidráulico, o fluido hidráulico deve ser cuidadosamente selecionado. Atualmente há uma grande disponibilidade de fluidos, cada um com características únicas. Com o aumento das aplicações da hidráulica móbil e industrial, as inovações dos fluidos se mantiveram no mesmo ritmo das necessidades industriais e, como resultado, muitas propriedades devem ser analisadas na hora da seleção de um fluido entre as múltiplas opções disponíveis no mercado.

Como o fluido hidráulico mineral (base de petróleo) é o mais utilizado na indústria, a maioria dos componentes hidráulicos são testados para utilização com este tipo de fluido. Porém, como descrito na problemática desta pesquisa, estes fluidos minerais não são biodegradáveis e, como resultado, o vazamento de fluido conduz frequentemente à contaminação do solo e/ou destruição da vida marinha. Para isto, fluidos amigos do ambiente foram desenvolvidos.

Para a utilização destes fluidos biodegradáveis em sistemas hidráulicos existem algumas propriedades do fluido, conforme ilustrado na Figura 34, que devem ser analisadas detalhadamente em função da sua degradação e sua influência no desempenho do fluido e do próprio sistema. Um desses requisitos básicos é o desempenho do sistema hidráulico em função da sua temperatura e pressão. Outros, como o envelhecimento, a compatibilidade com materiais de vedação, estabilidade à oxidação e hidrólises devem ser tomados em consideração em virtude

das características especiais do tipo de fluido, seja este de base éster sintético, vegetal, água ou hidrocarbonetos.

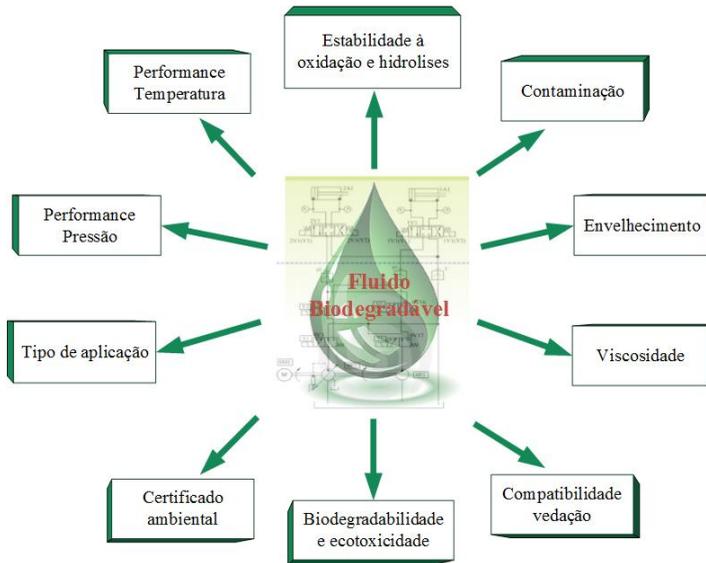


Figura 34. Parâmetros que definem a seleção do fluido biodegradável

Neste contexto, esta fase tem como objetivo selecionar o tipo de fluido biodegradável a ser empregado no sistema hidráulico em função de uma série de propriedades inerentes aos próprios fluidos, as quais definem a sua especificação/seleção.

Uma comparação entre os requisitos de projeto iniciais e uma base de dados (apêndice B) contendo uma lista de fluidos biodegradáveis, cada um com suas propriedades (atributos), é utilizada para determinar a seleção do fluido. Na Tabela 3 é apresentado um exemplo do detalhamento das propriedades que definem cada fluido biodegradável relacionado na base de dados.

Na Figura 35 se apresenta a estrutura da Fase 1 – Seleção do fluido biodegradável, a qual é detalhada em 7 atividades, as quais são subdivididas em tarefas. A seguir descrevem-se cada atividade da fase 1.

Tabela 3. Fluido biodegradável listado na base de dados

	<b>Fluido 4</b>
<b>Tipo de fluido</b>	HEES-Tipo Ester Sintetico
<b>Nome comercial</b>	Plantohyd S
<b>Fabricante</b>	Fuchs
<b>Tipo de aplicação</b>	Simulação e carregamento Mineração Industria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeira Máquinas agrícolas
<b>Grau de viscosidade disponível</b>	22 - 32 - 46 -68
<b>Índice de viscosidade VI</b>	191(22) - 188(32) - 186(46) - 177(68)
<b>Compatibilidade de vedações</b>	NBR, FPM, AU, HNBR
<b>Rotulos</b>	Blue Angel (Alemanha) (22 e 46) Eco-label trees - (EU) (22 e 46)
<b>Contao água</b>	sim: <0.1%
<b>Contato outros fluídos</b>	sim: <2% óleo mineral
<b><i>t minop</i> (°C)</b>	-35
<b><i>t maxop</i> (°C)</b>	90
<b><i>p maxop</i> (bar)</b>	210
<b>Nível de biodegradabilidade</b>	>60% (OECD 301 B)
<b>Nível de toxicidade</b>	Baixo
<b>Estabilidade á oxidação</b>	Alta
<b>Estabilidade á hidrólise</b>	Alta
<b>Propriedades anti-desgaste</b>	FZG >13
<b>Classe de pureza (ISO 4406)</b>	19/16/13

#### 5.4.1 Atividade 1.1 Campo de aplicação do sistema hidráulico

O tipo de aplicação deve ser uns dos atributos mais importantes na escolha de um fluido hidráulico, a fim de assegurar a capacidade do sistema para funcionar corretamente e alcançar uma vida longa.

Hoje em dia as aplicações dos sistemas hidráulicos são variadas, o qual se deve principalmente ao projeto e fabricação de componentes com maior precisão e com materiais de melhor qualidade. Estes sistemas hidráulicos ganharam uso em larga escala e aplicabilidade nos processos de fabricação industrial (Figura 36), assim como na indústria móbil (Figura 37). Embora a tecnologia que apresenta os sistemas hidráulicos seja antiga, continua sendo um sistema dominante nos processos modernos.

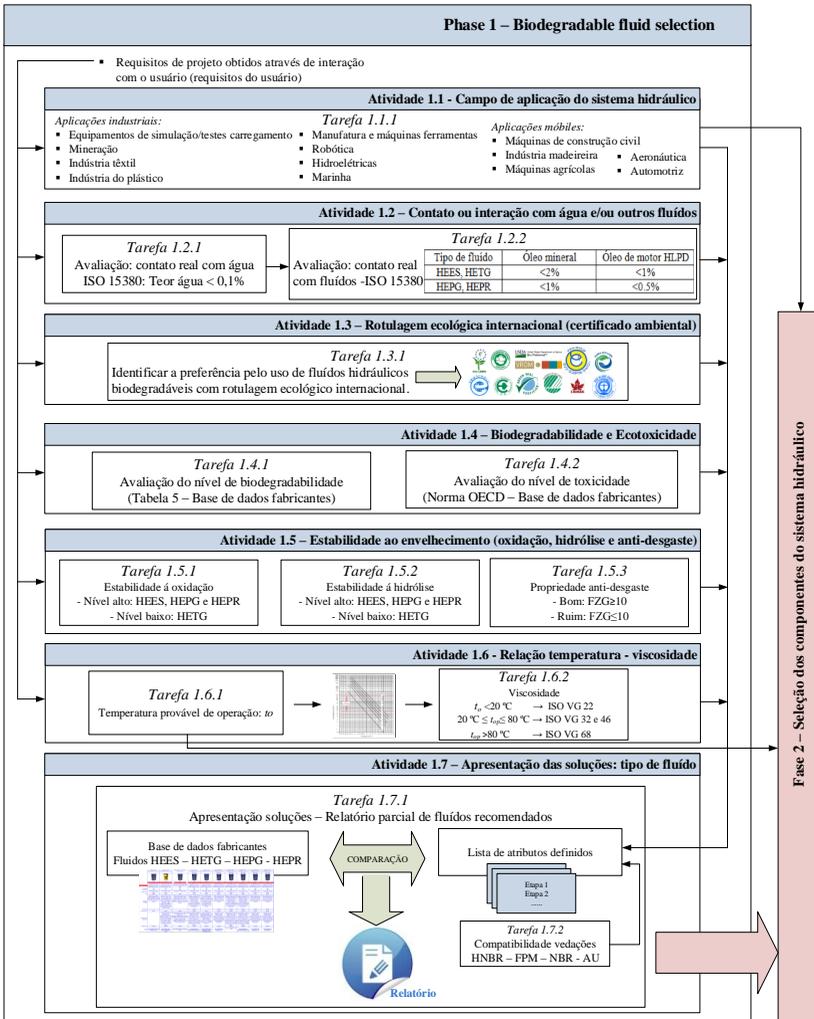


Figura 35. Estrutura da Fase 1- Seleção do fluido biodegradável

Nesta atividade da fase 1, é listada uma série de aplicações nas quais os sistemas hidráulicos com fluido biodegradável podem ser utilizados.

*Aplicações industriais:*

- Equipamentos de simulação e testes de carregamento
- Mineração

- Indústria têxtil
- Indústria do plástico
- Manufatura e máquinas ferramentas
- Robótica
- Hidroelétricas
- Marinha



Figura 36. Aplicações industriais da hidráulica de potência

*Aplicações móveis:*

- Máquinas de construção civil
- Indústria madeireira
- Máquinas agrícolas
- Aeronáutica
- Automobilística



Figura 37. Aplicações móveis da hidráulica de potência

*Tarefa 1.1.1 Definir o campo de aplicação do sistema hidráulico*

Para a maioria de aplicações industriais, o uso de fluidos biodegradáveis do tipo HETG (base vegetal) não é recomendado, isto porque na prática os requisitos operacionais tais como a temperatura e contaminação muitas vezes não são satisfeitos (SAUER DANFOSS, 2011; REXROTH, 2010; MAROUGU, 2012). Os fluidos HETG sofrem um

impacto negativo em operações com altas e baixas temperaturas, causando envelhecimento rápido e oxidação. Da mesma forma, estes fluidos são suscetíveis à contaminação com água, provocando o aumento de hidrólises e TAN no fluido. Se qualquer dos campos de aplicação industrial é selecionado, não haverá disponibilidade dos fluidos HETG para as atividades seguintes. Os fluidos do tipo HEES, HEPG e HEPR são recomendados para uso em aplicações industriais.

De outro lado, caso seja escolhido um campo de aplicação móbil, os fluidos do tipo HEPR, HEES e HETG são recomendados. Uma ressalva a esta regra diz respeito à recomendação do uso de fluidos do tipo HETG apenas em sistemas hidráulicos móveis com baixa carga.

#### **5.4.2 Atividade 1.2 Contato ou interação com água e/ou outros fluidos**

Conforme Figura 35, a atividade 1.2 é detalhada em duas tarefas, citadas a seguir:

##### *Tarefa 1.2.1 Avaliar o contato real com água*

A água pode existir em três formas em um circuito hidráulico, livre, emulsificada e dissolvida. Água dissolvida é quando a presença de água é inferior ao ponto de saturação do fluido, em geral abaixo de 1000 ppm, a fase de contaminação não apresenta alteração na coloração do fluido; não há indicação visual. Já a água emulsificada é a presença de água próximo à tangência do ponto de saturação; início de aparecimento de micro bolhas de água e mudança no aspecto visual do fluido, apresentando aparência leitosa (branqueamento) do fluido. A presença de água acima do ponto de saturação do fluido a qual é visualmente identificada é chamada de água livre. Este último tipo de presença de água provoca um índice de contaminação muito além do aceitável para sistemas hidráulicos, causando em curto período avarias permanentes no fluido e em componentes internos ao sistema.

Em sistemas hidráulicos, o efeito da água sobre o fluido é frequentemente ignorado. A contaminação da água em excesso pode resultar em oxidação prematura do fluido causando a formação de verniz. Uma consequência nos fluidos biodegradáveis à base de éster é a destruição hidrolítica do fluido base, resultando na formação de ácidos corrosivos. Em algumas circunstâncias, a água pode também extrair os aditivos do fluido através da hidrólise prematura, o qual provoca a degradação do fluido. Estes e outros efeitos desfavoráveis da contaminação dos

fluidos biodegradáveis com água foram confirmados no estudo apresentado no capítulo 4.

Segundo a norma ISO 15380 (ISO, 2002), o conteúdo de água calculado (através do método Karl Fischer) deve manter-se nos seguintes limites:

1. Para todos os tipos de fluido biodegradável  $< 0,1\%$  (1000ppm).
2. Para fluido do tipo HEPG (base de água)  $< 0,5\%$  (5000ppm).

Neste contexto, esta tarefa define o requisito de projeto (através do requisito de usuário) em função da informação relevante que verifica se o sistema vai ter uma possibilidade efetiva de contato com água. As opções são:

- Há uma baixa probabilidade de contato real ou iteração com água. Isto pode ser devido à condensação da umidade presente no ar, a práticas regulares de manutenção, a uma inadequada instalação da tampa do reservatório ou problemas em vedações (opção 1 da norma ISO 15380)
- Há uma alta probabilidade de contato real ou iteração com água. Isto pode ser devido a práticas deficientes de manutenção ou componentes hidráulicos expostos a condições adversas de trabalho como chuva forte ou componentes submergidos na água (opção 2 da norma ISO 15380).
- O fluido não tem real interação com água (componentes hidráulicos isolados e boas praticas de manutenção).

#### *Tarefa 1.2.2 Avaliar o contato real com outro tipo de fluido hidráulico (mineral ou biodegradável)*

Particularmente, a troca de fluido mineral por fluidos biodegradáveis, assim como a troca entre fluidos biodegradáveis podem trazer sérios problemas ao sistema, especificamente relacionados a reações químicas que por sua vez causam o surgimento de resinas, espuma, lodo e verniz. Na hora da troca do fluido em sistemas hidráulicos deve-se assegurar uma compatibilidade do novo fluido com o fluido residual o remanescente. Para maiores detalhes com relação á troca de fluidos de diferentes classificações, recomendam-se as normas VDMA 24314 e VDMA 24569, assim como o anexo A da norma ISO 15380 (2002).

Com relação ao contato com fluido mineral, seja do tipo residual nos componentes ou por contaminação externa, Theissen (2009) expôs que o fluido mineral em quantidades significativas pode gerar problemas relacionados ao excesso de espuma, liberação do ar e até obstrução de

filtros. Theissen (2009) comenta também que há inúmeros relatos sobre mudanças frustradas de sistemas hidráulicos com fluido mineral para fluido biodegradável. Mas atualmente não há praticamente nenhuma literatura disponível sobre este problema. A experiência de fabricantes de equipamentos hidráulicos e seu medo de reclamações com relação à garantia de componentes resultam em uma atitude muito prudente e restritiva para o uso de fluidos biodegradáveis.

Seja um circuito hidráulico projetado para o uso com fluido biodegradável ou um reprojeto de um sistema já existente, a norma ISO 15380 (2002) define os valores limites (residuais ou por contaminação) de fluido mineral dentro do sistema conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Valores limites residuais de fluido mineral para os fluido biodegradáveis de acordo com a norma ISO 15380 (2002).

Tipo de fluido	Óleo mineral	Óleo de motor HLPD
HEES, HETG	<2%	<1%
HEPG, HEPR	<1%	<0.5%

Para esta tarefa são definidas três opções relacionadas aos limites residuais de fluido mineral, as quais são:

- É um novo projeto usando componentes comerciais (componentes projetados para operar com fluido mineral) (limites <1% fluido e <0.5% óleo de motor)
- É um reprojeto (troca total do fluido mineral por fluido biodegradável e troca parcial dos componentes hidráulicos) usando componentes comerciais (componentes projetados para operar com fluido mineral) (limites <2% fluido e <1% óleo de motor)
- É um novo projeto usando componentes projetados para usar com fluido biodegradáveis e/ou componentes testados para usar com este tipo de fluidos.

### 5.4.3 Atividade 1.3 Rotulagem ecológica internacional

*Tarefa 1.3.1 Definir a preferência por rotulagem ecológica internacional*

Rótulos ecológicos (certificado ambiental) são concedidos por órgãos independentes de certificação (nacional ou internacional) que salientam as vantagens ambientais de um produto (fluido) através de critérios múltiplos de abordagem baseados no ciclo de vida e critérios

referentes aos impactos ambientais do produto, assim como do desempenho técnico.

Alguns dos principais rótulos ecológicos para fluidos biodegradáveis são:

- Blue Angel: Alemanha
- Japanese Eco-label: Japão
- White Swan: Escandinávia
- Korea Eco-label: Coreia do sul
- Czech Eco-label: República Checa
- Croatia Eco-label: Croácia

Nesta atividade com tarefa única (1.3.1) é requisitado ao usuário a preferência pela seleção de fluidos biodegradáveis com certificado internacional ambiental.

#### **5.4.4 Atividade 1.4 Biodegradabilidade e ecotoxicidade**

As duas principais características para considerar um fluido hidráulico como fluido biodegradável é ter um nível máximo de biodegradabilidade e um nível mínimo de ecotoxicidade. Nesta atividade são apontados os níveis de estas características desejados no fluido. Conforme a Figura 35, a atividade 1.4 é detalhada em duas tarefas citadas a seguir:

##### *Tarefa 1.4.1 Avaliar o nível de biodegradabilidade*

Métodos de ensaio comuns, tais como os desenvolvidos pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), o Conselho Europeu de Coordenação (CEC), e da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM), para a determinação da biodegradabilidade de fluidos hidráulicos são OECD 301B (o teste modificado Strum), e ASTM D-5864. A medição da biodegradabilidade rápida através da OCDE 301B (OECD, 1984) e ASTM D-5864 (ASTM, 2006) é definida como degradação de 60% do fluido no prazo de 28 dias após o início do teste. Em contraste, o método CEC L-33T-33 (CEC, 1994) testa a biodegradabilidade global de compostos de hidrocarbonetos e requer da biodegradabilidade de 80% em 21 dias.

Para a obtenção de alguns certificados, como a Blue Angel, os produtos devem passar por uma série de requisitos de desempenho técnico bastante rigoroso, por exemplo, a exigência de altos níveis de biodegradabilidade baixo nível de toxicidade para os fabricantes.

Neste contexto e dado que a maioria dos fabricantes especifica a biodegradabilidade de seus fluidos através de diferentes normas, a avali-

ação do nível de biodegradabilidade referente a tarefa 1.4.1 é delineada da seguinte forma:

- Nível alto de biodegradabilidade: fluidos listados na base de dados (Apêndice B) que em função do método referenciado no catálogo, possuam valor de biodegradabilidade igual ou maior ao limite inferior estabelecido segundo a Tabela 5. Esta tabela sintetiza a maioria dos métodos de ensaio padronizados internacionalmente para a medição da biodegradabilidade. A maioria dos fabricantes de fluidos comerciais emprega como critério de alto nível de biodegradabilidade > 70% no teste OECD 301B.
- Nível médio de biodegradabilidade: fluidos listados na base de dados que em função do método utilizado, possua um valor de biodegradabilidade menor ao limite inferior estabelecido segundo a Tabela 5. Para um nível médio, pode ser utilizado o critério de >60% e < 70% no teste OECD 301B.

Tabela 5. Métodos padrões internacionais para medir a biodegradabilidade (modificado de Willing (2001))

Tipo de teste	Nome do teste	Parâmetro medido <sup>4</sup>	Limite inferior <sup>5</sup>	Método (Norma)
Biodegradabilidade rápida (A substância é considerada ser inerentemente biodegradável usando qualquer um destes testes se este apresenta biodegradabilidade $\geq 20\%$ durante o período de teste)	DDAT	DOC	$\geq 70\%$	OECD 301 A
	Strum	CO <sub>2</sub>	$\geq 70\%$	OECD 301 B
	MITI	DOC	$\geq 70\%$	OECD 301 C
	Teste em frasco fechado	BOD/COD	$\geq 60\%$	OECD 301 D
	MOST	DOC	$\geq 70\%$	OECD 301 E
	Sapromat	BOD/COD	$\geq 60\%$	OECD 301 F
	Strum	CO <sub>2</sub>	$\geq 60\%$	ASTM D-5864
	Frasco agitado	CO <sub>2</sub>	$\geq 60\%$	EPA 560/6-82-003
	BODIS	BOD/COD	$\geq 60\%$	ISO 10708
Biodegradabilidade de	CEC	Espectro	$\geq 80\%$	CEC L-33-A-934

<sup>4</sup> DOC: Carvão orgânico dissolvido; CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono; BOD: demanda de oxigênio bioquímico; COD: demanda de oxigênio químico

<sup>5</sup> Biodegradabilidade rápida é definida como a mineralização completa de um composto de água, dióxido de carbono e sais minerais de acordo com um critério de teste específico. Limite inferior indica a percentagem de mineralização completa (ou biodegradabilidade final), conforme indicado pelo "parâmetro medido" que deve ocorrer para que um produto seja classificado como facilmente biodegradável.

hidrocarbonetos		infravermelho		
Teste de seleção (semi-oficial)	CO2 câmara de gás	CO2	≥60%	ISO 14593

#### *Tarefa 1.4.2 Avaliar o nível de ecotoxicidade*

Além de ter um alto nível de biodegradabilidade, o fluido também deve demonstrar uma baixa toxicidade para os organismos vivos (aquáticos). Métodos de ensaio para demonstrar toxicidade incluem os testes da OCDE (201-204 e 209-212), assim como os testes correspondentes às diretrizes ambientais da USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) através do teste EPA 560/6-82-002 (USEPA, 1999). Mas os mais comuns testes de toxicidade aquática para avaliar fluidos hidráulicos são o teste de crescimento para as algas de 72 horas (OCDE 201), ensaio de toxicidade aguda para Dáfnias de 48 horas (OCDE 202), e o teste de toxicidade para os peixes de 96 horas (OCDE 203).

O ensaio OECD 202 é o ensaio mais reconhecido. Este mede a concentração letal do produto (fluido) na água que vai matar 50% dos organismos dentro de 96 horas. Quanto menor a concentração, o fluido é mais tóxico.

Como a maioria dos fabricantes não fornece dados quantitativos da toxicidade do fluido, a tarefa definirá o nível de toxicidade de acordo à norma OECD e/ou ao atributo (qualificação) fornecida por cada fabricante.

Esta definição será proposta como:

- Nível baixo de toxicidade: Os fluidos hidráulicos que afirmam ter um baixo nível de toxicidade aquática precisam passar pelos testes OECD 202 ou 203, onde mais de 50 por cento dos organismos vivos tem que sobreviver a uma dosagem de fluido hidráulico de 1000 partes por milhão.
- Nível médio de toxicidade: o nível médio diz respeito uma porcentagem menor que 50 por cento de organismos vivos após o teste para uma dosagem de 1000 partes por milhão de fluido hidráulico.

#### **5.4.5 Atividade 1.5 Estabilidade ao envelhecimento (oxidação, hidrólise e anti-desgaste)**

Nesta atividade tem-se o objetivo de definir os níveis de estabilidade ao envelhecimento em função da estabilidade química à oxidação,

estabilidade à hidrólise e ao desgaste. Os 3 parâmetros são definidos através das 3 tarefas a seguir:

#### *Tarefa 1.5.1. Avaliar a estabilidade à oxidação*

A estabilidade química à oxidação é a capacidade do fluido para resistir à degradação química por reação com o oxigênio atmosférico. É um critério extremamente importante quanto à qualidade dos fluidos hidráulicos, particularmente em aplicações de alta temperatura. Ela determina diretamente a resistência ao envelhecimento. A degradação dos fluidos hidráulicos por oxidação pode resultar em aumento significativo da viscosidade, o desenvolvimento de ácidos orgânicos corrosivos, e de lacagem de superfícies críticas por produtos de oxidação resinosos. Para evitar tais ocorrências, são também empregados aditivos destinados a isolar as partículas de água das superfícies metálicas e inibidores de ferrugem. Baixa estabilidade à oxidação é um dos principais fatores que dificultam a aceitação da indústria de lubrificantes e fluidos em geral de base de óleos vegetais.

Uma especificação ideal para os fluidos é se basear em informações retiradas de testes de estabilidade à oxidação como:

- Teste de estabilidade à oxidação RBOT (ASTM D2272)
- Teste de estabilidade à oxidação Tost Dry (ASTM D943)
- Teste de estabilidade à oxidação Tost Dry modificado (ASTM D4310).

Como a maioria dos catálogos de fabricantes de fluidos biodegradáveis não fornece informações com relação a testes de oxidação, limitando-se a informações superficiais sobre o nível de oxidação, a regra para esta tarefa é definida em função do conhecimento heurístico.

A partir de várias referências bibliográficas (ver apêndice A), pesquisas e estudos realizados sobre a estabilidade à oxidação de fluidos biodegradáveis como o apresentado no capítulo 3, assim como através do conhecimento adquirido por meio de fabricantes e especialistas de fluidos biodegradáveis, foi definida a classificação do nível de estabilidade à oxidação para cada tipo de fluido biodegradável a seguir:

- Nível alto de estabilidade à oxidação: Fluidos tipo HEES, HEPG, HEPR.
- Nível médio de estabilidade à oxidação: Fluidos tipo HETG.

#### *Tarefa 1.5.2 Avaliar a estabilidade à hidrólise*

Estabilidade hidrolítica indica o grau em que um fluido tende a desenvolver acidez na presença de cobre e água a temperaturas elevadas.

O teste de estabilidade hidrolítica não apenas avalia a acidez desenvolvida pelo fluido, mas também qualquer acidez desenvolvida na presença de água. No capítulo 3 se apresenta uma análise da estabilidade à hidrólise para 3 diferentes fluidos HEES, em função de vários contaminantes como cobre, fluido mineral e a própria água.

Da mesma forma para a estabilidade à oxidação, o comportamento da estabilidade à hidrólise para fluidos biodegradáveis não está claramente definida pelos fabricantes de estes, seja em documentos técnicos ou em catálogos dos próprios fluidos. Para definir o nível da estabilidade à hidrólise dos diferentes fluidos biodegradáveis dentro da base de dados, foi usada uma classificação genérica baseada em estudos e pesquisas que mostram testes de hidrólise em fluidos comerciais. Outra fonte para basear a classificação foi a ponderação dada por parte de especialistas na área em função dos tipos de fluidos em questão. A categorização do nível de estabilidade à hidrólise dos diferentes tipos de fluido biodegradável é dada da seguinte forma:

- Nível alto de estabilidade à hidrólise: Fluidos tipo HEES, HEPG, HEPR.
- Nível médio de estabilidade à hidrólise: Fluidos tipo HETG

#### *Tarefa 1.5.3 Avaliar a propriedade anti-desgaste*

A resistência ao desgaste é a capacidade de um fluido hidráulico para reduzir a velocidade de desgaste dos contatos de limite de atrito. Fluidos hidráulicos anti-desgaste contêm componentes anti-desgaste que podem formar uma película de proteção sobre as superfícies metálicas para evitar a abrasão, arranhões e fadiga.

Para a análise do fluido hidráulico em relação às propriedades de proteção contra desgaste sem limitação dos valores de pressão é necessário o teste FZG (DIN ISO 14635-1) com o seguinte resultado: Nível de intensidade de danos  $\geq 10$ .

Utilizando dados próprios de cada fluido encontrado nos catálogos, é feita a definição do nível da propriedade anti-desgaste do fluido sendo:

- Boa propriedade anti-desgaste:  $FZG \geq 10$
- Propriedade anti-desgaste insatisfatória:  $FZG < 10$

### **5.4.6 Atividade 1.6 Relação temperatura-viscosidade**

Na primeira tarefa desta atividade são reunidas informações relativas à possível temperatura  $t_o$  do sistema hidráulico.

#### *Tarefa 1.6.1 Definir limites de operação de temperatura*

A temperatura de operação como dado de entrada do usuário é de vital importância já que durante a sistematização de projeto ajuda a identificar outros parâmetros de relevantes como a viscosidade do fluido, o uso de trocador de calor.

A temperatura de operação do sistema varia de acordo com os requisitos de trabalho. De forma geral, para centrais hidroelétricas no Brasil, a temperatura máxima recomendada em um sistema operando normalmente é de 50 °C.

Temperaturas de operação entre 50 e 90 °C são praticáveis, mas o fluido terá que ser trocado antes do tempo recomendado pelo fabricante. No limite, sistemas podem operar a temperaturas altas ( $\approx 100$  °C), mas com uma grande probabilidade de provocar uma degradação rápida no fluido, às vezes dentro de 24 horas. Fazendo uma análise nos dados de temperatura encontrados na maioria de fabricantes de fluidos biodegradáveis, estes podem operar dependendo do tipo de fluido, em uma faixa entre -30 a 90°C.

#### *Tarefa 1.6.2 Selecionar a viscosidade apropriada*

A viscosidade é a propriedade mais importante na seleção de fluidos hidráulicos. Esta propriedade afeta diretamente as características de vazão, geração de calor dentro do sistema de potência, tipo de vedação, vazamentos, entre outros.

A faixa de viscosidade admissível do sistema completo é obtida em função da faixa de viscosidade de todos os componentes e deve cumprir-se individualmente para todos os componentes.

Aos fluidos hidráulicos são atribuídos graus de viscosidade ISO com base na sua viscosidade cinemática, que por sua vez é descrita pela relação entre a viscosidade dinâmica e a densidade. A temperatura de referencia para esta designação é de 40 °C. A unidade SI oficial para a viscosidade cinemática é  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

A classificação de viscosidade ISO (ISO 3448 ou sua norma equivalente DIN 51 519) para fluidos hidráulicos industriais define 20 graus de viscosidade 2-3200  $\text{mm}^2/\text{s}$  a 40 °C. Cada série é definida pela viscosidade média a 40 °C e o desvio admissível de 10% deste valor.

Para os fluidos hidráulicos biodegradáveis é importante o comportamento da relação viscosidade-temperatura (V-T). Esta relação descreve-se por meio de um índice de viscosidade VI (ISO 2909 e ASTM D2270) qual é calculado medindo a viscosidade em função da cada temperatura.

Classe de Viscosidade ISO	Viscosidade (média) @40°C (mm <sup>2</sup> /s)	Limites de Viscosidade Cinemática @40°C (mm <sup>2</sup> /s)	
		mim.	max.
ISO VG 2	2,20	1,98	2,42
ISO VG 3	3,20	2,88	3,52
ISO VG 5	4,60	4,14	5,06
ISO VG 7	6,80	6,12	7,78
ISO VG 10	10,00	9,00	11,00
ISO VG 15	15,00	13,50	16,50
ISO VG 22	22,00	19,80	24,20
ISO VG 32	32,00	28,80	35,20
ISO VG 46	46,00	41,40	50,60
ISO VG 68	68,00	61,20	74,80
ISO VG 100	100,00	90,00	110,00
ISO VG 150	150,00	135,00	165,00
ISO VG 220	220,00	198,00	242,00
ISO VG 320	320,00	288,00	352,00
ISO VG 460	460,00	414,00	506,00
ISO VG 680	680,00	612,00	748,00
ISO VG 1000	1000,00	900,00	1100,00
ISO VG 1500	1500,00	1350,00	1650,00
ISO VG 2200	2200,00	1980,00	2420,00
ISO VG 3200	3200,00	2880,00	3520,00

Figura 38. Graus ISO VG de viscosidade cinemática (ISO 3348)

Nos diagramas V-T, a viscosidade de um fluido hidráulico é representada graficamente em função da temperatura. Estes gráficos permitem determinar a viscosidade exata ao longo de uma ampla faixa de temperaturas. Quanto maior o VI de um fluido hidráulico, menor as suas mudanças de viscosidade com a temperatura. A Figura 39 apresenta o diagrama V-T para fluidos hidráulicos biodegradáveis em base éster sintéticos com um índice de viscosidade VI entre 150 e 160.

Fazendo uma rápida comparação, fluidos em base mineral normalmente têm VI de 95-100. Fluidos hidráulicos biodegradáveis base éster sintético (HEES) têm VI entre 140 e 180, Já fluidos do tipo HEPG têm VI natural dentre 180 e 200.

Para cada um dos fluidos biodegradáveis comerciais disponíveis na base de dados para a atividade 1 estão associados os diferentes graus ISO VG de viscosidade disponíveis pelo fabricante para cada fluido.

Os graus de viscosidade de fluidos de sistemas hidráulicos empregados em aplicações industriais ou móveis estão entre 22 e 68, dependendo da faixa de temperatura de operação do sistema, assim como da faixa de operação dos componentes.

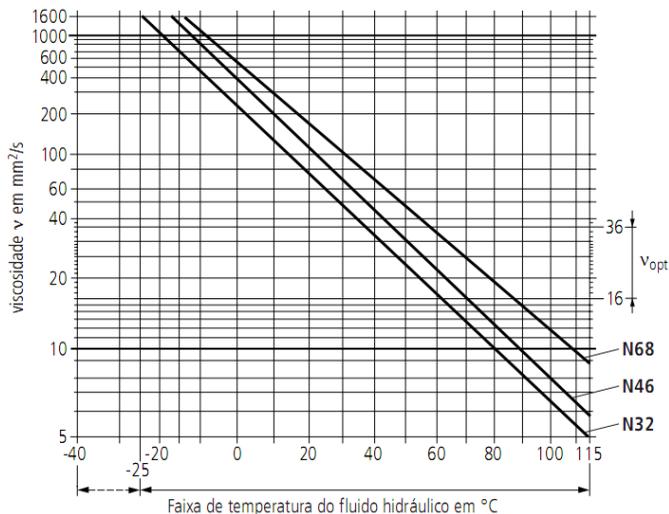


Figura 39. Diagrama viscosidade-temperatura (V-T) de fluidos hidráulicos biodegradáveis tipo HEES (Rexroth, 2010)

Nesta tarefa, são recomendados graus de viscosidade ISO VG disponíveis para cada fluido hidráulico biodegradável selecionado em função de algumas faixas de temperatura de operação inserida na tarefa anterior desta atividade. Estas faixas de temperatura-viscosidade são detalhadas a seguir:

- Se a temperatura de operação  $< 20\text{ °C}$  = Viscosidade ISO VG 22
- Se a temperatura de operação  $20\text{ °C} \leq t_{op} \leq 70\text{ °C}$  = Viscosidade ISO VG 32 e 46.
- Se a temperatura de operação  $> 70\text{ °C}$  = Viscosidade ISO VG 68.

#### 5.4.7 Atividade 1.7 Apresentação das soluções: Tipo de fluido

Esta atividade é conformada por duas tarefas interligadas.

*Tarefa 1.7.1 Comparara requisitos de usuário com base de dados – Relatório parcial Fase 1*

Na primeira parte é feita uma comparação entre a base de dados de fluidos comerciais (apêndice B) e os atributos (parâmetros do fluido) definidos ou desejados pelo usuário através das diferentes atividades da fase1. Os fluidos que contenham atributos (características) similares (ou equivalentes) com os requisitos de projeto são selecionados.

No final desta tarefa é gerado um relatório final onde são recomendados os diferentes fluidos hidráulicos biodegradáveis selecionados, os quais são apresentados em função de parâmetros relacionados ao tipo de fluido, fabricante, grau de viscosidade, assim como recomendações á classe de pureza recomendada para partículas sólidas, rótulo ambiental entre outros.

A Tabela 6 mostra o modelo final de apresentação de cada solução que pode ser estabelecida na fase 1 (seleção do tipo de fluido biodegradável).

Tabela 6. Modelo de apresentação do relatório final (seleção do fluido)

Tipo de fluido	HEES – HETG – HEPG - HEPR
Nome comercial do fluido	Exemplos: Syntefluid N, Hydros-tar EM, BioHyd SE-S.
Fabricante	Avia, BP, Bechem, Fuchs, Omv, Panolin, Castrol, Terresolve.
Grau de viscosidade ISO VG disponíveis	22, 32, 46, 68
Compatibilidade com vedações	NBR, FPM, AU, HNBR
Certificado internacional ambiental (Rótulo)	Exemplo: Blue Angel: Alemanha, Eco-Label Trees: Europa
Limites de temperatura	No sistema e no local de instalação

#### *Tarefa 1.7.2 Recomendar compatibilidade de vedações*

A tarefa 1.7.2 a qual é verificada paralelamente á tarefa 1.7.1, é definir o tipo de vedação recomendadas para utilizar nos sistemas hidráulicos para cada tipo de fluido selecionado. Os tipos de vedações compatíveis com fluidos biodegradáveis e que podem ser usadas em componentes hidráulicos são:

- NBR: Borracha nitrílica
- FPM (FKM): Vitón
- AU: Poliuretano
- HNBR (HSN): Nitrílica hidrogenada ou nitrílica altamente saturada

A Tabela 7 apresenta a correlação entre a compatibilidade de estas vedações em função do tipo de fluido biodegradável e seus graus de viscosidade ISO VG.

Tabela 7. Compatibilidade de vedações com fluidos biodegradáveis

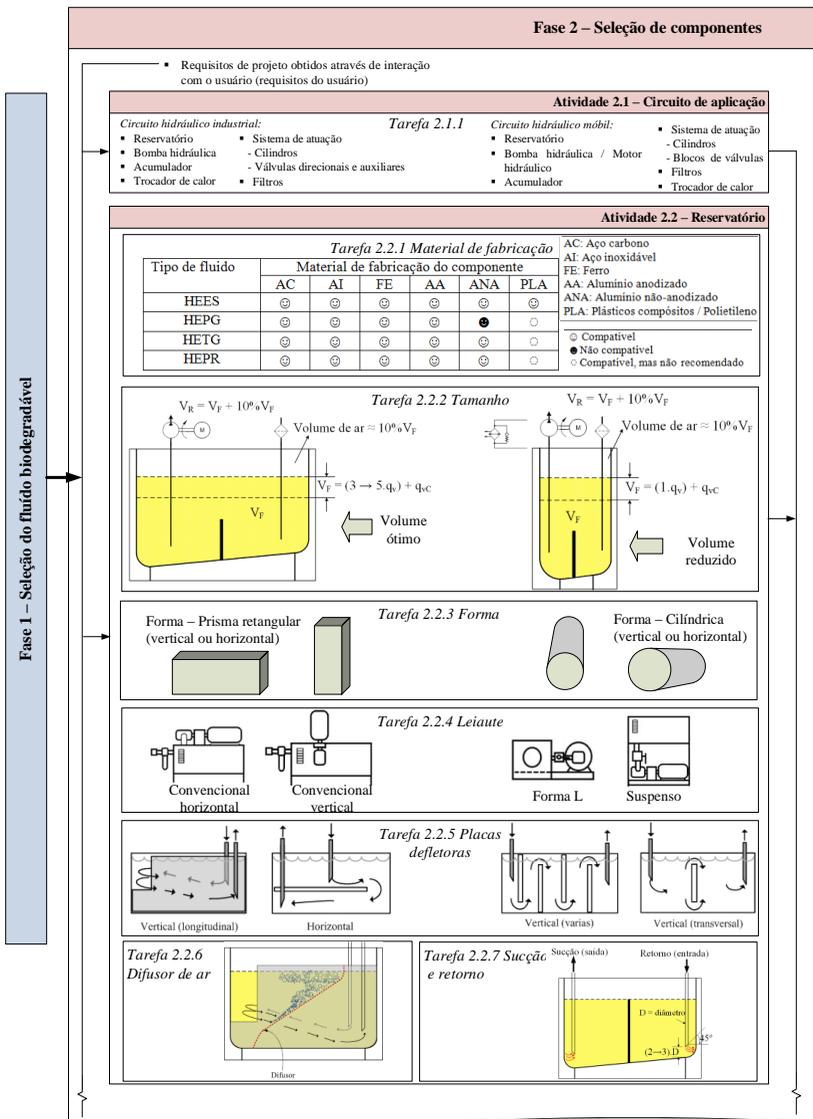
Tipo de fluido	Grau de viscosidade ISO VG			
	22	32	46	68
HEES	NBR FPM AU HNBR	NBR FPM AU HNBR	NBR FPM AU HNBR	FPM HNBR
HETG	NBR FPM AU HNBR	NBR FPM AU HNBR	NBR FPM AU HNBR	NBR FPM AU HNBR
HEPG	NBR FPM HNBR	NBR FPM HNBR	NBR FPM HNBR	FPM HNBR
HEPR	NBR FPM HNBR	NBR FPM HNBR	NBR FPM HNBR	NBR FPM HNBR

Uma vez apresentado o relatório final que define os fluidos sugeridos, assim como algumas recomendações, chega-se ao final da Fase 1 – Seleção e especificação do fluido biodegradável.

## 5.5 FASE 2 - SELEÇÃO DE COMPONENTES

Um dos propósitos do fluido hidráulico é proteger os componentes do sistema hidráulico. Os componentes mais sensíveis em todo o sistema hidráulico são a bomba, atuadores rotativos (motores), atuadores lineares (cilindros). Além disso, reservatórios, filtros e alguns sistemas que possuem válvulas proporcionais ou servoválvulas também podem ser muito sensíveis, especialmente para os contaminantes líquidos.

Esta fase fará uma revisão das considerações de projeto na seleção dos principais componentes de um sistema hidráulico. Cada componente será selecionado em função do impacto (degradação, vida útil, desempenho etc) que estes podem ter com o uso de fluidos biodegradáveis. Na Figura 40 se apresenta a estrutura da Fase 2 – Seleção de componentes, a qual é detalhada em 8 atividades, as quais são decompostas em tarefas. A seguir descrevem-se cada atividade da fase 2.



Fase 1 – Seleção do fluido biodegradável

Figura 40. Estrutura da Fase 2- Seleção de componentes (continua)

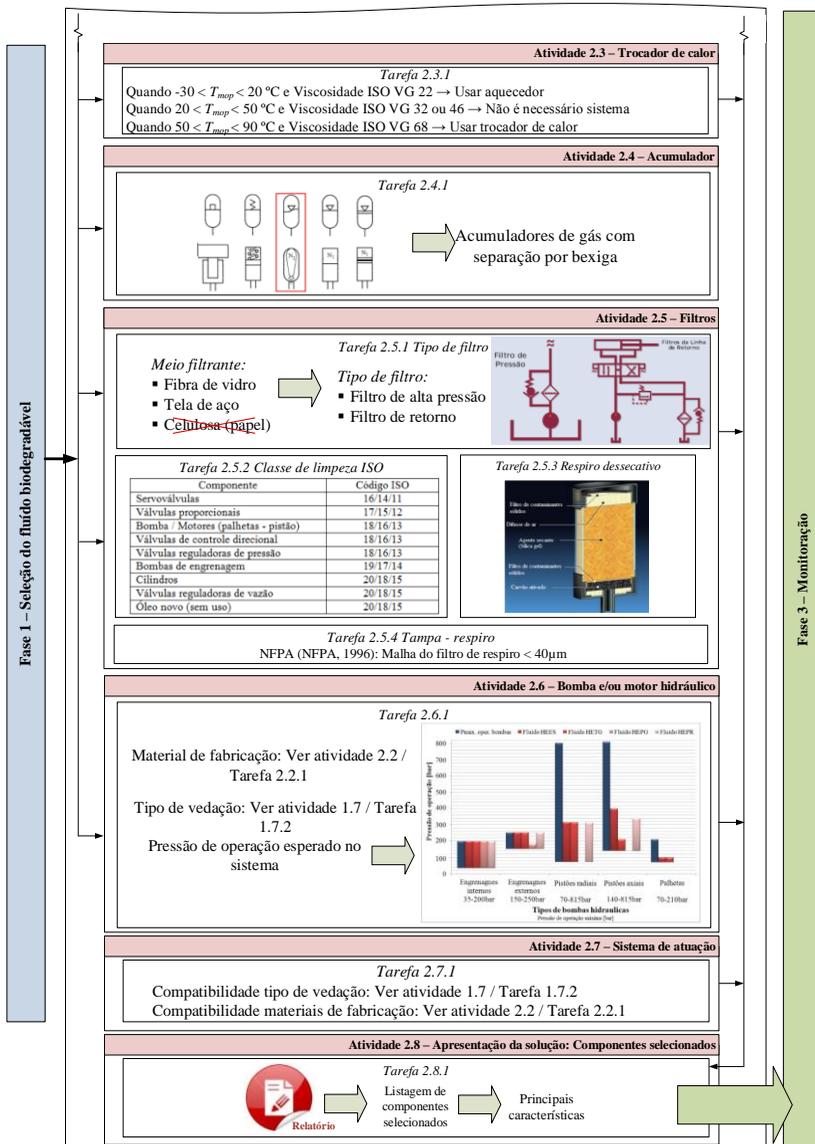


Figura 41. Estrutura da Fase 2- Seleção de componentes (continuação)

### 5.5.1 Atividade 2.1 Circuito de aplicação

#### *Tarefa 2.1.1 Listagem dos componentes principais do circuito de aplicação CA*

Esta atividade conta com uma tarefa única (2.1.1) onde é definido o circuito hidráulico (industrial ou móbil), o qual traz intrínseco a lista de componentes que serão selecionados nas atividades seguintes. A definição do circuito é obtida automaticamente em função do requisito de projeto definido na atividade 1.1 (campo de aplicação do sistema hidráulico) da fase 1.

Circuitos clássicos de aplicações industriais (ex. Figura 42) são constituídos por uma série de componentes principais, os quais são listados nesta tarefa 2.1.1. Tais componentes são:

- Reservatório
- Bomba hidráulica
- Acumulador
- Cilindro
- Válvulas direcionais e válvulas auxiliares
- Filtros
- Trocador de calor

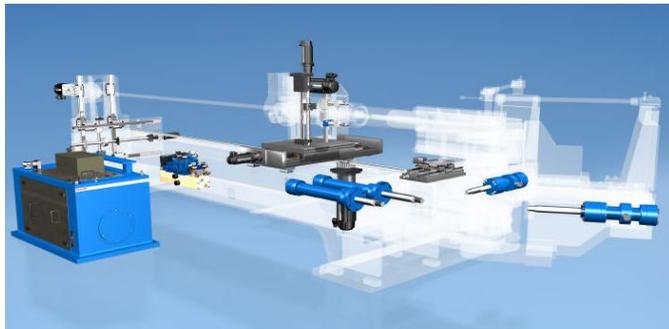


Figura 42. Circuito hidráulico de uma injetora de plástico (BOSCH REXROTH, 2012)

Já a Figura 43 apresenta um exemplo de um circuito hidráulico para aplicações móveis. De forma geral, estes circuitos contêm uma série de componentes primordiais para a operação do sistema hidráulico, os quais são listados dentro de esta mesma tarefa 2.1.1 como segue:

- Reservatório
- Bomba hidráulica
- Motor hidráulico
- Acumulador
- Cilindro
- Bloco de válvulas
- Filtros
- Trocador de calor

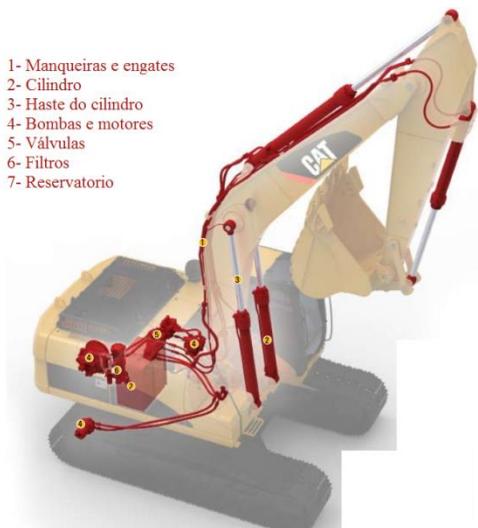


Figura 43. Circuito hidráulico móvel (CATERPILLAR, 2012)

### 5.5.2 Atividade 2.2 Reservatório

Alguns requisitos importantes como o tamanho, forma, material etc., devem ser tomados em conta na hora de definir o tipo de reservatório para que este seja capaz de desempenhar múltiplas funções como:

- Dissipação do calor provocado pelo aquecimento do fluido
- Remoção de ar não dissolvido
- Decantação de partículas poluentes
- Separação de água condensada
- Servir de suporte da bomba, motor e outros componentes de comando
- Armazenamento do fluido hidráulico

Espera-se que os reservatórios para sistemas móveis executem as mesmas funções que seus homólogos em sistemas industriais, mas normalmente sob mais adversas e menos previsíveis condições de operação. Por esta razão e tendo em conta as funções do reservatório citadas anteriormente, é importante determinar certas regras que devem ser observadas na hora da concepção do reservatório (Figura 44) a ser utilizado em circuitos hidráulicos com fluido biodegradável. Estas regras são apresentadas através de 7 tarefas referentes à atividade 2.2.

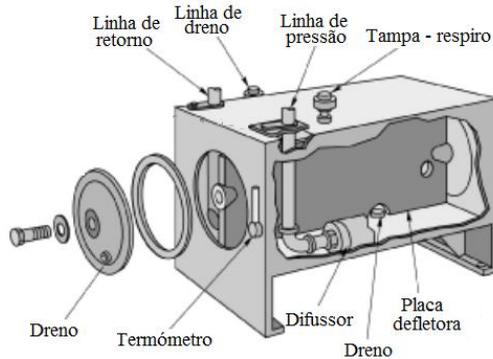


Figura 44. Reservatório hidráulico (adaptado de TRINKEL, (2012))

#### *Tarefa 2.2.1 Selecionar o material do reservatório*

Reservatórios podem ser construídos a partir de aço, alumínio ou plástico (polietileno).

Reservatórios construídos de aço carbono e aço inoxidável proporcionam o benefício de resfriamento do fluido através do processo de radiação térmica para a atmosfera externa. No entanto, os reservatórios de aço são suscetíveis a condensação da umidade e ferrugem. O alumínio é também um dissipador de calor excelente, proporcionando três vezes a taxa de transferência de calor de aço. Mas quando é não-anodizado ele reage com fluidos do tipo HEPG produzindo uma mudança no glicol (base de água) do fluido o que provoca uma degradação rápida (MRL HYDRAULICS, 2012).

Reservatórios de polietileno ou plásticos compósitos não são bons dissipadores de calor o qual traz uma mudança na hora do dimensionamento, podendo chegar a 4 ou 5 vezes a capacidade do sistema para obter uma boa dissipação do calor, ou em seu defeito, instalar um trocador de calor (MRL HYDRAULICS, 2012).

Em função dos aspectos relacionados anteriormente e da síntese de informação apresentadas em catálogos de fabricantes de fluidos biodegradáveis<sup>6</sup>, assim como de fabricantes de componentes<sup>7</sup>, as recomendações para o material de fabricação são definidas nesta tarefa 2.2.1 (ver Tabela 8).

<sup>6</sup> Avia (2012), BP (2012), Bechem (2012), Fuchs (2012), Omv (2012), Panolin (2012), Castrol (2012), Terresolve (2012).

<sup>7</sup> Donaldson (2012), Rexroth (2012), Sauer Danfoss (2013), Eaton (2012).

Tabela 8. Compatibilidade dos fluidos biodegradáveis com materiais de fabricação de componentes hidráulicos

Tipo de fluido	Material de fabricação do componente					
	AC	AI	FE	AA	ANA	PLA
HEES	☺	☺	☺	☺	☺	☺
HEPG	☺	☺	☺	☺	☹	⊙
HETG	☺	☺	☺	☺	☺	⊙
HEPR	☺	☺	☺	☺	☺	⊙

AC: Aço carbono

AI: Aço inoxidável

FE: Ferro

AA: Alumínio anodizado

ANA: Alumínio não-anodizado

PLA: Plásticos compósitos / Polietileno

☺ Compatível

☹ Não compatível

⊙ Compatível, mas não recomendado

### *Tarefa 2.2.2 Apresentar regras para o tamanho do reservatório*

O volume de fluido no reservatório deve ser suficiente e no nível adequado para atender ao sistema todo, assegurando fluido suficiente para a bomba, permitindo o descanso do fluido entre ciclos de trabalho, assim como ter um resfriamento adequado, uma fixação de contaminantes e tempo para a remoção do ar não dissolvido.

A tarefa 2.2.2 traz regras básicas do dimensionamento do reservatório para aplicações industriais e móveis empregando fluido biodegradável.

Para sistemas hidráulicos, especialmente para sistemas industriais, é regra prática de dimensionamento (Figura 45), fazer com que o volume do fluido seja entre três e cinco vezes a vazão da bomba (em litros.tempo) que alimenta o sistema. Adicionalmente o reservatório deve conter um espaço igual ou maior que 10% da sua capacidade de fluido para permitir a expansão térmica do fluido e ter uma superfície livre para a desaeração.

Essas regras, entretanto, nem sempre podem ser aplicadas. Sistemas mais complexos, com muitos cilindros e linhas de transmissão, como circuitos de máquinas agrícolas, por exemplo, devem ser estudados como casos particulares, levando-se sempre em consideração o fato de que não se deve ter óleo hidráulico a mais, nem a menos.

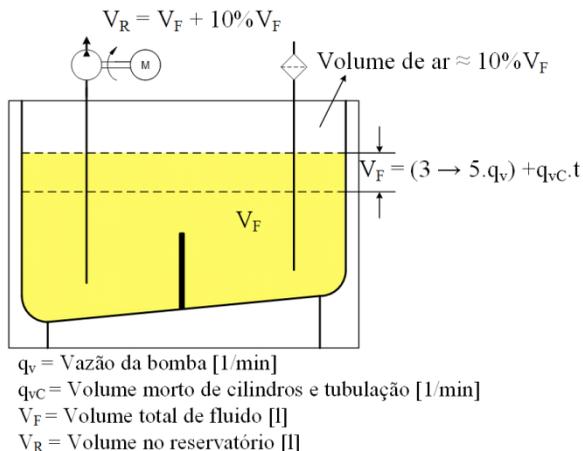


Figura 45. Dimensionamento ótimo do reservatório

Já na maioria de sistemas hidráulicos para aplicações móveis, a especificação de um reservatório reduzido (Figura 46) é necessário, o qual deve estar acompanhada por modificações que compensem a redução do volume do fluido ( $V_F = l \cdot q_v \cdot t$ ), para poder compensar a maior sensibilidade à estabilidade a oxidação e hidrólises que sofrem os fluidos biodegradáveis.

Estas modificações são:

- A necessidade de instalação de um trocador de calor devido à diminuição de área na superfície do reservatório o que traz diminuição na transferência de calor para o exterior;
- Filtros de alta capacidade para reter os contaminantes que não são decantados no fundo do reservatório;
- Utilização de difusores (ou telas) para reduzir a velocidade de retorno do fluido, ajudando a evitar a formação de espuma e da agitação, conseqüentemente ajudando a remover o ar não dissolvido no fluido.

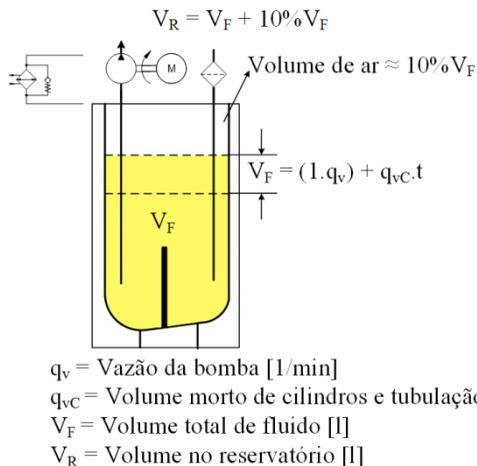


Figura 46. Dimensionamento de um reservatório reduzido

### Tarefa 2.2.3 Recomendar a forma do reservatório

Não há uma regra prática relacionada á uma forma padrão de reservatório.

Já que a dissipação de calor é feita principalmente pelas paredes laterais, um quadrado ou um prisma retangular possui a maior superfície de transferência de calor por unidade de volume, sendo uma forma ideal do reservatório alto e estreito.

Esta forma proporciona uma grande área de superfície para a transferência de calor a partir dos lados. Dependendo da aplicação, no entanto, esta forma, assim como as formas cilíndricas podem não proporcionar uma área suficiente na superfície superior para permitir o escape do ar não dissolvido no fluido. Por outro lado, a instalação do motor, bombas e blocos de válvulas, exige uma determinada superfície horizontal, o que acaba por conduzir a formas baixas e largas, sendo vantajoso para a renovação de ar não dissolvido.

Já nas instalações móveis existem normalmente eventos relacionados à variação no nível de fluido no reservatório por conta das possíveis e eventuais inclinações do veículo, é até a própria aceleração ou travagem. Por esta razão, é preferível um reservatório alto, seja retangular ou cilíndrico.

### Tarefa 2.2.4 Definir a configuração (leiaute)

Esta tarefa define quatro tipos de configurações (leiautes) do conjunto reservatório - motor - bomba tradicionalmente usado em sistemas hidráulicos empregando fluidos biodegradáveis.

- Convencional (horizontal). Conforme mostrado na Figura 47, tradicionalmente, o motor, bomba e outros componentes são montados em cima do reservatório retangular. Esta configuração permite fácil acesso á bomba, motor e outros componentes na hora da manutenção.

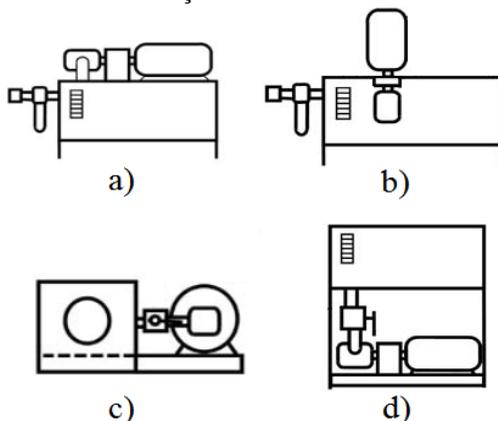


Figura 47. Leiautes de reservatórios hidráulicos. a) convencional horizontal, b) convencional vertical, c) forma de L, d) suspenso (adaptado de TRINKEL, (2012))

- Convencional (vertical). A tendência atual da concepção de unidades de potência tem o motor elétrico montado na vertical com a bomba submersa no fluido hidráulico. Economia de espaço, eliminação do vazamento externo da bomba e menos ruído são as principais vantagens de este leiaute. Para fluidos biodegradáveis é pouco recomendado, já que qualquer atividade de manutenção da bomba, o reservatório tem que ser aberto, aumentando as chances de contaminação do fluido.
- Forma de L. Esta configuração permite á bomba uma altura manométrica positiva, assim como fácil acesso aos componentes na hora de operações de manutenção.
- Suspenso. Este leiaute também proporciona á bomba uma pressão positiva ajudando a evitar a cavitação, mas pode esta mesma configuração pode causar problemas na linha de dreno devido á gravidade.

*Tarefa 2.2.5 Recomendar o uso de placas defletoras (chicanas)*

A linha de sucção da bomba deve estar na mesma extremidade do reservatório com a linha de retorno, tendo instalado entre uma placa divisória (vertical longitudinal) no fundo do reservatório e subindo parcialmente acima do nível máximo. As principais funções das chicanas são ajudar a separar o ar no fluido, aumentar a área de troca de calor do reservatório, assim como permitir ao fluido um maior tempo de circulação no interior do reservatório, evitando a turbulência e permitindo o assentamento de contaminação por partículas estranhas. Mas esta turbulência do fluido também pode promover a evaporação da água de fluido do tipo HEPG (base de água) o qual causa problemas de desempenho no processo de operação no circuito hidráulico.

Dependendo da necessidade, pode ser adotada uma configuração diferente com um maior número de chicanas verticais para forçar mais a circulação do fluido, aumentando a troca térmica por convecção. Porém se não houver uma boa troca térmica e consequente redução da temperatura do fluido, é necessário a utilização de um trocador de calor com o fim de manter a viscosidade do fluido dentro dos parâmetros operacionais aceitáveis.

A Figura 48 apresenta as quatro configurações de placas defletoras recomendadas para ser utilizadas em reservatórios contendo fluidos biodegradáveis.

#### *Tarefa 2.2.6 Recomendar o uso de difusores de ar*

Para aplicações móveis, devido à restrição de espaço e peso, usualmente são especificados pequenos reservatórios hidráulicos com altas vazões ou reservatórios profundos e com pouca largura. Nestes, o uso de um difusor pode fazer a diferença na eficiência do sistema. A instalação de um difusor reduz a velocidade do fluido de retorno, evitando problemas como formação de espuma, agitação e aeração. Da mesma forma, a vida útil da bomba também é estendida através da redução de cavitação para a entrada da bomba.

Conforme mostra a Figura 49a, basicamente o difusor pode ser uma tela com ângulo instalada no reservatório que recolhe pequenas bolhas de ar não dissolvido no fluido, as quais se juntam com outras para formar bolhas grandes que elevam facilmente à superfície do fluido.

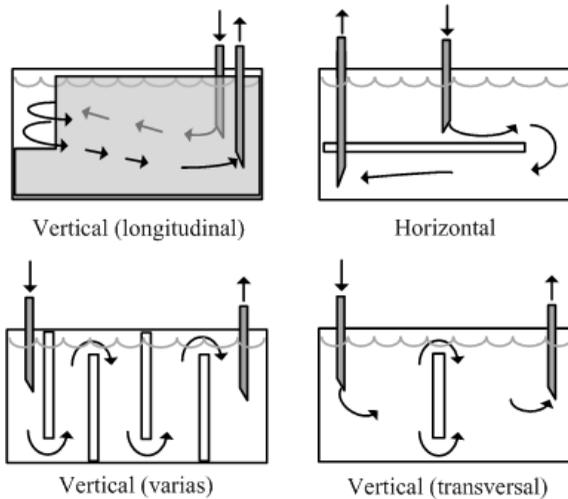


Figura 48. Configurações de placas defletoras (chicanas)

A figura 52b apresenta outro tipo de difusor de forma cilíndrica, o qual é instalado diretamente na linha de retorno (dreno) seja na posição vertical ou horizontal. Devido a tubos especiais concêntricos, projetados com furos de descarga em  $120^\circ$  ou  $180^\circ$  opostos reduz-se a aeração do fluido, a espuma e o ruído do reservatório. Este tipo de difusor deve estar sempre instalado abaixo do nível mínimo do fluido.

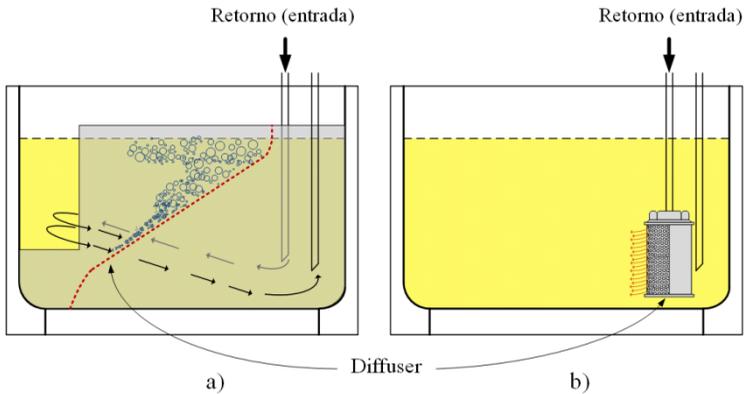


Figura 49. Difusores para remoção de ar

*Tarefa 2.2.7 Definir diretrizes para os tubos de sucção e retorno*

A linha de entrada (sucção) tanto como a linha de saída (retorno) do circuito hidráulico devem estar situadas tão distantes quanto possível uma da outras e separadas pela placa defletora, com o objetivo de conseguir uma efetiva circulação de todo o fluido (ver Figura 50). Da mesma forma, as tubulações devem estar abaixo do nível mínimo do fluido para poder reduzir a turbulência e aeração. Uma regra prática quanto ao comprimento de estas tubulações é manter uma distancia mínima ao fundo do reservatório de 2 a 3 vezes o diâmetro da própria tubulação.

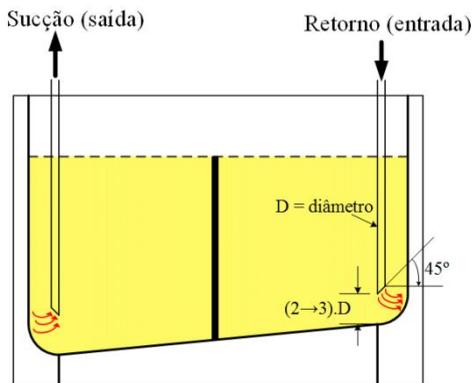


Figura 50. Regras da localização dos tubos de sucção e retorno

Outra boa prática é cortar a extremidade das tubulações em  $45^\circ$  para aumentar a secção e assim poder orientar lateralmente o escoamento em direção á parede lateral do reservatório.

Na parte externa do reservatório, as linhas devem estar o mais diretamente possível á bomba (comprimento), sem curvas ou conexões.

### 5.5.3 Atividade 2.3 Dispositivos de troca de calor e aquecimento

Nos circuitos hidráulicos produzem-se perdas de potência que levam ao aquecimento do fluido hidráulico. Este calor produzido é transferido (por radiação ou convecção) para o ambiente, pelas paredes do reservatório, tubulações e os componentes. Devido a isto, a superfície do reservatório deve ser projetada de tal forma que o calor produzido possa ser dissipado a ambiente. Isto, no entanto, não é possível na maior parte dos casos devido ao pequeno espaço disponível para a montagem (ex. reservatórios em aplicações moveis).

Assim que um sistema hidráulico é posto em operação, a temperatura do fluido aumenta progressivamente até uma temperatura constante e estável, a qual será tanto mais elevada quanto menor seja a capacidade de dissipação do calor do sistema. Quando esta capacidade se revela insuficiente é, então, necessário instalar um trocador de calor.

O trocador de calor é um equipamento destinado a promover a diminuição de temperatura do fluido garantindo a correta viscosidade auxiliando no rendimento do conjunto em um todo. Este tipicamente pode ser do tipo óleo-ar ou óleo-água (Figura 51), porem o uso do tipo refrigerante-óleo também é uma alternativa viável.



Figura 51. Trocador de calor óleo-água (HYDAC, 2013)

Já para sistemas hidráulicos que operam em ambientes com baixas temperaturas, algum tipo de aquecedor de fluido é recomendado. O aquecedor em reservatórios geralmente consiste em fios (tubos finos) resistentes de aço imersos no fluido, os quais são alimentados eletricamente.



Figura 52. Aquecedor elétrico (BIG CHIEF, 2012)

*Tarefa 2.3.1 Designar as regras para o uso de trocador de calor*

Para esta tarefa são estabelecidas regras as quais recomendam o uso de trocador de calor ou aquecedor em função da temperatura meia de operação ( $T_{mop}$ ), do tipo do fluido e da sua viscosidade:

Quando  $-30 < T_{mop} < 20$  °C e Viscosidade ISO VG 22 → Usar aquecedor.

Quando  $20 < T_{mop} < 50$  °C e Viscosidade ISO VG 32 ou 46 → Não é necessário sistema de aquecimento e/ou esfriamento.

Quando  $50 < T_{mop} < 90$  °C e Viscosidade ISO VG 68 → Usar trocador de calor.

Onde

Esta ultima regra é muito importante na hora de usar fluidos HEPG, uma vez que o seu fluido base (glicol) esta sujeito á evaporação a temperaturas de fluido maiores que 50 °C, causando alterações na viscosidade.

Temperaturas acima da normal, não só podem afetar a eficiência do sistema, mas também a operação de vedação e causar a degradação do óleo.

#### **5.5.4 Atividade 2.4 Acumulador**

Segundo Linsingen (2003), acumuladores são componentes mecânicos simples cuja função básica é armazenar energia hidráulica para a utilização como fonte eventual ou auxiliar ou principal de energia.

Basicamente, são elementos acumuladores de energia potencial, através da compressão do fluido hidráulico, para restituí-la no momento oportuno e com a rapidez desejada. O fluido entra no acumulador pressionando uma mola, levantando um peso ou comprimindo um gás. Qualquer queda de pressão na abertura fará com o fluido saia do acumulador pela reação do elemento deslocado por ele.

Os acumuladores usados em sistemas hidráulicos de potência podem ser agrupados em três categorias (Figura 53): acumuladores de peso morto, acumuladores de mola e acumuladores de gás.

O acumulador sem separação gás/fluido é o mais indicado para aplicações que exigem uma elevada resposta dinâmica. No entanto, este tipo de acumulador permite a absorção de gás pelo fluido, o que, para qualquer tipo de fluido biodegradável é impraticável, já que pode provocar problemas no sistema como cavitação, redução do modulo de compressibilidade do fluido, formação de espuma e aeração.

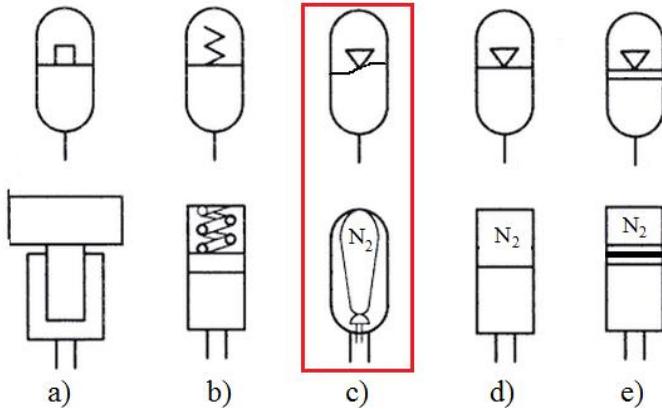


Figura 53. Tipos básicos de acumuladores, a) de peso morto, b) mola, c) gás (separação diafragma ou bexiga), d) gás (sem separação gás/fluido), e) gás (separador de pistão)

*Tarefa 2.4.1 Selecionar o tipo de acumulador*

Para aplicações de sistemas hidráulicos empregando fluidos biodegradáveis é recomendado utilizar acumuladores que mantenham a separação entre o ar (nitrogênio) e o fluido, o qual, para isto é aconselhável usar acumuladores de gás com separação por bexiga que utilizem vedações compatíveis (ver Tabela 7).

**5.5.5 Atividade 2.5 Filtros**

Como citado no capítulo 1, a experiência de projetistas e usuários de sistemas hidráulicos de potência tem evidenciado o fato de que mais de 75% das falhas de sistemas são resultantes diretas da contaminação.

Circuitos hidráulicos sensíveis são vulneráveis a uma variedade de contaminantes que resulta em diminuição da eficiência e parada do sistema hidráulico, assim como altos custos de manutenção ou reparação. A função do filtro é, então, reduzir para um nível aceitável o tamanho e a concentração das partículas contaminantes, de modo a proteger os componentes contra um desgaste prematuro. Estes filtros exigem compromissos e considerações especiais quando são especificados e adaptados aos sistemas hidráulicos com fluido biodegradável. O projetista deve levar em consideração as condições do sistema, tais como campo de aplicação, disposição dos filtros, nível de limpeza (código ISO), grau de retenção, meio filtrante e outros.

Ao longo do circuito hidráulico há varias possibilidades de localização dos filtros, os quais devem estar estrategicamente instalados para assegurar que o fluido seja filtrado adequadamente em cada fase do seu percurso através do circuito.

Esta localização ideal dos filtros no circuito hidráulico (Figura 54) está caracterizada pelos seguintes tipos de filtragem:

- Filtro na linha de sucção.
- Filtro da linha de retorno
- Filtros na linha de pressão
- Filtro fora de linha (off-line)
- Respiro de ar dessecativo
- Tampa – respiro

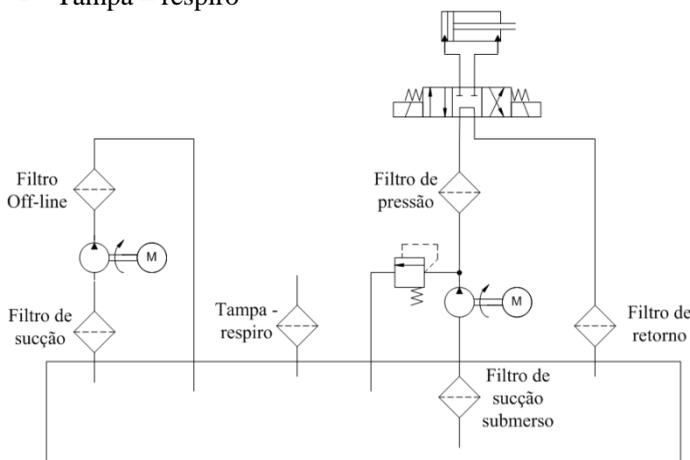


Figura 54. Localização dos vários tipos de filtros

Na Figura 55 e Figura 56 mostram-se como esses tipos de filtros podem ser usados nos circuitos hidráulicos, seja em aplicações industriais ou móveis.

Aliado o tipo de filtro (localização), campo de aplicação e nível de limpeza (secção 5.6), existe outro fator importante a ter em conta na hora de selecionar filtros, o qual é o material do meio filtrante.

O meio filtrante é aquela parte do filtro que remove o contaminante. A composição do elemento filtrante varia conforme o fabricante, mas os mais comuns incluem tela de aço, celulose, compostos de fibra de vidro ou outros materiais sintéticos.

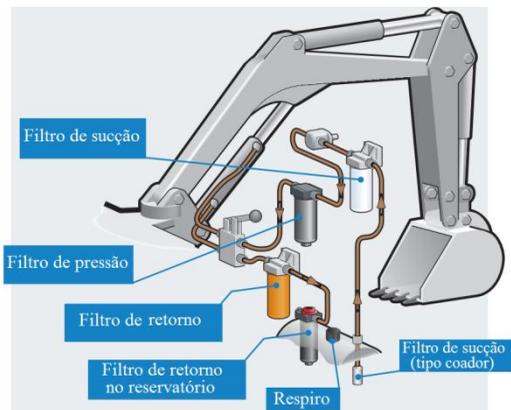


Figura 55. Disposição dos filtros em um circuito móvel (adaptado de (DONALDSON, 2012))

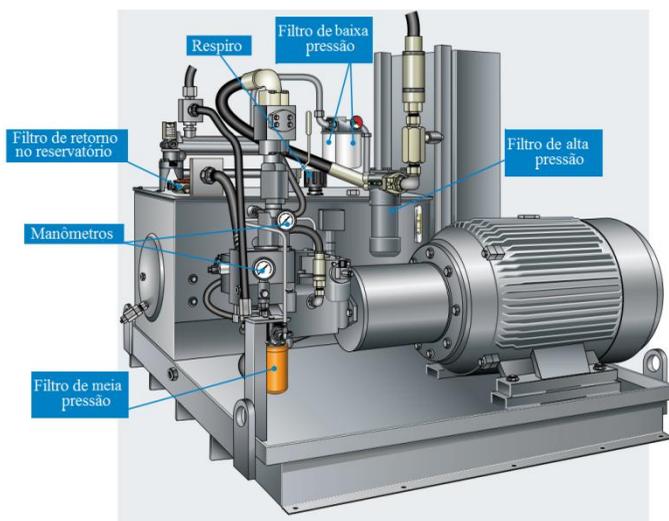


Figura 56. Disposição dos filtros em um circuito industrial (adaptado de (DONALDSON, 2012))

#### *Tarefa 2.5.1 Definir o tipo de filtro*

Esta tarefa define os tipos de filtros para ser usados em circuitos hidráulicos empregando fluidos biodegradáveis.

- Meio filtrante. Em função da compatibilidade de materiais, para fluidos biodegradáveis do tipo HEES, HEPG, HEPR e HETG é indicado o uso de fibra de vidro ou tela de aço.
- Tipo de filtro. Para os circuitos hidráulicos abertos é indicado o uso de filtros de alta pressão e/ou filtros de retorno. Esta recomendação parte do fato da dificuldade de instalar filtros de sucção com elementos filtrantes com malha muito fina o que provoca problemas de cavitação na bomba, assim como a difícil manutenção para os filtros de sucção submersos.

#### *Tarefa 2.5.2 Apresentar a regra classe de limpeza ISO*

A indicação da classe de limpeza para fluidos hidráulicos biodegradáveis é dada semelhante aos fluidos de base mineral, a qual é na forma de três dígitos numéricos de acordo com a norma ISO 4406 (ISO, 1999). Este código numérico indica a quantidade de partículas sólidas encontradas por mililitro do fluido.

Na versão atual da norma, são reportados os seguintes tamanhos de partículas:  $\geq 4\mu$  /  $\geq 6\mu$  /  $\geq 14\mu$ . O código reportado pelos contadores de partículas estão resumidos a 3 escalas:  $1^a$  /  $2^a$  /  $3^a$ .

A escala de números é alocada de acordo ao número de partículas contadas por mililitro de fluido (Tabela 9).

Já a razão beta ( $\beta$ ) também conhecida como a razão de filtragem, é a medida da eficiência de captura de partículas por um elemento filtrante. Ela é, portanto, uma razão de desempenho. Basicamente este valor indica, para um determinado tamanho de partícula, a razão entre o número de partículas de dimensão superior a essa que se encontram antes, e depois, do filtro.

$B_{50}=10$ , p.ex., significa que na entrada do filtro se encontram 10 vezes mais partículas de tamanho superior a 50 $\mu$ m, do que na saída. A

A Tabela 10 mostra alguns números de Razão Beta comuns e suas correspondentes eficiências.

Tabela 9. Classes de limpeza de acordo com a norma ISO 4406 (ISO, 1999)

Número de partículas por ml		Número de escala ISO
Mais de	Até (inclusive)	
8,000,000	16,000,000	24
4,000,000	8,000,000	23
2,000,000	4,000,000	22
1,000,000	2,000,000	21
500,000	1,000,000	20
250,000	500,000	19
130,000	250,000	18
64000	130,000	17
32000	64000	16
16000	32000	15
8000	16000	14
4000	8000	13
2000	4000	12
1000	2000	11
500	1000	10
250	500	9
130	250	8
64	130	7
32	64	6

20 / 18 / 15  
 > 4 µm / > 6 µm / > 14 µm

Tabela 10. Razão Beta/Eficiências

Razão Beta (a um tamanho de partícula estipulado)	Eficiência de separação (o mesmo tamanho de partícula)
1.01	1%
1.1	9%
1.5	33.3%
2.0	50.0%
5.0	80.0%
10.0	90.0%
20.0	95.0%
75.0	98.7%
100	99.0%
200	99.5%
1000	99.9%

A maioria de fabricantes de equipamentos hidráulicos especifica altos níveis de limpeza requeridos para seus componentes. Expor estes componentes a um fluido com níveis maiores de contaminação pode resultar em uma vida mais curta para os mesmos. Seguidamente, são listadas recomendações relacionadas ao nível de limpeza e eficiência de filtros em sistemas hidráulicos com o emprego de fluidos biodegradáveis.

- Nível de limpeza. Embora a maioria de fabricantes de componentes disponha suas próprias recomendações para o nível máximo admissível de contaminação, a Tabela 11 apresenta níveis de limpeza de acordo com a norma ISO 4406 (ISO, 1999) utilizados em sistemas hidráulicos industriais e móveis, os quais são aplicáveis também para sistemas hidráulicos com fluidos biodegradáveis
- Eficiência do filtro. Para alcançar a classe de pureza exigida em instalações que operam sob condições normais, recomenda-se o emprego de filtros com um grau de retenção de  $\beta_{10} \geq 100^8$  para o uso com fluidos de base sintética (HEES), base de água (HEPG), base vegetal (HETG) e fluidos do tipo HEPR.

Tabela 11. Níveis de limpeza recomendados para componentes hidráulicos segundo norma ISO 4406 (ISO, 1999)

Componente ISO 4406 (ISO, 1999)	Código ISO
Servoválvulas	16/14/11
Válvulas proporcionais	17/15/12
Bomba / Motores (palhetas - pistão)	18/16/13
Válvulas de controle direcional	18/16/13
Válvulas reguladoras de pressão	18/16/13
Bombas de engrenagem	19/17/14
Cilindros	20/18/15
Válvulas reguladoras de vazão	20/18/15
Óleo novo (sem uso)	20/18/15

### *Tarefa 2.5.3 Recomendar o uso de respiro de ar dessecativo*

Quando o reservatório aspira o ar, este contém vapor de água que é introduzido no sistema. As flutuações de temperatura farão com que o vapor de água condense. Essa água condensada acelerará a oxidação do

<sup>8</sup> Este valor de grau de retenção é indicado pela maioria de fabricantes de componentes hidráulicos (ex. (DONALDSON, 2012), (BOSCH REXROTH, 2012), (SAUER DANFOSS, 2012)).

fluido, o que causará danos ao sistema. Para evitar este tipo de problema, filtros de ar dessecantes são instalados no reservatório.

O filtro de ar dessecante é um dispositivo que retira contaminantes do ar e impede que excesso de umidade entre no reservatório.

Como mostrado na Figura 57, um respiro tipo típico dessecante contém dois filtros de partículas sólidas, um filtro de carvão ativado, uma camada de agente dessecante (sílica gel) e em alguns casos um difusor de ar. Em sistemas hidráulicos de potência que empreguem fluido biodegradável é primordial o uso de este tipo de filtro de ar dessecante para poder evitar a oxidação.

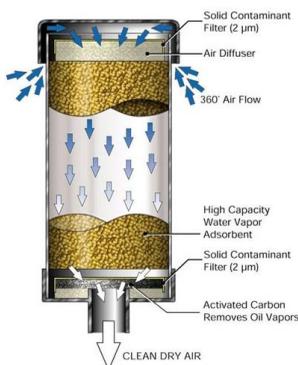


Figura 57. Detalhes de um respiro de ar dessecativo (Air Sentry®, 2012)

O tamanho do reservatório não determina o tamanho do respiro a usar e sim a vazão de ar que entra o sai do reservatório. Dois fatores criam esta vazão de ar que são as mudanças no volume do fluido e as variações da temperatura neste.

#### *Tarefa 2.5.4 Recomendações sobre o uso de tampa - respiro*

Esta tarefa traz a recomendação da inclusão de um respiro (filtro de ar) instalado no reservatório o qual é normalmente combinado com o bocal de abastecimento (tampa). A função primordial do respiro é manter a pressão atmosférica no interior do reservatório (permitir a equalização da pressão atmosférica entre o interior do tanque e a pressão do ambiente externo), esteja ele cheio ou vazio. O tamanho do respiro possui uma relação diretamente proporcional á vazão do sistema; quanto maior for esta vazão, tanto maior deve ser o respiro. Já o bocal tem a função de permitir o enchimento do reservatório com fluido hidráulico. Em seu interior há uma tela fina para impedir a penetração de corpos estranhos no reservatório.

- Segundo a norma NFPA (NFPA, 1996), recomenda-se que o filtro do respiro deva ter uma malha de no mínimo 40µm e o elemento filtrante deve estar protegido contra danos físicos, além de usar os mesmos tipos de meios filtrantes recomendados na tarefa 2.5.1.

### 5.5.6 Atividade 2.6 Bomba e/ou motor hidráulico

Atualmente, existem três tipos de bombas hidráulicas de uso mais comum; bombas de engrenagens, bombas de pistões axiais, e bombas de palhetas. Todos são bombas de deslocamento positivo e cada um tem suas próprias limitações e vantagens. Todos os três tipos de bombas são sensíveis a contaminação do fluido, alguns mais do que outros. As bombas de engrenagens são os menos sensíveis, enquanto as bombas de pistões e palhetas são os mais sensíveis.

Para isto, na seleção das bombas hidráulicas precisam ser observados pontos importantes como o tipo de fluido, faixa de pressão, temperatura mínima e máxima de operação, compatibilidade com a maior e menor viscosidade e outras não menos importantes relacionados à rotação, montagem, tipo de acionamento, vida útil, ruído e preço.

Porém, na prática, as exigências reais de estas bombas hidráulicas com o fluido biodegradável são naturalmente bem mais diferenciadas. Por isto, tendo em conta que as faixas de temperatura de operação (-33 a 90°C) de todos os tipos de fluidos biodegradáveis estão dentro das faixas de temperatura de operação de qualquer tipo de bomba, pode-se deduzir que os possíveis fatores limitantes são relacionados com:

- O material de fabricação da bomba hidráulica
- Tipo de vedação empregada na bomba
- Pressão de operação

Materiais comuns de fabricação de bombas hidráulicas e motores hidráulicos como aço e alumínio são compatíveis com todos os tipos de fluidos biodegradáveis, havendo a exceção do uso de alumínio não-anonizado com fluidos do tipo HEPG, já que esta combinação produz uma mudança no glicol (base de água) do fluido o que provoca a sua uma degradação rápida. Na sistematização, esta observação mostra-se como uma recomendação do uso de materiais de fabricação em bombas e/ou motores hidráulicos.

Com relação ao tipo de vedação empregada na bomba ou no motor, a tarefa 1.7.2 previamente define a compatibilidade das vedações a ser empregadas em componentes do sistema hidráulico.

A única tarefa de esta atividade refere-se á seleção do tipo de bomba usando fluido biodegradável em função do valor da pressão máxima de operação.

*Tarefa 2.6.1 Identificar o tipo de bomba e motor hidráulico*

Para o uso das diferentes bombas hidráulicas com os diferentes tipos de fluidos biodegradáveis não existem indicações ou recomendação específicas, já que cada fabricante, em função de testes, faz suas próprias recomendações com relação ás faixas de operação das bombas, assim como ao tipo de fluido a ser utilizado.

A tarefa 2.6.1 relaciona através da Figura 58, os valores típicos de pressão máxima de operação de diferentes bombas hidráulicas com as faixas de pressão de operação  $p_o$  dos diferentes fluidos biodegradáveis<sup>9</sup>. Para motores hidráulicos podem ser aplicados os mesmos valores. O arvore de decisão que sintetiza as regras para a seleção de bombas hidráulicas é apresentado no Apêndice C.

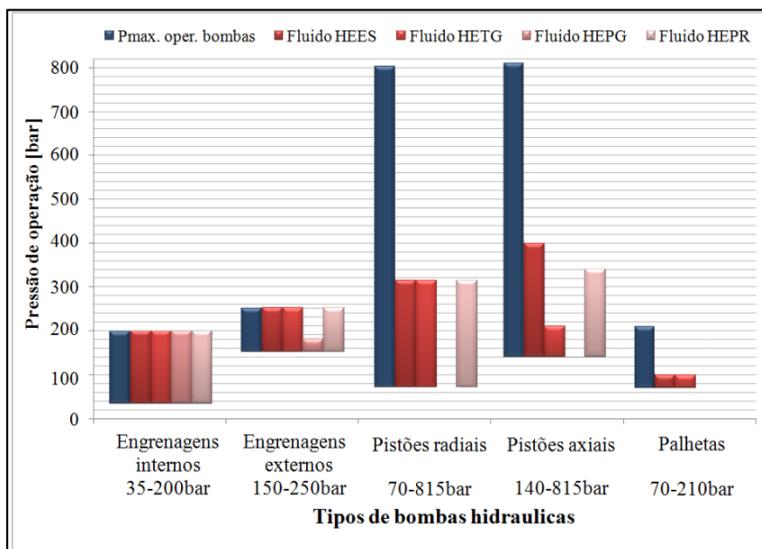


Figura 58. Pressões máximas de bombas hidráulicas vs. pressões máximas permitidas para fluidos biodegradáveis

<sup>9</sup> Estas relações foram obtidas em função de recomendações de fabricantes de componentes hidráulicos (ex. (EATON, 2012) (BOSCH REXROTH, 2013), (SAUER DANFOSS, 2013), (PARKER, 2012)).

Adicionalmente às diferentes faixas de operação de componentes hidráulicos (bombas e motores) com fluidos biodegradáveis, alguns fabricantes fornecem garantias específicas de uso de seus componentes com estes fluidos. Esta garantia que têm o objetivo de aumentar a vida útil dos componentes hidráulicos e ter um sistema operando de forma segura é fornecida aos usuários em forma de resultados de testes padronizados sobre o fluido nos catálogos técnicos dos componentes.

### **5.5.7 Atividade 2.7 Sistema de atuação**

#### *Tarefa 2.7.1 Definir diretrizes para o sistema de atuação*

Tendo em conta o uso de fluidos biodegradáveis, as únicas considerações a ter em conta da hora da seleção dos componentes do sistema de atuação como cilindros, válvulas proporcionais ou servoválvulas, blocos de válvulas (sistemas móveis) e válvulas auxiliares para uma adequada aplicação, tem a ver como os materiais de fabricação.

Com relação aos tipos de vedações que devem conter estes componentes, a tarefa 1.7.2 já traz estas relações de compatibilidade entre vedações e tipos de fluidos biodegradáveis, não sendo necessário apresentar de novo nesta seção.

Da mesma forma, a tarefa 2.2.1 apresenta as relações de compatibilidade entre materiais de fabricação de componentes hidráulicos e tipos de fluidos biodegradáveis.

### **5.5.8 Atividade 2.8 Apresentação da solução: Componentes selecionados**

#### *Tarefa 2.8.1 Gerar relatório parcial da Fase2*

A tarefa 2.8.1 apresenta um relatório parcial onde são listados os componentes selecionados em cada atividade, os quais são apresentados em função das suas principais características.

## **5.6 FASE 3 - MONITORAÇÃO DO SISTEMA**

A qualidade do fluido é de fundamental importância para maximizar a vida útil de um sistema e evitar falhas graves no equipamento ou componentes. Portanto, a monitoração da condição do fluido é fundamental além da monitoração de componentes específicos.

Além dos parâmetros físicos do fluido como umidade, condutividade, viscosidade, temperatura, entre outros, a contaminação por partículas fornece informações sobre a história de desgaste de componentes

do sistema. Assim, o fluido serve como uma referência para as condições do sistema.

No campo da manutenção mecânica pode-se afirmar que aproximadamente 70 a 80% das causas que provocam a parada de funcionamento de máquinas equipadas com sistemas hidráulicos e circuitos de lubrificação a óleo, são devidas à contaminação presente no óleo (RIEDEL and MURRENHOFF, 2009). A Figura 59 apresenta os diferentes cenários possíveis de contaminação, assim como as possíveis variáveis de monitoração

Esta contaminação que pode ser sólida, líquida e gasosa, entra no circuito hidráulico através de pontos ou aberturas que permitem seu ingresso como:

- Aberturas no reservatório;
- Pontos de vazamento;
- Vedações desgastadas;
- Respiros inadequados;
- Abastecimentos sem a devida precaução;
- Instalação de componentes com contaminação excessiva para o sistema;
- Lavagens externas de equipamento;
- Vazamentos internos de trocadores de calor e fluidos de processo.

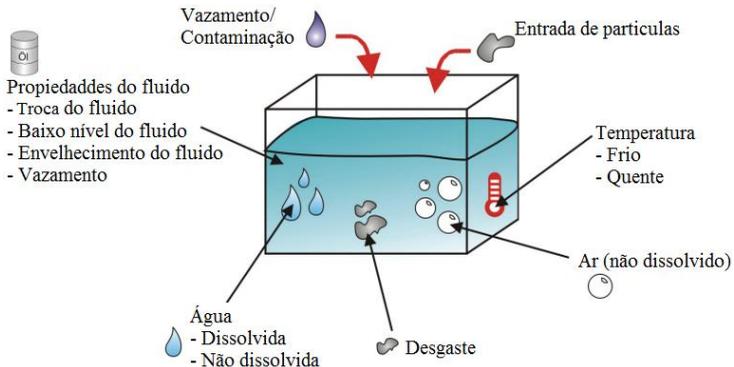


Figura 59. Diferentes condições e definições no fluido. Adaptado de Riedel and Murrenhoff (2009).

Além do ingresso indesejado vindo do meio externo, a contaminação também pode ser gerada internamente no circuito de óleo em função dos mecanismos de desgaste que ocorrem no interior dos com-

ponentes como bombas, válvulas de controle, direcionais, de ajuste, mangueiras, atuadores e mancais. Isso faz com que além da contaminação sólida, a contaminação líquida provocada pela água sejam as mais críticas, uma vez que a maioria dos fluidos hidráulicos são ainda de base mineral.

Na Figura 60 apresenta-se a estrutura da Fase 3 – Monitoração do sistema, a qual é detalhada em 2 atividades, as quais são subdivididas em tarefas. A seguir descrevem-se cada atividade da fase 3.

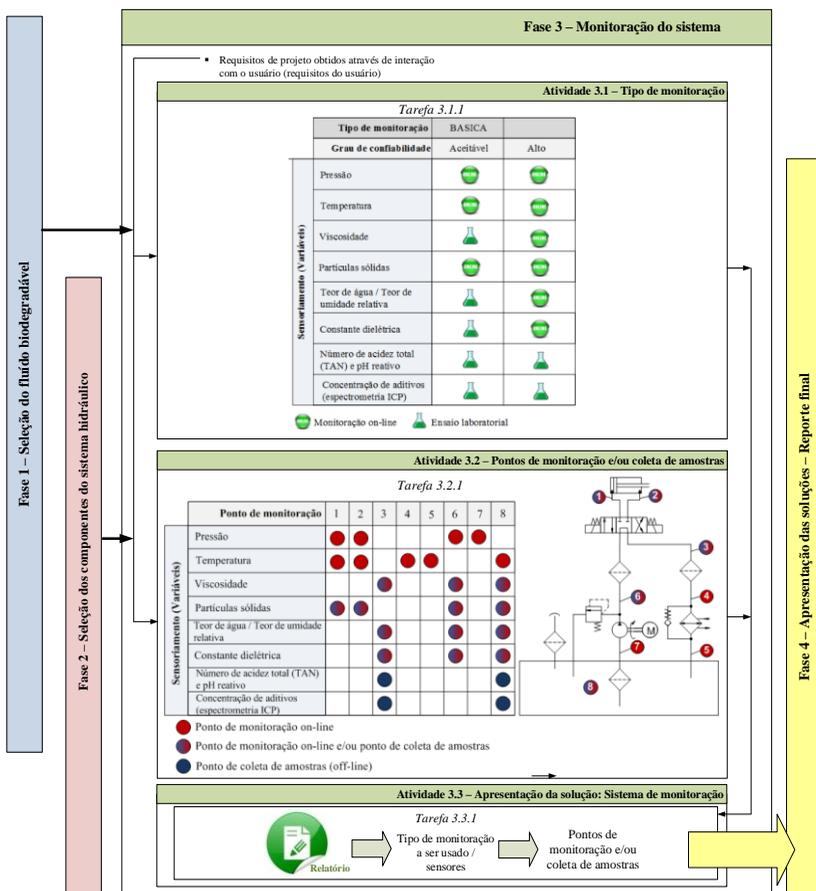


Figura 60. Estrutura da Fase 3 - Monitoração do sistema

### 5.6.1 Atividade 3.1 Tipo de monitoração

Para um desempenho ótimo de todos os componentes hidráulicos, várias propriedades físicas e químicas do fluido hidráulico têm que estar dentro das especificações ótimas de operação. No entanto, estas propriedades são suscetíveis a mudanças durante a utilização no sistema hidráulico. Envelhecimentos do fluido por contaminação por água, fluido mineral ou partículas de desgaste pode causar uma degradação no fluido e, por conseguinte diminuição no desempenho.

O fluido hidráulico é normalmente trocado em intervalos fixos, com base na experiência ou com base nas especificações do fabricante ou em manutenção preditiva baseada no tempo. Mas para ter certeza da condição do fluido, têm-se a abordagem clássica de levar amostras para análise laboratorial em intervalos de tempo regulares. Ali, os parâmetros como viscosidade, aditivos, acidez e contaminação por água ou partículas sólidas são determinadas. Isto permite avaliar o estado do fluido e sugerir medidas de manutenção, incluindo uma troca, se necessário. No entanto, essa análise de laboratório não é barato. Portanto, é apenas generalizado para equipamentos com grande volume de fluido e/ou de equipamentos onde a mais alta confiabilidade é exigida. Mas, mesmo assim, continua a haver uma diferença de tempo entre os últimos resultados de laboratório e estado do fluido real.

Devido a isto, outra abordagem de monitoramento é aplicada, o chamado monitoramento “on-line”, o qual oferece uma redução no custo global de manutenção indicando o ponto otimizado da curva de falhas, permitindo maior utilização do componente e dos fluidos. O monitoramento pode ser feito com baixo custo de instalação através de sensores simples ou combinados, que oferecem mais de uma informação em um único instrumento ou em um único ponto. A antecipação na obtenção da informação de uma possível anomalia no fluido permite a rápida ação da manutenção de forma eficaz, reduzindo assim os custos, pois é possível a implantação de alarmes nos comandos dos equipamentos, permitindo até mesmo o envio de sinais via e-mail ou mesmo para um celular pré-definido.

Já com relação à definição das variáveis e tipo de medição (Figura 61), existem no mercado uma série de sensores de contagem de partículas, assim como sensores de viscosidade, pressão, temperatura que contam com sistemas de medição on-line.

Os sinais de sensores a ter em conta para a estrutura de monitoração são:

- Sensores de contagem de partículas de acordo com a norma ISO 11500 (ISO, 2008) e ISO 11943 (ISO, 1999), os quais oferecem a possibilidade de medir a limpeza do fluido de forma on-line e off-line, e, portanto, avaliar o desgaste dos componentes do sistema. A especificação da distribuição de tamanho de partículas também é feita de acordo com as normas ISO mencionadas na seção 5.5.5.
- Pressão
- Temperatura
- Viscosidade
- Teor de água / teor de umidade relativa
- Constante dielétrica
- Número de acidez total (TAN) e pH relativo
- Concentração de aditivos (espectrometria ICP)
- Permissividade relativa
- Condutividade



Figura 61. Tipos de sensores

*Tarefa 3.1.1 Definir o tipo de monitoração*

Conforme ilustrado na Figura 62, esta tarefa define dois tipos de monitoração para sistemas hidráulicos empregando fluidos biodegradáveis.

Tipo de monitoração		BASICA	AVANÇADA
Grau de confiabilidade		Aceitável	Alto
Sensoriamento (Variáveis)	Pressão		
	Temperatura		
	Viscosidade		
	Partículas sólidas		
	Teor de água / Teor de umidade relativa		
	Constante dielétrica		
	Número de acidez total (TAN) e pH reativo		
	Concentração de aditivos (espectrometria ICP)		

 Monitoração on-line     
  Ensaio laboratorial

Figura 62. Tipo de monitoração

- Monitoração básica (off-line). Este tipo de monitoração é baseado em dois grupos de sensoriamento. O primeiro grupo é formado por sensores (on-line) os quais coletam variáveis primordiais que descrevem a condição básica do fluido. Estes são sensores de pressão, temperatura e contagem de partículas sólidas. O segundo grupo está em função do análises laboratorial em intervalos regulares <sup>10</sup> de amostras de fluidos coletadas acordo a norma ISO 4021 (ISO, 1992) com o objetivo de determinar parâmetros importantes da qualidade e desempenho

<sup>10</sup> O intervalo do análise laboratorial é comumente especificado pelo fabricante do fluido. Dependendo do análise e do tipo de fluido, em alguns casos é necessário análises cada 500 horas ou menos.

do fluido como o teor de água, viscosidade, constante dielétrica e outros.

- **Monitoração avançada (on-line).** Em contraste com amostras de fluido off-line, o monitoramento on-line permite uma contínua monitoração da condição do fluido e ao mesmo tempo dos componentes do sistema prevendo falhas de forma mais rápida. O uso de este tipo de monitoração não tem o objetivo de eliminar as análises de laboratório, mas sim para informar imediatamente qualquer alteração mais significativa na tendência observada através de análises periódicas, promovendo assim, maior confiabilidade ao processo. Com mostra a Figura 62, este tipo de monitoração provê um maior numero parâmetros de forma on-line para acompanhar a condição do fluido. Ensaios de laboratório como TAN e ICP são efetuados para complementar o mapeamento das propriedades e desempenho do fluido.

### 5.6.2 Atividade 3.2 Pontos de monitoração ou coleta de amostras

Atualmente a maioria de estes sensores podem ser instalados praticamente em qualquer ponto do circuito, oferecendo a leitura “on-line” através de recursos auxiliares que permitem a aquisição de dados onde normalmente somente seria possível através de leituras locais ou de coletas de amostras para análise externa. Esse é o caso dos sensores de contaminação sólida que exigem algumas condições mínimas de pressão e vazão, ou seja, limites operacionais definidos, assim como a estabilidade destas condições.

*Tarefa 3.2.1 Identificar os pontos de sensoriamento e/ou coleta de amostras*

Dentro de um circuito hidráulico, os possíveis pontos de monitoração da condição do fluido e de coleta de amostras para análise de laboratório são mostrados na Figura 63.

- **Ponto 1 e 2.** (entrada e saída do cilindro). Nestes pontos podem-se analisar dados de contaminantes sólidos que estão sendo gerados no cilindro ou o nível de sólidos que está passando pela válvula direcional, servoválvula ou válvula proporcional. Também se pode avaliar as condições das vedações do êmbolo do cilindro.
- **Ponto 3.** (entrada do filtro de retorno). Este ponto é muito importante para a análise de contaminantes sólidos no sistema

todo e análise físico-química, já que neste ponto é pode-se avaliar o fluido depois de passar por todo o circuito hidráulico e antes de passar pelo filtro de retorno.

- Ponto 4. (saída do filtro de retorno e entrada do trocador de calor). Monitoração da temperatura do fluido de retorno do sistema. Dados retirados nos pontos 3 e 4 servem para avaliar a eficiência do filtro de retorno.
- Ponto 5. (saída do trocador de calor). Este ponto é estratégico para analisar a temperatura do fluido que entra no reservatório. Dados tirados dos pontos 3 e 5 permitirão avaliar a eficiência do trocador de calor.
- Ponto 6. (saída da bomba). Ponto importante para monitorar a eficiência da bomba (pressão e vazão). Dados adquiridos neste ponto indicam diretamente o nível de desgaste da bomba. Junto com o ponto 7, pode-se indicar o nível de degradação dos componentes da bomba.
- Ponto 7. (entrada da bomba). Neste ponto de sensoriamento pode-se detectar aeração e cavitação na bomba. Se a bomba encontra-se fora do reservatório pode-se medir a pressão de alimentação da bomba, assim como também o nível de contaminação e a temperatura do fluido que alimentam a bomba.
- Ponto 8. (reservatório). Ponto de monitoração mais importante. Coleta de amostras para ensaios (on-line ou off-line) das propriedades físico-químicas do fluido, como formação de espuma ou bolhas, envelhecimento e a quantidade de ar ou água dissolvido no fluido.
- Pontos 1,2, 3, 6 e 8. Pontos recomendados para a obtenção de amostras para ensaios laboratoriais. Estes pontos são definidos na norma ISO 4021 (ISO, 1992).

### 5.6.3 Atividade 3.3 Apresentação da solução

#### *Tarefa 3.3.1 Gerar o relatório parcial da Fase 3*

Nesta tarefa é gerado um reporte parcial o qual apresenta de forma integrada o tipo de monitoração definido, os parâmetros (sensores) encarregados de mapear a condição e desempenho do fluido e os pontos recomendados onde estes sensores podem ser instalados, assim como os pontos ao longo do sistema hidráulico onde podem ser coletadas amostras do fluido para ensaios de laboratório.

Sensoriamento (Variáveis)	Ponto de monitoração	1	2	3	4	5	6	7	8
	Pressão	●	●				●	●	
	Temperatura	●	●		●	●			●
	Viscosidade			●			●		●
	Partículas sólidas	●	●				●		●
	Teor de água / Teor de umidade relativa			●			●		●
	Constante dielétrica			●			●		●
	Número de acidez total (TAN) e pH reativo			●					●
	Concentração de aditivos (espectrometria ICP)			●					●

- Ponto de monitoração on-line
- Ponto de monitoração on-line e/ou ponto de coleta de amostras
- Ponto de coleta de amostras (off-line)

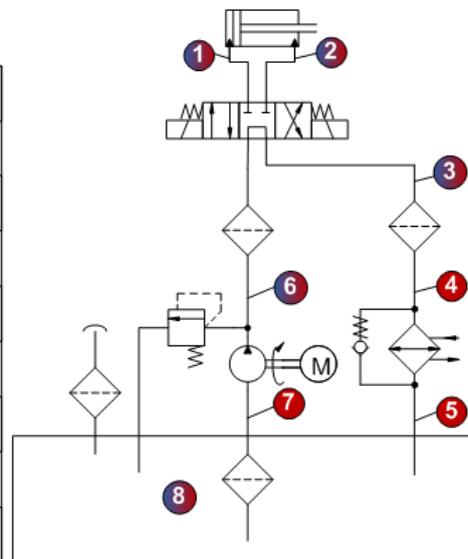


Figura 63. Pontos de monitoração on-line e/ou coleta de amostras de laboratório

## 5.7 FASE 4 – APRESENTAÇÃO DE SOLUÇÕES – RELATÓRIO FINAL

### 5.7.1 Atividade 4.1 Relatório final

Esta atividade tem o objetivo de registrar os resultados obtidos através das fases 1, 2 e 3. Conforme mostrado na Figura 64, esta atividade é conformada pela síntese dos relatórios parciais de cada fase somada à listagem dos requisitos de projeto definidos pelo usuário (requisitos de usuário).

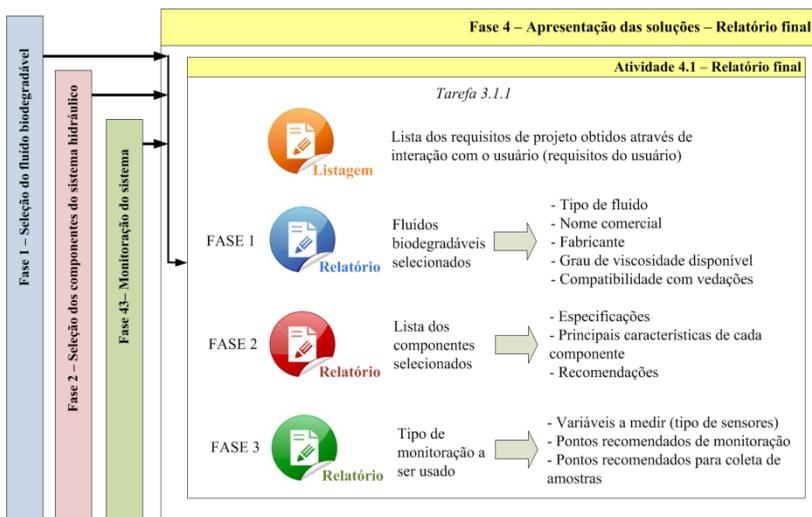


Figura 64. Estrutura da Fase 4 – Apresentação das soluções – Relatório final

## 5.8 OBSERVAÇÕES FIANIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo a estruturação da sistematização de projeto para sistemas hidráulicos empregando fluidos biodegradáveis SHBIO foi apresentada. O conhecimento adquirido de diferentes fontes (especialistas, fabricantes de componentes hidráulicos e fluidos, trabalhos científicos, normas) foi modelado através de regras, recomendações e tarefas com o intuito de auxiliar ao projetista durante a concepção do sistema hidráulico. A SHBIO compreende quatro fases as quais tem como resultado final a seleção de um ou vários fluidos biodegradáveis, a seleção

dos principais componentes do sistema hidráulicos, assim como a as diretrizes de monitor do sistema.

No capítulo seguinte apresenta-se a concepção do protótipo do sistema especialista, sua descrição e estrutura funcional, assim como as etapas de desenvolvimento.

## CAPÍTULO 6 PROTÓTIPO SHBIO

O objetivo deste capítulo é documentar o processo do desenvolvimento do protótipo SHBIO (sistematização do projeto de sistemas hidráulicos empregando fluidos biodegradáveis), onde são aplicados conceitos relativos aos domínios de conhecimento apresentados na sistematização proposta no capítulo anterior. Vê-se aqui a descrição e estruturação do protótipo, assim como a apresentação das etapas de aquisição e representação do conhecimento, aspectos sobre a implementação computacional, e por último, a verificação e validação do sistema.

### 6.1 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO SHBIO

#### 6.1.1 Introdução

Embora hoje em dia exista uma série de ferramentas para o projeto de sistemas hidráulicos, sejam metodologias de projeto apresentadas em trabalhos acadêmicos (ver seção 5.3) ou sistemas computacionais (software) desenvolvidos pelos próprios fabricantes de componentes hidráulicos<sup>11</sup>, estas ferramentas assumem intrinsecamente o uso de fluido de base mineral no sistema hidráulico e não tem em conta o emprego de fluidos de base não mineral. Da mesma forma, estes métodos de projeto convencionais não apresentam um claro processo de inferência, o que de modo algum é uma limitação para estes métodos. O que se deseja é explicitar as diferenças entre essas abordagens encontradas atualmente e aquelas baseadas em técnicas de IA.

Neste contexto, o protótipo SHBIO desenvolvido nesta tese difere de metodologias de projeto e ferramentas computacionais existentes nos seguintes aspectos:

- O domínio é específico, restrito ao uso de sistemas hidráulicos empregando fluidos biodegradáveis como fluido de potência, o que reduz a complexidade e esforço de implementação.
- É utilizada uma linguagem de script shell, o que permite concentrar esforços no domínio e no desenvolvimento da base de conhecimento ao invés de se ocupar da programação altamente técnica e trabalhosa dos aspectos cognitivos de SBC.
- O protótipo é capaz de guiar o usuário na tomada de decisões, assim como explicar ditas decisões, podendo ser usado como

---

<sup>11</sup> BOSCH REXROTH (2012), PARKER (2012)

ferramenta de treinamento para engenheiros com pouco conhecimento na área.

- O protótipo é capaz de propor diferentes soluções preliminares para um mesmo conjunto de requisitos de projeto
- O processo de desenvolvimento do protótipo tem por base o modelo incremental, ajudando à validação funcional do protótipo por estágios, assim como na modificação do protótipo.

### 6.1.2 Funções

As funções do protótipo SHBIO se referem às suas capacidades. Na presente versão, suas principais funções são:

- a) Auxiliar ao usuário na seleção e/ou especificação do tipo de fluido biodegradável a ser utilizado em um sistema hidráulico, através da análise dos requisitos de projeto iniciais (requisitos de usuário)
- b) Selecionar os principais componentes hidráulicos (reservatório, bomba, filtros, etc) através de uma serie de recomendações feitas ao usuário.
- c) Definir diretrizes para a monitoração da condição e desempenho do fluido biodegradável.
- d) Recomendar ao usuário ou projetista, diferentes pontos de monitoração e/ou coleta de amostras do fluido. Esta função é complementada através da apresentação de diagramas hidráulicos com a demarcação de ditos pontos de monitoração.
- e) Explicar as soluções encontradas
- f) Apresentar um relatório final das soluções por meio da geração de arquivos HTML, contendo as informações descritas nos itens a), b), c) e d).

### 6.1.3 Entradas do sistema: requisitos de projeto

Os elementos de entrada podem ser representados por um conjunto de informações necessárias ao processo de tomada de decisão da seleção do tipo de fluido biodegradável, seleção dos componentes e definição do tipo de monitoração. As entradas definidas para o protótipo são:

- Campo de aplicação;
- Interação efetiva ou contato direto do fluido biodegradável com água ou outros tipos de fluidos;
- Preferência pelo uso de fluidos biodegradáveis com selo ecológico internacional;

- Características de biodegradabilidade e ecotoxicidade desejadas;
- Características das propriedades de envelhecimento do fluido desejadas (Oxidação, hidrólises, propriedades anti-desgaste);
- Temperatura média de operação esperada no sistema;
- Material dos componentes hidráulicos (compatibilidade);
- Leiaute da unidade de potencia desejado (Bomba/motor/reservatório);
- Preferência pelo uso de placas defletoras no reservatório;
- Pressão de operação esperada no sistema;
- Tipo de método de monitoração esperado no sistema hidráulico.

#### 6.1.4 Saídas do sistema

Os elementos de saída representam a composição das funções atendidas pelo sistema especialista. Neste caso, a função de saída está representada em um relatório final estruturado em 3 fases. A primeira fase fornece um conjunto de diferentes fluidos biodegradáveis selecionados. Cada fluido selecionado é detalhado por meio das suas características específicas como:

- Tipo de fluido (HHES, HEPG, HETG ou HEPR).
- Nome comercial do fluido.
- Fabricante.
- Grau ISO VG de viscosidade disponíveis no mercado.
- Compatibilidade com vedações.
- Limites de temperatura no reservatório e no local de instalação do sistema hidráulico.
- Certificação ambiental.

As saídas relacionadas à segunda fase estão relacionadas às recomendações e seleções dos principais componentes do circuito hidráulico, as quais são:

- Circuito de aplicação (lista os principais componentes do circuito).
- Reservatório (Material de fabricação, tamanho, leiaute, uso de placas defletoras, assim com recomendações relacionadas à forma, linha de entrada e saída, difusor e filtros de sílica.
- Recomendações sobre o uso de trocador de calor ou aquecedor.
- Recomendações sobre o uso de acumulador.
- Diretrizes sobre a filtragem no sistema hidráulico
- Definição do tipo de bomba a ser empregada.

- Recomendações sobre o sistema de atuação (cilindro, válvula)

Já a terceira fase define diretrizes relacionadas ao método de monitoração que pode ser empregado no sistema hidráulico e aos possíveis pontos de monitoração online coleta e de amostras do fluido para ensaio laboratorial.

### 6.1.5 Implementação

Para a implementação do sistema foi escolhida a ferramenta Shell CLIPS 6.3 (CLIPS, 2012), desenvolvido originalmente pelo Centro Espacial Lyndon Johnson dos EUA. Os principais motivos para esta escolha foram os seguintes:

- O CLIPS é um software de domínio público mantido independentemente.
- A ferramenta fornece as estruturas necessárias para a resolução do problema (encadeamento direto, regras, objetos, fatos).
- Confiabilidade da ferramenta, já que foi desenvolvida por um centro de pesquisa de alto nível.
- Vários trabalhos desenvolvidos com esta ferramenta na Universidade Federal de Santa Catarina mostraram resultados positivos.
- O engenheiro de desenvolvimento já possuía experiência na utilização da ferramenta.

A principal desvantagem encontrada em relação à utilização desta ferramenta diz respeito à sua interface, que apresenta apenas textos como mecanismo de interação entre o usuário e o sistema. Porém, dentro do escopo deste trabalho esta desvantagem pôde ser contornada, sem comprometer o desempenho do protótipo (ver seção 6.4).

### 6.1.6 Método de inferência

O método de inferência utilizado para o desenvolvimento do sistema foi o encadeamento direto, já que a ferramenta é um *shell* baseado na arquitetura de casamento de padrões (*pattern-matching*) (Gonzalez e Dankel, 1993), no qual o conhecimento pode ser representado na forma de regras, funções e orientação a objetos. Essa última está disponível em um módulo chamado COOL<sup>12</sup>, o qual permite a aplicação dos princípios fundamentais da orientação a objetos (abstração, herança, polimorfismo e encapsulamento).

---

<sup>12</sup> CLIPS Object-Oriented Language

### 6.1.7 Estrutura funcional

O protótipo desenvolvido neste trabalho tem sua estrutura funcional baseada fundamentalmente nos requisitos de projeto mencionadas no capítulo 5 e nas técnicas de representação do conhecimento descritas no capítulo 2.

A estrutura funcional do protótipo é apresentada na Figura 65. O usuário se comunica com o sistema através de interface própria do CLIPS. Na arquitetura proposta para o sistema SHBIO (Figura 65), a interface de entrada de dados do protótipo desenvolvido é totalmente textual: todas as perguntas são respondidas por valores ou por opções, ambas inseridas através do teclado; e, quando necessário, uma breve explicação sobre a questão está disponível para consulta em um arquivo HTML.

Os dados de entrada são os requisitos de projeto apresentados na seção 6.1.3, fornecidos pelo usuário. Tais dados são processados pelo motor de inferência contido no componente CLIPS.

A partir dos dados de entrada e do conhecimento devidamente representado e armazenado na base de conhecimento, o processo de inferência é executado até que uma conclusão seja atingida. Nesse ponto tem-se então uma solução, que é exportada pelo motor de inferência no formato HTML. Através do componente web browser, o arquivo HTML é exibido para o usuário na interface gráfica.

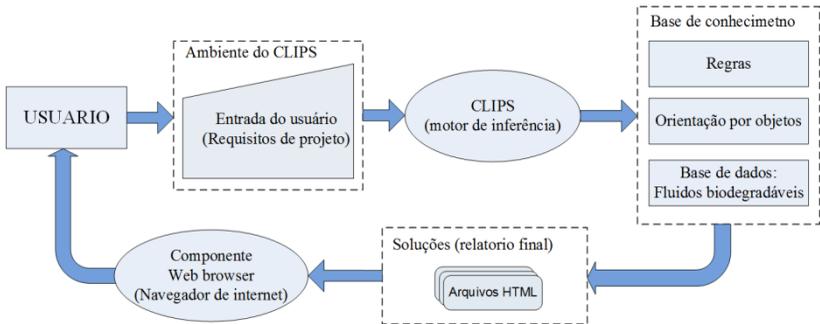


Figura 65. Estrutura funcional do protótipo SHBIO

## 6.2 AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO

Nesta etapa é de vital importância que o engenheiro de conhecimento tenha um domínio do problema e da tarefa específica antes de iniciar a etapa de aquisição do conhecimento como especialista.

No presente trabalho uma pesquisa sobre fluidos biodegradáveis realizada no Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS) - Aachen University (RWTH) – Alemanha e cujos resultados são descritos no capítulo 4 foi de vital importância para o engenheiro de conhecimento, já que permitiu a aquisição de conhecimento avançado sobre o domínio em questão.

O conhecimento adquirido para este trabalho e que está descrito detalhadamente no capítulo 5 foi obtido através das seguintes fontes:

- Investigação de material bibliográfico relacionado a sistemas hidráulicos e fluidos biodegradáveis (livros, normas, artigos científicos, projetos de pesquisa)
- Análises de catálogos e informações técnicas de fabricantes tanto de componentes hidráulicos como de fluidos biodegradáveis.
- Entrevistas estruturadas, não estruturadas e discussões do problema com especialistas.<sup>13</sup>
- Rede de intercâmbio de conhecimentos entre o Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS) - Aachen University (RWTH) – Alemanha e o Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) – UFSC – Brasil.

### 6.3 REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

Para representar os elementos envolvidos na sistematização do projeto de sistemas hidráulicos, a base de conhecimento é implementada (modelada) através de representações baseadas em orientação a objetos e regras.

#### 6.3.1 Orientação por objetos

A modelagem por orientação a objetos não só se mostra adequada para representar e manipular atributos e procedimentos (ver seção 2.5.3) como permite modelar o conhecimento dos sistemas hidráulicos de forma estruturada.

O protótipo SHBIO conta com a estrutura de classes apresentada na Figura 66.

Note que o modelo continua útil para versões futuras do protótipo, onde outros tipos de fluido hidráulico (ex. fluido mineral) ou outros componentes podem ser incluídos.

---

<sup>13</sup> A lista dos especialistas consultados está descrita na seção 5.2

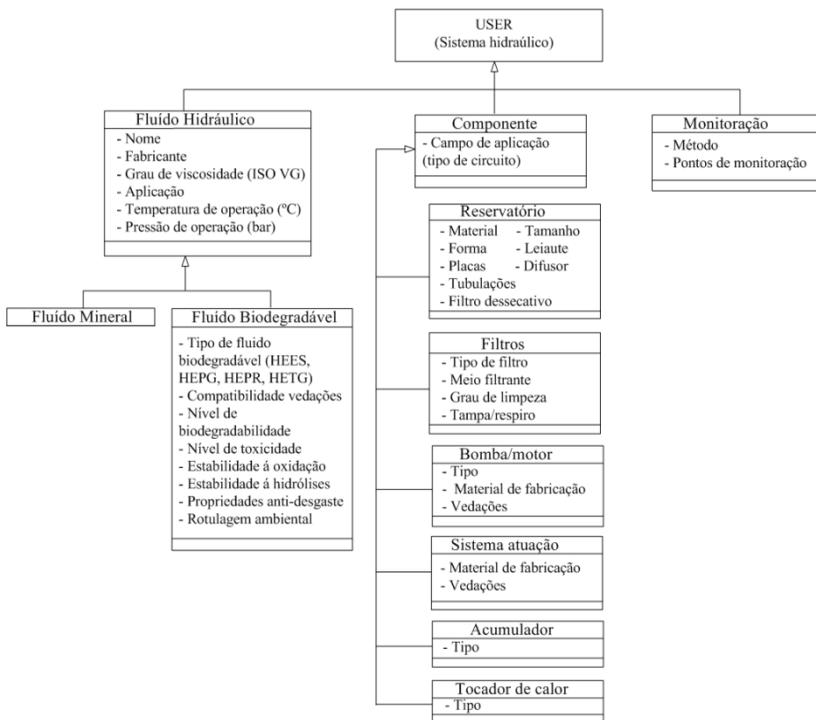


Figura 66. Diagrama de classes e subclasses do sistema

### 6.3.2 Regras

O núcleo da base de conhecimento do protótipo é representado através de um conjunto pré-determinado de regras. As regras são obtidas a partir da representação do conhecimento de especialistas mostrado no capítulo anterior. Uma possível representação de uma regra que seleciona o tipo de bomba hidráulica que possa ser empregada no sistema é mostrada a seguir.

SE (Fluido hidráulico HEPG (Poliglicol) é selecionado)

E (Pressão de operação esperada no sistema  $35 < p_o < 180$  [bar])

ENTÃO (O tipo de bomba que pode ser utilizada no sistema hidráulico é: bomba de engrenagens internas e bombas de engrenagens externas)

Da mesma maneira, varias outras regras são criadas para a representação do conhecimento adquirido, onde, devido á grande quantidade de regras e a natureza estruturada do protótipo, é essencial o uso de uma

regra central de controle que manipule fatos de controle com o fim de controlar o fluxo de informação do protótipo. Como existem cerca de cinquenta regras, elas não são todas apresentadas (as principais regras podem ser encontradas no Apêndice C).

## 6.4 INTERFACE

A interação do sistema com o usuário é realizada através da interface do sistema, a qual possui as seguintes funções básicas:

- Apresentar um questionário ao usuário para a obtenção de informações relevantes (requisitos do usuário)
- Apresentar conclusões parciais durante o questionário.
- Apresentação ao usuário as possíveis soluções do problema.

Como mencionado na seção 6.1, o CLIPS possui certa limitação em relação à interface, pois apresenta apenas a possibilidade de se apresentar textos ao usuário. Para as duas primeiras funções apresentadas acima, esta limitação não apresenta grandes problemas, pois esta interação pode ser feita de forma eficiente através de textos, conforme mostrado na Figura 67.

```

<< APPLICATION FIELD - INTERACTION (water and others fluids) >>
*****
1) Which is the application field of the hydraulic system?
Industrial application:
1. Testing and Simulation Equipment
2. Textile industry
3. Plastic industry
4. Manufacturing
5. Robotics
6. Hydroelectric power plants
7. Marine
Mobile application:
8. Mining
9. Lumber industry
10. Agricultural machines
11. Civil construction machinery
R (1 to 11):
1
-----
MESSAGE!!! - Dear user:
To most of industrial application, using HETG fluids is not recommended, because in
practice the operating requirements are often not satisfied.
Due to application field chosen, the HETG fluids will not available for following steps.
-----
Taking this into consideration:
1. Confirm the answer related to industrial application.
2. Reformulate the answers and start again the questionnaire.
R (1 or 2):
1

```

Figura 67. Interface de entrada CLIPS

Por sua vez, a apresentação da conclusão final utilizando apenas textos representa uma grande limitação na funcionalidade do sistema. Para contornar este problema, o protótipo apresenta a sua interface de saída através da geração de arquivos HTML, a qual é feita pelo protótipo através da criação de um arquivo fonte utilizando a linguagem

HTML, que é então visualizada através de navegadores de internet (Internet Explorer, Firefox ou Chrome). Para efeito de clareza, a Figura 68 apresenta uma tela do arquivo de saída gerado pelo protótipo.

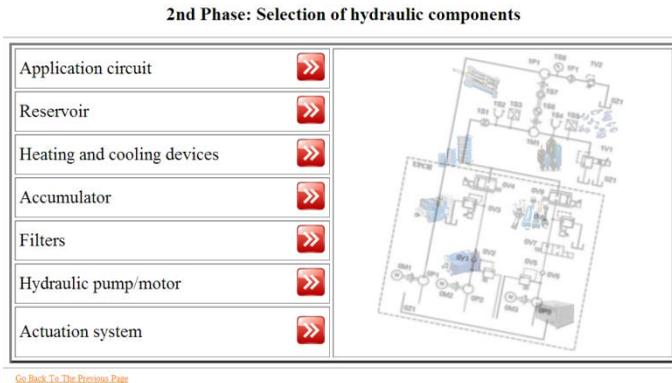


Figura 68. Visualização da interface gráfica de saída HTML

## 6.5 VERIFICAÇÃO & VALIDAÇÃO

Segundo Gonzalez e Dankel (1993) estas tarefas tem por objetivo garantir que o sistema apresente resultados corretos e que o sistema desenvolvido atenda as necessidades do usuário final. Os mesmos autores apresentam as maiores causas de erros encontrados em sistemas especialistas os quais devem ser abordadas pela verificação e validação. Estes erros são:

- Falta de correspondência entre a especificação do sistema e o que este realmente executa
- Erros semânticos e sintáticos introduzidos durante a implementação do sistema
- Representação incorreta do domínio de conhecimento

A falta de especificações e os erros de semântica e sintaxe são analisados pela verificação ao longo do ciclo de desenvolvimento do protótipo, com o objetivo de garantir que estes erros não sejam propagados durante a evolução do sistema. Já o erro de representação incorreta do domínio de conhecimento é analisado pela validação do SE.

Para a execução destes procedimentos, são definidas métricas que são utilizadas como parâmetros de avaliação do sistema com o objetivo de definir as necessidades do usuário final e o quanto o resultado é satisfatório.

## 6.5.1 Verificação do protótipo

### 6.5.1.1 Especificações do sistema

Alguns pontos relativos à verificação das especificações do protótipo do SE foram analisadas.

- Estima-se que um adequado modelo de representação do conhecimento foi implementado, através do uso de técnicas apropriadas como orientação a objetos e regras.
- A modularidade do projeto (implementação) foi garantida em razão da utilização de uma estrutura articulada baseada na técnica de orientação a objetos.
- Embora a interface disponível na ferramenta escolhida deixe a desejar em termos de representação gráfica, a opção da geração de arquivos HTML para a apresentação dos resultados (relatório final) confere ao protótipo uma interface com o usuário que corresponde às especificações desejadas.
- Foi verificado um mecanismo de explicação apropriado para os usuários finais.

### 6.5.1.2 Erros de semântica e sintática

Por ser um sistema implementado por apenas um engenheiro de desenvolvimento, a verificação dos erros de semântica e sintaxe foi feita durante a implementação do protótipo através de tarefas informais (testes permanentes) relativos ao funcionamento do sistema como:

- Verificação de erros de comunicação/interação entre os softwares utilizados (CLIPS, saída HTML).
- Verificação da funcionalidade dos atributos implementados na interface HTML com o usuário (links externos, arquivo de ajuda “help”, menus).
- Verificação de erros de ortografia e gramática nas interfaces com o usuário.

A maioria dos erros de sintaxe foi encontrada através de *bugs* (erros) apontados durante a execução do sistema. Já os erros de semântica foram descobertos da mesma forma, porém através da constatação de resultados não previstos para determinada operação do sistema.

### 6.5.1.3 Verificação de subsistema

Este método de verificação foi aplicado para o subsistema relacionado à fase 1 do protótipo (Fase 1 – Seleção do(s) fluido(s) biode-

gradável (is)) com o objetivo de testar todos os cenários possíveis deste subsistema.

Devido à complexidade (número de entradas e saídas) e, por conseguinte, do número de cenários possíveis, optou-se por testar o subsistema do protótipo usando as árvores de decisão (regras) do apêndice C. O resultado desta verificação é apresentado em uma tabela da verdade (ver Tabela 12).

Esta tabela apresenta os diferentes cenários possíveis relacionando as entradas (requisitos de usuário) e as saídas (fluidos selecionados).

Foram testados os 27 diferentes tipos de fluidos biodegradáveis comerciais disponíveis na base de dados (apêndice B), onde foi constatado a coerência e o correto encadeamento adotado no sistema, em função requisitos do usuário. Cada fluido biodegradável (filas) pode preencher de forma parcial, total ou nula a serie de requisitos definidos pelo usuário. Já estes requisitos de usuário são extraídos das respostas dadas pelo usuário a cada uma das 10 perguntas (colunas) referentes à primeira fase do sistema especialista.

Em virtude do numero reduzido de cenários possíveis, a verificação do encadeamento entre as entradas e as saídas para os subsistemas (módulos) relacionados às fases 2 e 3 do protótipo, foi feita relacionando os resultados da Tabela 12 e as soluções apresentadas (relatório final) derivadas da execução de testes estruturados no protótipo.

### **6.5.2 Validação do protótipo**

Para validar o sistema especialista, é necessário definir métricas de validação com o objetivo de estabelecer atributos que devem ser observado no sistema para que este possa ser considerado de qualidade.

A norma utilizada para definir estas métricas de validação do protótipo é a NBRISO/IEC 9126 (ABNT, 2003), a qual é uma norma ISO para qualidade de produto de software, que se enquadra no modelo de qualidade das normas da família 9000.



A Tabela 13 apresenta a descrição das métricas definidas as quais estão distribuídas em seis características principais, com cada uma delas divididas em sub-características.

Além das métricas, foram definidas metodologias de validação a ser empregadas na avaliação do protótipo. Estas metodologias foram aplicadas ao longo de 4 etapas.

Tabela 13. Métricas de avaliação do protótipo

Característica	Sub-característica	Pergunta chave
Funcionalidade	Adequação	Propõe-se a fazer o que é apropriado?
	Acurácia	Faz o que foi proposto de forma correta?
	Interoperabilidade	É capaz de interagir com os sistemas especificados?
Confiabilidade	Maturidade	Com que frequência apresenta falhas por defeitos no software?
Usabilidade	Inteligibilidade	É fácil entender o conceito lógico e sua aplicabilidade?
	Operacionalidade	É fácil operar e controlar?
	Apreensibilidade	É fácil aprender a usar?
	Atratividade	Têm uma interface gráfica atrativa?
Eficiência	Comportamento em Relação ao Tempo	Qual o tempo de resposta, tempo de processamento e velocidade na execução de suas funções?
Mantenabilidade	Analísabilidade	É fácil de encontrar uma falha, quando ocorre?
	Modificabilidade	É fácil modificar e adaptar?
Portabilidade	Capacidade para ser Instalado	É fácil instalar?

### 6.5.2.1 Validação informal

Inicialmente foram realizados testes informais, onde o engenheiro de conhecimento/desenvolvimento junto a uma equipe<sup>14</sup> com conhecimento em projeto de sistemas hidráulicos executou diversas sessões de consulta na primeira versão do protótipo com o objetivo de apurar o funcionamento do sistema. Esta validação informal foi feita através de perguntas não estruturadas relacionadas ao entendimento do sistema, clareza das perguntas e respostas, e funcionamento geral do protótipo.

<sup>14</sup> Equipe formada por doutorandos do laboratório de sistemas hidráulicos e pneumáticos LASHIP – UFSC.

Estes testes tiveram por objetivo realizar uma pré-avaliação, a fim de evitar que erros básicos ocorridos durante o desenvolvimento do protótipo sejam abordados pela validação formal. Além de auxiliar na correção de erros, esta validação permitiu ao protótipo ser avaliado com mais credibilidade na validação final.

Algumas observações foram sintetizadas dos comentários e sugestões da validação informal:

- Os resultados desta etapa do processo de validação apontaram para um percentual alto de cenários nulos (nenhuma solução encontrada). Isto trouxe à tona um nível de filtragem muito exclusivo nas arvores de decisão (regras) do protótipo.
- Permitiu-se identificar além da correção de diversos bugs, a identificação de melhorias estruturais e conceituais, bem como melhorias na formulação dos quesitos.
- A maioria dos avaliadores não tinha conhecimento específico sobre os fluidos biodegradáveis. Neste aspecto, os comentários revelaram a importância de um arquivo ou mensagens de ajuda propiciadas pelo próprio protótipo SHBIO ou acessado a partir de hiperlink ou através de um arquivo HTML.
- Foi identificada a necessidade de criação de uma interface mais explícita para a apresentação das soluções, a qual inicialmente foi apresentada na forma de texto.

### 6.5.2.2 Validação formal

Para esta etapa foi utilizado um questionário de validação (apêndice D) para analisar a estrutura do protótipo SHBIO, que engloba a clareza e a relevância das perguntas realizadas, e as respostas alcançadas pelo protótipo, em termos de completude, adequação e relevância dos resultados gerados. Da mesma forma foi avaliada a interface com o usuário, a coerência e consistência da base de conhecimento do SHBIO a partir do reporte final resultante do processo de inferência, bem como a completude dos questionamentos formulados ao usuário frente aos requisitos de projeto.

Para isto, foi definido um painel de avaliadores com uma combinação de membros (especialistas) que participaram no desenvolvimento do protótipo (ver seção 5.2) e membros externos<sup>15</sup> com conhecimentos em projeto de sistemas hidráulicos.

---

<sup>15</sup> Guilherme Brisot (Parker), Desyel Ferronato (Reivax Automação), Matheus Pacheco (Embraer), Mauro Hené (Central Hidrelétrica de Yacyretá)

Entretanto, a etapa final do processo de validação formal do SHBIO, em sua versão atual coube, em grande parte, ao especialista em fluidos biodegradáveis Dr.- Ing. Heinrich Theissen.<sup>16</sup>

Os especialistas que participaram do processo e validação tiveram a sua disposição um manual para instalação e execução do SHBIO (A-pêndice E), assim como os arquivos executáveis do sistema especialista.

Considerando que um SE é composto basicamente por máquina de inferência, interface e base de conhecimento, os procedimentos de validação utilizados estão focados nestes três aspectos. Neste contexto, a proposta do protótipo desenvolvido foi validada através do questionário sob os seguintes critérios:

- Precisão da análise
- Confiabilidade das respostas
- Expansibilidade
- Clareza das perguntas e respostas
- Objetividade das perguntas e respostas
- Funcionalidade
- Relatório final

A Tabela 14 e a Figura 69 sintetiza os resultados desta etapa de validação formal, onde cada critério de validação proposto segue uma escala de 1 a 5.

Tabela 14. Resultados da validação do SE, segundo os especialistas consultados

	<i>Especialista 1</i>	<i>Especialista 2</i>	<i>Especialista 3</i>	<i>Especialista 4</i>	<i>Especialista 5</i>	<i>Média</i>
Muito bom = 5						
Bom = 4						
Regular = 3						
Ruim = 2						
Muito ruim = 1						
Clareza das perguntas	5	5	4	3	4	<b>4.2</b>
Clareza das respostas	4	4	4	4	4	<b>4</b>
Expansibilidade	5	5	5	4	3	<b>4.4</b>
Objetividade das perguntas	3	4	3	4	4	<b>3.6</b>
Objetividade das respostas	5	4	4	4	4	<b>4.2</b>
Confiabilidade das respostas	5	5	4	5	4	<b>4.6</b>
Relatório final	5	5	5	4	5	<b>4.8</b>

<sup>16</sup> Dr.- Ing. Heinrich Theissen, após receber seu Ph.D. na RWTH Aachen University (IFAS), em 1983, sob a supervisão do Prof. Backé, atuou em várias empresas da indústria manufatureira na Alemanha e nos EUA. Em 2000, ele voltou a IFAS para apoiar o programa de lubrificantes de base vegetal do governo alemão. Atualmente, ele é diretor científico do IFAS e seus principais interesses de pesquisa estão relacionados a conceitos inovadores de conservação de energia para sistemas hidráulicos e novos fluidos de base biodegradável.

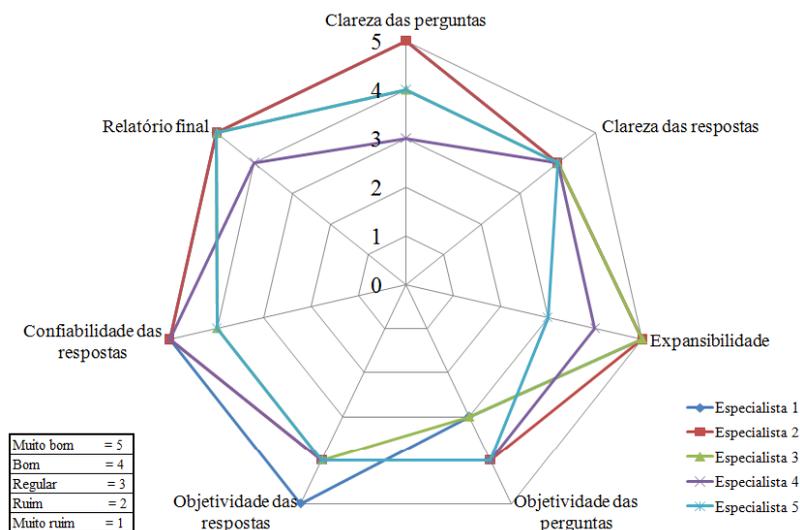


Figura 69. Representação gráfica dos resultados da validação do SE, segundo os especialistas consultados

Das respostas obtidas dos questionários e seus respectivos comentários foi possível sintetizar as seguintes observações:

Foi consenso entre os especialistas de que o SHBIO e suas ferramentas representam um trabalho inédito e que pode de fato auxiliar o processo de projeto de sistemas hidráulicos que possam empregar fluidos biodegradáveis. De forma geral, tal constatação pode ser observada através da qualificação dada para cada um dos critérios de avaliação e dos comentários da maioria dos especialistas, através dos quais é possível inferir que o SHBIO contribui positivamente para a tomada de decisão durante os processos de seleção do fluido biodegradável e dos componentes do circuito hidráulico a ser projetado.

Algumas considerações específicas, relativas à fase da seleção do fluido biodegradável, indicaram que a mesma apresenta algumas perguntas de uma forma não muito clara e com objetividade razoável. Este fato segundo alguns dos próprios especialistas foi devido ao pouco ou nenhum conhecimento sobre propriedades inerentes aos fluidos biodegradáveis, como a toxicidade, oxidação, hidrólises e até a própria biodegradabilidade. Sobre esta questão, um dos especialistas em projetos de sistemas hidráulicos expôs o seguinte:

*“As questões sobre hidrólises, toxicidade e biodegradabilidade estão muito qualitativas às respostas. O ideal seria quantificar a respos-*

*ta para que se possa ter um padrão e evitar divergências causadas por má interpretação”.*

Uma forma de atender estas observações dos avaliadores foi modificar as perguntas para uma forma mais quantitativa, assim como apresentar uma melhor explicação das propriedades dos fluidos na opção de ajuda (help).

Ainda focando a avaliação da primeira fase, alguns especialistas comentaram a importância de que a solução dos fluidos biodegradáveis seja apresentada como uma lista de fluidos comerciais, detalhando atributos importantes como o tipo do fluido, fabricante e nome do fluido.

Na atividade relacionada aos requisitos de projeto extraídos da temperatura de operação do sistema esperada, o Dr. Theissen (especialista em fluidos) expõe que recomendações de grau de viscosidade dos fluidos em função só da temperatura de operação, pode deixar uma impressão errada ao usuário de projeto, já que outros parâmetros como o índice de viscosidade do fluido e/ou pareceres dos fabricantes de bombas hidráulicas podem também definir o grau de viscosidade do fluido a ser empregado no sistema hidráulico. Neste contexto, apresentam-se algumas das colocações feitas pelo avaliador:

*“The main effect of temperature is deterioration of the fluid. Fluids with low oxidation stability may only be used at lower temperatures. Fluid recommendation based exclusively on viscosity effects leaves a wrong impression with the user. The optimum viscosity grade is only partially dependent on temperature - the viscosity at 100°C is much more important than the viscosity at 40°C which determines the viscosity grade by ISO standard”.*

Assim, esse novo conhecimento ou recomendação, junto com outros advindos da mesma sessão do especialista em fluidos, assim como dos especialistas em projeto de sistemas, são implementados no protótipo com o intuito de proporcionar-lhe mais inteligência.

Uma das críticas expostas pelas avaliações, feita pela maioria dos especialistas esta relacionada à interface do protótipo, a qual apresenta as informações de entrada em forma de texto. Algumas observações dos avaliadores que expressaram este parecer são citadas a seguir.

*“The user interface is very time consuming, difficult to overview, and tedious to use”.*

*“Há uma certa dificuldade para usuários como pouca familiaridade como software CLIPS, em meu caso entender a linearidade do programa.”*

*“No futuro, a interface de perguntas pode ser melhorada para ficar visualmente mais agradável de ser lido tal qual é o relatório final”*

Nesta questão, embora para as funções como a apresentação do questionário ao usuário e apresentação de conclusões parciais, esta limitação não apresenta problemas de desempenho do protótipo, se entendeu importante a implementação de uma interface gráfica mais intuitiva para o usuário. Por ser uma modificação importante no protótipo que demanda um conhecimento e tempo considerável, esta inserção de uma nova interface é proposta para trabalhos futuros.

De forma geral, alguns comentários feitos pelos especialistas, ressaltando características importantes do protótipo como expansibilidade, modularidade, a importância da ferramenta de ajuda e a apresentação do relatório final são apresentados a seguir:

*“O protótipo SHBIO e suas ferramentas complementares são de fácil utilização. Contribuíram para tanto, a interface intuitiva do relatório final e a inclusão do arquivo de ajuda”.*

*“It is a good idea to have an expert system to design hydraulic systems. The system presented here gives some indication how that could work. It could also be extended to normal mineral fluids at a later stage”.*

*“Estudo interessante em um mercado com futuro que ainda sofre preconceito por questões financeiras e de disponibilidade dos fluidos biodegradáveis, mas que tende diminuir frente aos apelos ambientais e de projeto de pesquisa.”*

*“O protótipo tem muito potencial de ser expandido e direcionado para aplicações mais específicas de determinados usuários ou de equipamentos a serem desenvolvidos”*

*“O relatório final é visualmente agradável de ser lido e bem didático par usuários inexperientes”.*

*“O help é bem objetivo e contribui para a resolução das duvidas, porém pode ser melhor redigido ou como no caso da toxicidade dos fluidos, o texto pode conter maiores informações”.*

### **6.5.3 Estudo de caso (teste)**

Para uma validação mais prática do sistema especialista, estruturou-se um estudo de caso (teste) aplicado a um sistema hidráulico regulador de velocidade de turbinas com similaridades comumente encontradas em algumas usinas no Brasil. A continuação é apresentado um passo

a passo da execução, avaliação e análise do resultado final do protótipo, o qual foi aplicado pelo engenheiro Fernando Amorim<sup>17</sup>.

Corretamente carregado o protótipo, a tela de apresentação do SHBIO foi apresentado ao usuário (Figura 70).

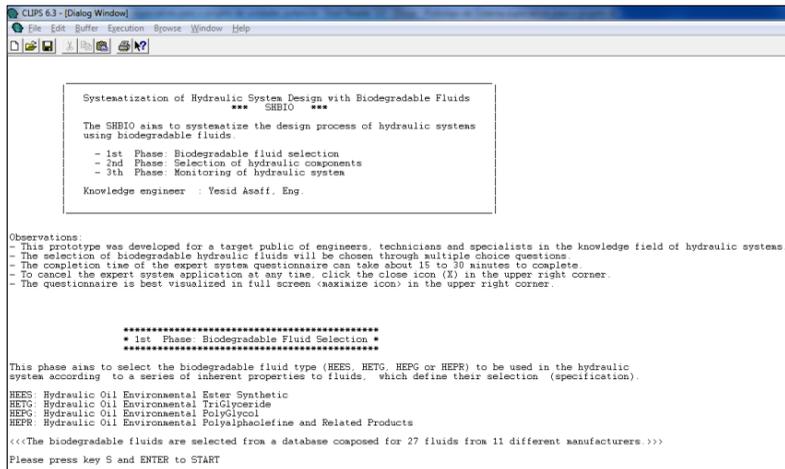


Figura 70. Tela de apresentação do protótipo SHBIO

Após a tela de apresentação, o protótipo SHBIO iniciou as perguntas do questionário referentes aos requisitos de projeto das três fases. Seguidamente todos os dados (respostas) foram inseridos pelo especialista utilizando a interface texto própria do CLIPS.

As primeiras questões abordadas referem-se ao tipo de aplicação do sistema hidráulico e condições de operação. Seguidamente, perguntas sobre as propriedades de biodegradabilidade e propriedades de envelhecimento do fluido são levantadas. Nas perguntas, o usuário teve acesso a vários textos de ajuda e confirmação de respostas (Figura 71) que o guiaram para uma melhor tomada de decisão das respostas. No final, as respostas das perguntas da primeira fase definiram os requisitos do(s) fluido(s) a ser selecionados.

Terminada a primeira fase, os próximos dados de entrada se referiram às características, parâmetros e compatibilidades dos componentes do circuito hidráulico a ser selecionados em função dos fluidos biodegradáveis selecionados na fase anterior.

<sup>17</sup> Ing. Fernando Amorim, é chefe de Engenharia da Reivax Automação S.A. Possui mais de 10 anos de experiência no projeto de sistemas hidráulicos e mecânicos para o setor de geração de energia elétrica.

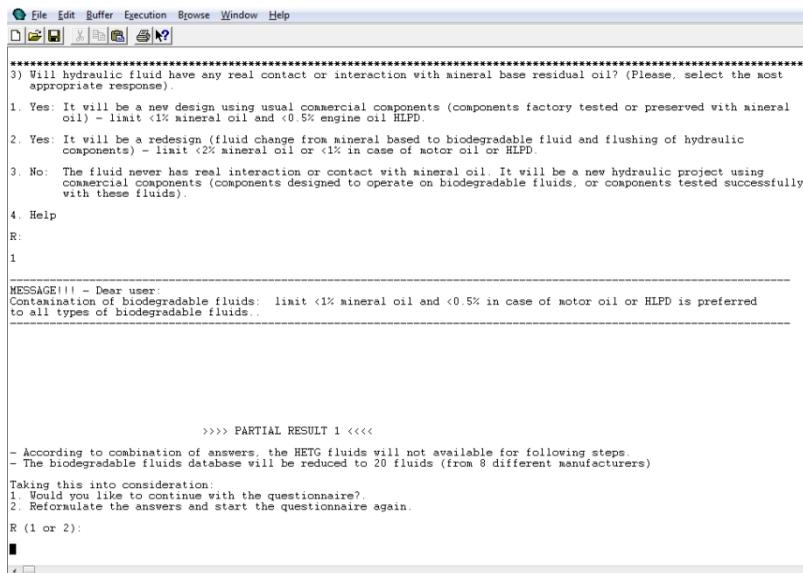


Figura 71. Tela do SHBIO (mensagem de ajuda e confirmação de respostas)

Estes requisitos de projeto foram relacionados ao tipo de material de fabricação dos componentes, tamanho e leiaute do reservatório, compatibilidade de materiais com os fluidos, assim como recomendações quanto ao uso de placas defletoras, filtros, acumuladores etc. Finalmente, questões sobre o nível (método) de monitoração desejado para o sistema hidráulico foi apresentado ao usuário.

A Tabela 15 apresenta os requisitos de projeto obtidos da sessão de execução do protótipo com o usuário.

Completado o questionário, o SHBIO informou da geração de um relatório final através de arquivos em formato HTML salvos no mesmo diretório de instalação do protótipo. Estes arquivos foram compendiados em um arquivo HTML principal chamado “FINAL\_REPORT”. A Figura 72 apresenta a tela inicial do relatório final. O usuário pôde então abrir este arquivo em qualquer navegador para ver as explicações sobre as soluções obtidas.

O protótipo por fim perguntou ao usuário se ele deseja fazer uma nova sessão de execução do SHBIO, ou se quer encerrar a seção aberta. Encerrando a seção, o sistema especialista pode ser novamente carregado seguindo os passos apresentados no apêndice E.

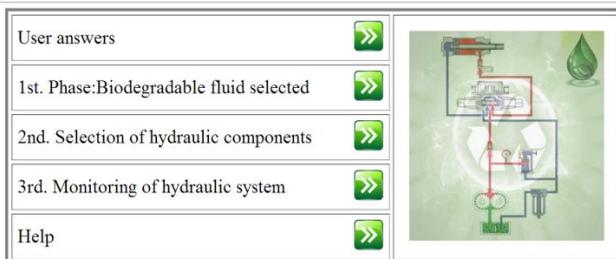
Tabela 15. Requisitos de projeto do Problema 1

Requisito	Valor
Campo de aplicação	Centrais hidrelétricas
Contato ou interação com água	Meia probabilidade
Contato ou interação com outro tipo de fluido	Meia probabilidade (projeto com componentes comerciais para uso com fluido mineral)
Preferência por certificado ambiental internacional no fluido	Não
Nível de biodegradabilidade desejado no fluido	Nível meio
Nível de toxicidade desejado no fluido	Nível meio
Nível de oxidação desejado no fluido	Nível meio
Nível de hidrólises desejado no fluido	Nível meio
Propriedades anti-desgastes desejada no fluido	Boas propriedades anti-desgaste
Temperatura de operação esperada no sistema	40 °C
Tipo de material dos componentes hidráulicos	Aço carbono
Leiaute desejado no conjunto bomba/motor/reservatório	Bomba e motor montados no reservatório (verticalmente)
Tipo de placa defletora a usar no reservatório	Um placa longitudinal
Máxima pressão de operação esperada no sistema	140 bar
Tipo de monitoração desejado para o sistema	Monitoração off-line (básica)



### Systematization of Hydraulic System Design with Biodegradable Fluids SHBIO

FINAL REPORT



Knowledge engineer: Yasid Assaf, Dr. Eng.  
yasid.assaf@posgrad.ufsc.br  
Laboratory of Hydraulic and Pneumatic Systems - LASHIP  
Federal University of Santa Catarina - Florianópolis, SC, Brazil

Figura 72. Tela inicial do relatório final

A Figura 73 apresenta parte das soluções geradas pelo protótipo para a primeira fase (fluidos biodegradáveis selecionados) através de um arquivo em formato HTML chamado de “1\_Fluids\_selected”, o qual ficou disponível na pasta de instalação para ser acessado durante toda a sessão de validação a partir do termino da fase um.

---

Fluid type: **Hydraulic Oil Environmental Ester Synthetic - HEES**  
Fluid name: HLP Synth  
Manufacturer: Panolin [For more information click here](#)  
ISO viscosity grade available: (22 32 46)  
Seal compatibility: (NBR FPM AU HNBR)  
Temperature limits: -30°C to 90°C (reservoir), < 100°C locally in the system  
Environmental certification (ecolabel): - Blue Angel: Alemanha - Korea Eco-label: Coreia do sul

---

Fluid type: **Hydraulic Oil Environmental Ester Synthetic - HEES**  
Fluid name: Naturelle HF-E  
Manufacturer: Shell [For more information click here](#)  
ISO viscosity grade available: (32 46)  
Seal compatibility: (FPM HNBR NBR AU)  
Temperature limits: -30°C to 90°C (reservoir), < 100°C locally in the system  
Environmental certification (ecolabel):No certification

---

Fluid type: **Hydraulic Oil Environmental PolyGlycol - HEPG**  
Fluid name: Hydrosynth  
Manufacturer: Avia [For more information click here](#)  
ISO viscosity grade available: (22 32 46)  
Seal compatibility: (FPM HNBR NBR)  
Temperature limits: -30°C to 90°C (reservoir), < 100°C locally in the system  
Environmental certification (ecolabel):No certification

---

Figura 73. Soluções (fluidos selecionados) geradas pelo protótipo

Assim como na primeira fase, as fases dois e três geraram relatórios que apresentam as soluções disponíveis em função dos requisitos de projeto obtidos do questionário. A Figura 74 detalha as especificações relacionadas ao material de fabricação, tamanho e leiaute do reservatório. Já a Figura 75 apresenta o nível de monitoração recomendado pelo protótipo. Adicionalmente as telas (figuras) dos arquivos HTML apresentadas nesta secção, o protótipo gerou uma serie de arquivos HTML, os quais apresentam de forma completa as soluções geradas pelo SHBIO.

RESERVOIR

Specification	Description																																		
<p><b>Manufacturing material in the reservoir</b></p> <p>These parameters that you set are applicable to manufacturing material of all hydraulic components selected in this phase, which is defined according to the compatibility with the biodegradable fluids selected in the 1st phase.</p> <p>According to biodegradable fluid selected on 1st phase, the <b>carbon steel</b> is a material compatible to use in the reservoir or any other on hydraulic component.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fluid</th> <th colspan="6">Materials manufacturing of hydraulic components</th> </tr> <tr> <th>CS</th> <th>SS</th> <th>GS</th> <th>AA</th> <th>NAA</th> <th>PLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>HEES</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>HEFG</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>HEFR</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table> <p>CS: Carbon steel                  SS: Stainless steel                  GS: Galvanized steel                  AA: Anodized aluminum                  NAA: Non-anodized aluminum                  PLA: Plastic and composite</p> <p>○ Compatible                  ● Non-compatible                  ◐ Compatible, but not recommended</p>	Fluid	Materials manufacturing of hydraulic components						CS	SS	GS	AA	NAA	PLA	HEES	○	○	○	○	○	○	HEFG	○	○	○	○	○	○	HEFR	○	○	○	○	○	○
Fluid	Materials manufacturing of hydraulic components																																		
	CS	SS	GS	AA	NAA	PLA																													
HEES	○	○	○	○	○	○																													
HEFG	○	○	○	○	○	○																													
HEFR	○	○	○	○	○	○																													
<p><b>Size of the reservoir</b></p> <p>This question solves the basic rules of dimensioning reservoir for industrial and mobile applications using biodegradable fluids. The application field that you selected on the 1st phase was a <b>Industrial</b> application field.</p> <p>⇒ For industrial hydraulic systems there is a rule of thumb, where the fluid volume is between three and five times the pump flow rate per minute that provide pressure in the system.</p> <p>⇒ For mobile hydraulic systems, the specification of a small reservoir can be required, which must be complemented for modifications that compensate the reduction of fluid volume.</p> <p>These compensations are:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Installation of a heat exchanger</li> <li>- High capacity filters</li> <li>- Use of baffles</li> </ul> <p>The rule of thumb related to sizing of reservoir for <b>Industrial</b> application field can be visualized in the figure on the right.</p>	<p><math>V_R = V_P + 10\%V_P</math></p> <p>Air volume = <math>10\%V_P</math></p> <p><math>V_R = (3 \rightarrow 5)q_p + q_{dc}</math></p> <p><math>q_p</math> = Pump flow rate [l/min]  <math>q_{dc}</math> = Dead volume in cylinders and piping [l/min]  <math>V_P</math> = Total volume of fluid [l]  <math>V_R</math> = Reservoir volume [l]</p>																																		
<p><b>Reservoir/pump layout</b></p> <p><b>Pump and motor mounted on top of reservoir (vertically):</b></p> <p>Current design trend has the electric motor mounted vertically, with the pump submerged in hydraulic fluid. This conserves space, because the reservoir can be made deeper and take up less floor space than one with traditional proportions. The submerged-pump design also eliminates external pump leakage, because any fluid leaking from the pump flows directly into the reservoir. In addition, the power unit is quieter, because the hydraulic fluid tends to damp pump noise.</p>	<p>Pump and motor mounted on top of reservoir (horizontal)                  Pump and motor mounted on top of reservoir (vertical)                  Pump and motor mounted alongside reservoir                  Reservoir located above pump and motor</p>																																		

Figura 74. Tela de solução da fase 2 do protótipo (reservatório)

3rd Phase: Monitoring of hydraulic system

Specification	Description																																																																																									
<p><b>Online monitoring point and/or sampling point for oil analysis laboratory</b></p> <p>The possible points of fluid condition monitoring and sampling point to oil analysis in the laboratory to keep the use of biodegradable fluids in hydraulic circuits are explained in the figure on the right.</p> <p>These monitoring points are based according to oil condition monitoring method which was defined in the previous question.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Measurament parameters (category)</th> <th colspan="8">Monitoring point</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pressure</td> <td>●</td> <td>●</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> <td>●</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Temperature</td> <td>●</td> <td>●</td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> </tr> <tr> <td>Viscosity</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Solid particles counter</td> <td>●</td> <td>●</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> <td>●</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Water content / relative humidity</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dielectric constant</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total number acid (TAN) / pH</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ICP-Spectrometric Analysis</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>●</td> </tr> </tbody> </table> <p>● Online monitoring point                  ● Online monitoring point and/or sampling point for oil analysis laboratory                  ● Sampling point for oil analysis laboratory</p>	Measurament parameters (category)	Monitoring point								1	2	3	4	5	6	7	8	Pressure	●	●				●	●		Temperature	●	●		●				●	Viscosity				●					Solid particles counter	●	●				●	●		Water content / relative humidity				●		●			Dielectric constant				●		●			Total number acid (TAN) / pH				●					ICP-Spectrometric Analysis				●				●	
Measurament parameters (category)		Monitoring point																																																																																								
	1	2	3	4	5	6	7	8																																																																																		
Pressure	●	●				●	●																																																																																			
Temperature	●	●		●				●																																																																																		
Viscosity				●																																																																																						
Solid particles counter	●	●				●	●																																																																																			
Water content / relative humidity				●		●																																																																																				
Dielectric constant				●		●																																																																																				
Total number acid (TAN) / pH				●																																																																																						
ICP-Spectrometric Analysis				●				●																																																																																		

Figura 75. Tela da solução da fase 3 do protótipo (tipo de monitoração)

### 6.5.3.1 Observações e recomendações do especialista (estudo de caso)

O avaliador apresentou as seguintes observações, referente á clareza e objetividade do questionário de entrada, assim como á geração das soluções do protótipo:

- Para o avaliador, as perguntas do questionário foram expostas de uma forma clara e objetiva, mas assim como os especialistas da validação formal da seção 6.5.2.3, foram encontradas dificuldades na interpretação das perguntas relacionadas ao nível desejado de biodegradabilidade, toxicidade, oxidação e hidrólises do fluido. O mesmo avaliador associou esta dificuldade ao pouco conhecimento relacionado aos fluidos hidráulicos biodegradáveis.
- Foi considerado um relatório final com soluções muito genéricas. Embora o avaliador prefere soluções mais específicas para o campo de aplicação que ele escolheu (aplicação em centrais hidroelétricas), considerou a mesma abrangência do protótipo como um prelúdio para uma serie de pesquisas relacionadas aos fluidos biodegradáveis e suas aplicações na hidráulica industrial.
- Assim como a solução concernente ao tamanho do reservatório, o especialista recomendou para trabalhos futuros a inserção de regras que dimensionamento estático de outros componentes do circuito hidráulico como a bomba, válvulas e cilindro.
- O especialista ressaltou a importância de apresentar as marcas (fabricantes) dos fluidos selecionados, mas considerou interessante a possibilidade de incluir periodicamente o preço atual dos fluidos biodegradáveis comerciais selecionados.
- De forma geral o avaliador qualificou o protótipo SHBIO como “muito bom” para uma versão inicial. A qualificação foi baseada na base de conhecimento facilmente expandida e nas soluções geradas para os requisitos de projeto submetidos, onde para o avaliador, *“isto indica um forte potencial de desenvolvimento futuro do sistema”*.

## 6.6 CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi a apresentado a descrição e o processo de desenvolvimento do protótipo do sistema especialista, assim como o processo de validação e verificação. A abordagem utilizada, fundamentada

em regras, orientação de objetos e no conhecimento heurístico dos especialistas envolvidos, associada aos cuidados e a atenção dispensada ao procedimento de verificação e validação, contribuíram para a completude e robustez da base de conhecimento e credibilidade dos resultados alcançados. Novas perspectivas de estudo foram vislumbradas e as intervenções implementadas durante o desenvolvimento aumentaram a robustez, as funcionalidades e a confiabilidade do SHBIO. O próximo capítulo encerra o trabalho, mostrando as contribuições, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



## **CAPÍTULO 7**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

No presente trabalho foi desenvolvida uma sistematização para o projeto de sistemas hidráulicos usando fluidos biodegradáveis, a qual foi encapsulada através de um protótipo de sistema baseado no conhecimento (sistema especialista). A validação da sistematização foi feita indiretamente por meio da etapa de validação do próprio sistema especialista. As contribuições e conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros são mostradas a seguir.

#### **7.1 CONTRIBUIÇÕES**

As contribuições obtidas no desenvolvimento deste trabalho são advindas de três escopos diferentes, os quais são o projeto de sistemas hidráulicos, os fluidos biodegradáveis e os sistemas especialistas.

Ficou evidenciado, ao longo deste trabalho, que a sistematização do processo de projeto de sistemas hidráulicos proposta nesta tese, não se restringe a um domínio e/ou aplicação específica na área dos sistemas hidráulicos, mas sim, trata-se de uma sistematização genérica para auxiliar no projeto de SH em qualquer tipo de aplicação, seja industrial ou móbil, aliado às soluções conceituais relacionadas à seleção dos componentes hidráulicos e ao tipo de monitoração a ser implementado no SH.

O segundo escopo é relacionado à inserção de uma nova linha de pesquisa na comunidade científica brasileira, a qual é direcionada ao estudo e aplicação de fluidos biodegradáveis para serem usados nos sistemas hidráulicos de potência.

No domínio dos sistemas especialistas para assistir o projeto de SH com o uso de fluidos biodegradáveis, o protótipo apresenta características que não são encontradas em nenhum sistema computacional para esse domínio disponível até o momento, destacando-se a geração de mais de uma solução para um mesmo conjunto de requisitos de projeto, a habilidade de explicar e descrever diferentes soluções e a forma em que foi sintetizado, inferido e apresentado o conhecimento.

#### **7.2 CONCLUSÕES**

Neste trabalho foi apresentada a estruturação do processo de projeto, incluindo a sistematização de procedimentos para especificação e análise dos requisitos de sistemas hidráulicos, com o fim de adequar e

otimizar o desempenho e a vida útil dos componentes com a utilização de fluidos biodegradáveis. A estruturação de forma prática da sistematização foi feita através do desenvolvimento de um protótipo de especialista. O protótipo foi usado para apoiar as fases de projeto conceitual e preliminar de sistemas hidráulicos.

Para o desenvolvimento desta sistematização foi realizada uma pesquisa inicial sobre o estado da arte dos fluidos biodegradáveis, suas propriedades, principais características e campos de aplicação, que estão apresentados nos capítulos iniciais do texto. Baseado nisso constatou-se no Brasil uma carência de informações científicas e de nível industrial com relação aos fluidos biodegradáveis, fato que faz deste trabalho um ponto de partida no país, na identificação de novas pesquisas e desenvolvimentos de sistemas e/ou produtos ecologicamente corretos, como por exemplo, o uso de fluidos biodegradáveis nos sistemas hidráulicos de potência.

Com o intuito de obter uma maior compreensão do estado da arte dos fluidos biodegradáveis, durante o desenvolvimento do presente trabalho foi realizada uma pesquisa no Institute for Fluid Power Drives and Controls IFAS da RWTH Aachen University – Alemanha, cujos resultados são descritos no capítulo 4. Esta etapa foi de vital importância, já que permitiu ao autor deste trabalho a aquisição de conhecimento avançado sobre o domínio em questão.

Em outro contexto, discutiu-se o processo de projeto de sistemas mecânicos, optando-se por um modelo de referência para o processo de desenvolvimento integrado de produtos no qual se identificou que a sistematização proposta deveria ser implementada na fase de projeto conceitual e na parte inicial do projeto preliminar.

Buscando modularidade e uma integração efetiva entre os diferentes campos de conhecimento, a sistematização foi dividida em 3 macro fases de projeto, as quais são: a seleção do fluido biodegradável, a seleção dos componentes e a definição de diretrizes de monitoração do sistema hidráulico. Esta decisão possibilitou um encadeamento e integração efetiva do conhecimento, unificando informações e proporcionando ao futuro projetista maior segurança na tomada de decisões para poder solucionar a maioria dos problemas que aparecem na implementação do projeto.

Fazendo um paralelo entre o fluido mineral e sistemas com fluido biodegradável, foi identificada uma lista de novos requisitos de projeto de sistemas hidráulicos, a qual forneceu uma base de conhecimento necessária para estabelecer os requisitos de projeto iniciais da sistematização.

Baseando-se no conhecimento heurístico adquirido através de especialistas em fluidos biodegradáveis e sistemas hidráulicos, recomendações de fabricantes, normas técnicas e bibliografia clássica, foi estabelecida uma série de regras, indicações e recomendações para a seleção de fluidos biodegradáveis de acordo com os requisitos de projeto inicialmente listados. Do mesmo modo, foram definidas regras e recomendações para a seleção de componentes hidráulicos em função dos requisitos de projeto, assim como dos fluidos previamente definidos.

Na terceira fase da sistematização foram definidas diretrizes para a monitoração da condição do fluido biodegradável, dos componentes e do próprio sistema em função de dois níveis de monitoração. Embora não foi calculada a confiabilidade da aplicação de um ou outro método de monitoração, através das diretrizes apresentadas se pode ter uma avaliação qualitativa de cada método em função da informação obtida das variáveis a ser mensuráveis e da demarcação (posição no circuito hidráulico) dos pontos de monitoração e coleta de amostras laboratoriais. Isso em si, já se constitui um auxílio ao projetista, principalmente, em relação da decisão do que monitorar, como monitorar e onde monitorar.

A sistematização proposta aludida no capítulo 5, na qual a geração de diferentes soluções conceituais, recomendações e diretrizes exigiu o conhecimento especializado e com forte viés heurístico, foi particularmente adequada para a aplicação da técnica de sistema especialista. Para representar o conhecimento envolvido na sistematização, a base de conhecimento do protótipo é modelada através de representações baseadas em orientação a objetos, regras e a inserção de instancias e atributos. Neste processo comprovou-se a potencialidade do método indutivo na facilidade de obtenção de regras ou arvores de decisões equivalentes que representem de uma forma clara o conhecimento adquirido.

Durante o processo de verificação e validação do protótipo foi possível constatar os aspectos de modularidade e expansibilidade proporcionada pela modelagem orientada a objeto e regras para representar o conhecimento. Estas constatações são evidenciadas pela rápida evolução protótipo. Sem comprometer a estrutura básica do conhecimento representado pela modelagem orientada a objeto, foi possível aperfeiçoar o sistema gradativamente, através de sucessivas etapas de validação informal e ajustes no protótipo, induzindo à prática da aplicação do modelo de desenvolvimento incremental.

Os indicadores de validação do protótipo SHBIO, relacionados à interface com o usuário, funcionalidades requeridas, bem como a clareza e objetividade das perguntas e respostas, apontaram uma análise positiva por parte dos especialistas que participaram do processo de validação.

Algumas mudanças sugeridas pelos especialistas puderam ser prontamente implementadas no protótipo; outras, entretanto, envolvem novas etapas de aquisição de conhecimento, e por isso foram adicionadas às sugestões para futuros trabalhos envolvendo o sistema SHBIO.

As contribuições e objetivos almejados de maneira prospectiva no Capítulo 1 foram ratificados e substanciados no transcorrer das etapas de desenvolvimento deste trabalho. Porém a maior contribuição científica reside no fato de esta ser um trabalho aplicado, orientado para uma nova linha de pesquisa científico-tecnológica no Brasil, a qual delinea alternativas ecológicas para sistemas mecânicos com características até então não abordadas no referencial bibliográfico pesquisado.

### 7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuação desta pesquisa poderá ocorrer no tratamento de alguns pontos que ficaram em aberto, e que poderão melhorar a sistematização proposta, tais como:

- Ampliar o escopo para os fluidos minerais e fluidos HFXX (fluidos resistentes ao fogo)
- Ampliar a base de conhecimento dos fluidos biodegradáveis comerciais.
- Implementar no protótipo uma interface gráfica usando o aplicativo CLIPSJNI (Clips-Java).
- Desenvolver a arquitetura de um sistema de condicionamento e diagnóstico de falhas que especifique as condições do fluido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHOLA, P. **Biodegradable Hydraulic Fluids in the Forest**. SAE Earthmoving Industry Conference & Exposition, 1998.

AKERKAR, R.A.; SAJJA, P.S. **Knowledge-based systems**. Sudbury, USA: Jones & Bartlett Publishers, 2009. 354p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2270 - Standard Practice for Calculating Viscosity Index From Kinematic Viscosity at 40 and 100°C**: ASTM International. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.01, 2011. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2272-11 Standard Test Method for Oxidation Stability of Steam Turbine Oils by Rotating Pressure Vessel**: ASTM International. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.01, 2009. 20p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3427-86. Standard Test Method for Gas Bubble Separation Time of Petroleum Oils**. West Conshohocken, PA, USA, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5864-95 Standard Test Method for Determining Aerobic Aquatic Biodegradation of Lubricants or their Components**: Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.03, 1995. 7p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6006-96. Standard Guide for Assisting Biodegradability of Hydraulic Fluids**: Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.03, pp. 1290–1294, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6046-02 Standard Classification of Hydraulic Fluids for Environmental Impact**. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.02, 2012. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6139-00 Standard Test Method for Determining the Aerobic Aquatic Biodegradation of Lubricants or Their Components Using the**

**Gledhill Shake Flask:** Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.03, 2000. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6731-01 Standard Test Method for Determining the Aerobic, Aquatic Biodegradability of Lubricants or Lubricant Components in a Closed Respirometer:** Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.03, 2011. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7373-12. Standard Test Method for Predicting Biodegradability of Lubricants Using a Bio-kinetic Model:** Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, USA, v. 05.04, 2012. 5p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 892-11 Standard Test Method for Foaming Characteristics of Lubricating Oil.** , West Conshohocken, PA, USA, v. 05.01, 2011. 10p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 892-74. Standard Test Method for Foaming Characteristics of Lubricating Oils.** West Conshohocken, PA, USA, v. 05.01, 2011.

ALVES, G. D. **Sistema especialista protótipo para diagnóstico de falha em um sistema hidráulico naval.** 2001. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR ISO 14020: rótulos e declarações ambientais: princípios gerais.** Rio de Janeiro, 2002. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14020:2002 **Rótulos e declarações ambientais - Princípios Gerais:** ABNT. ABNT/CB-38 Gestão Ambiental, 2010. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR ISO/IEC 9126-1 Engenharia de software - Qualidade de produto - Parte 1: Modelo de qualidade.** Rio de Janeiro, 2003. 21p.

AVIA. Catálogos Fluidos AVIA. Disponível em: <<http://www.avia.de/cms/index.php>>. Acesso em agosto, 2012.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem**. São Paulo: Manole, 2008.

BECHEM. Disponível em: < [www.bechem.de](http://www.bechem.de) >. Acesso em outubro, 2012.

BELAN, H. C. **Formalização da Rede de Petri Canal/Agência para Projeto de Equipamentos Industriais**. 2007. 168p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

BELHOT, R. V. **Conceitos e Desenvolvimento de Sistemas Especialistas**. São Carlos, Brasil: USP – EESC – Engenharia da Produção, 1993. 86p.

BIG CHIEF Inc. Disponível em: < [http://www.gobigchief.com/?page\\_id=1775](http://www.gobigchief.com/?page_id=1775)>. Acesso em dezembro, 2012.

BLANKEN, F. **Friction in the Market: A Review of the market for Environmentally Acceptable Lubricants**. Integratieproject Bachelor, IEM Process and Product Technology, University of Groningen. 2006.

BOSCH REXROTH. Disponível em: <[http://www.boschrexroth.com/corporate/sub\\_websites/industries/plastics/en/applications/spritzgiess/hydraulisch\\_spritz/index.jsp](http://www.boschrexroth.com/corporate/sub_websites/industries/plastics/en/applications/spritzgiess/hydraulisch_spritz/index.jsp)>. Acesso em dezembro, 2012.

BOSCH REXROTH. Disponível em: < [http://www.boschrexroth.com/country\\_units/america/united\\_states/sub\\_websites/brus\\_brh\\_i/en/products\\_ss/09\\_pumps/index.jsp](http://www.boschrexroth.com/country_units/america/united_states/sub_websites/brus_brh_i/en/products_ss/09_pumps/index.jsp)>. Acesso em janeiro, 2013.

BP. Disponível em: < <http://www.bp.com/>>. Acesso em outubro, 2012.

CALETTI, Luciano. **Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para projeto de unidades de potência hidráulica**. 2003. 131p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

CARRUTHERS, S. P.; MARSH, J. S.; TURNER, P. W.; ELLIS, F. B.; MURPHY, D. J.; SLABAS, T.; CHAPMAN, B. A. **Industrial markets for UK-produced oilseeds**. Research Review OS9, Centre for Agricultural Strategy, University of Reading. 1995.

Europäisches Komitee Ölhydraulik und Pneumatik. CETOP RP77H, **Flüssigkeiten für hydraulische Kraftübertragung**, Einteilung.

CASTELANI, M. R. **Sistema especialista para o gerenciamento operacional de redes de distribuição de gás natural**. 2003. 168p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

CASTROL. Disponível em: < [www.tds.castrol.com.au](http://www.tds.castrol.com.au) >. Acesso em novembro, 2012.

CATERPILLAR. Disponível em: <<http://parts.cat.com/cda/files/3068179/7/PEHJ0238-00.pdf>>. Acesso em dezembro, 2012.

CHAVANE, C. and PERTHUIS, H.G. **A fluid selection expert system for matrix treatments**. Eur. Petrol. Conf., Cannes, France, November 16–18, 1992.

CHENG, V. M.; WESSOL, A.; BAUDOUIN, P.; BENKINNY, M. T.; NOVIC, N.J. **Biodegradable and nontoxic hydraulic fluids**. SAE Technical Paper 910964, SAE, Warrendale, PA, 1991.

CLIPS. **A tool for building expert systems**. Disponível em: <<http://clipsrules.sourceforge.net/>>. Acesso em março, 2012.

COORDINATING EUROPEAN COUNCIL. **CEC-L-33-A-93 Biodegradability of Two-Stroke Cycle Outboard Engine Oils in Water**, London, Issue. 2, 1994.

DE NEGRI, V. J. **Estruturação da Modelagem de Sistemas Automáticos e sua Aplicação a um banco de Testes para Sistemas Hidráulicos**. 1996, Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1996.

DENHERDER, M. J. **Important Properties of Hydrostatic Transmission Fluids**. SAE Technical Paper Series, Paper 650593, 1966.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN5 1502, Schmierstoffe und verwandte Produkte, Kurzbezeichnung der Schmierstoffe und Kennzeichnung der Schmierstoffbehälter**. Schmiergeräten und Schmierstellen, August 1990.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN5 51519, Lubricants - ISO viscosity classification for industrial liquid lubricants**. Schmiergeräten und Schmierstellen, 1998. 4p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51524, Teil 1–3, Druckflüssigkeiten, Hydrauliköle HL, HLP HVLP**. Mindestanforderungen, April 2006.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51558 Testing of Mineral Oils; Determination of the Neutralization Number, Colour-indicator titration**: German Standard. Berlin, Germany, Part 1, 1979. 7p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51562 Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter**: measurement of the kinematic viscosity with the Ubbelohde-viscosimeter. German Standard, Beuth Verlag, Berlin, Germany, 1978.

DHARAN, M. B. TUREK, E. A. and VOGEL, J. L. **The fluid properties measurement expert system**. 4th Pet. Comput. Conf., San Antonio, TX, June 26–28, 1989.

DONALDSON. Disponível em: <<http://www.donaldson.com>>. Acesso em dezembro, 2012.

DREYFUS, Hubert; Stuart. **From Socrates to Expert Systems: the limits and dangers of Calculative Rationality**. Disponível em: <[http://socrates.berkeley.edu/~hdreyfus/html/paper\\_socrates.html](http://socrates.berkeley.edu/~hdreyfus/html/paper_socrates.html)>. Acesso em: 17 agosto. 2012.

DURKIN, J. **Expert Systems Design and Development**. Ed. Prentice Hall, 1994.

EATON. Disponível em: <  
<http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Hydraulics/Pumps/index.htm>>. Acesso em dezembro, 2012.

EISENTRAEGER A, et al. **Biodegradability testing of synthetic ester lubricants-effects of additives and usage**. Chemosphere, v. 48, n. 1, p. 89–96, 2002.

FERNANDES, Anita Maria da Rocha. **Inteligência Artificial - Noções Gerais**. Florianópolis: Editora Visual Books, 2003.

FERREIRA, M. G. G. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1997.

FOX, N. J.; STACHOWIAK, G. W. **Vegetable oil-based lubricant-A review of oxidation**. Tribol Int 40, 2007. pp. 1035–1046.

FUCHS. Disponível em: < [http://www.fuchs.com/fuchs\\_industrial.php](http://www.fuchs.com/fuchs_industrial.php) >. Acesso em novembro, 2012.

FURST, F. **Sistematização do projeto preliminar de circuitos hidráulicos com controle de posição**. 2001. 132p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.

GAO, S., LIU, D., LIU, X. and Qu, F. **Research of fault diagnosis expert system for hydraulic components**. Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference on: p. 5699 – 5701, 2010.

GIARRATANO, J. C.; RILEY, G. **Expert systems: principles and programming**. Boston: PWS.

GLANCEY, J. L.; BENSON, E. R.; KNOWLTON, S. **A low volume fluid power system for the evaluation of genetically modified vegetables as industrial fluids**. SAE Technical Paper 961725, SAE, Warrendale, PA. 1996.

GLANCEY, J. L.; KNOWLTON, S.; BENSON, E. R. **Development of a high oleic soybean oil-based hydraulic fluid.** SAE Technical Paper 981999, SAE, Warrendale, PA, 1998.

GONZALEZ, A. J.; DANKEL, D. **The engineering of knowledge-based systems: theory and practice.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

GUIDA, G.; TASSO, C. **Design and development of knowledge-based systems: from life cycle to methodology.** USA: John Wiley & Sons Ltd., 1994. 476p.

HAMID, S. **Environmentally Friendly Hydraulic Fluids Applications and Benefits.** 51<sup>st</sup> National Conference on Fluid Power, Proceedings of...USA, NFPA: 2008. pp147-156.

HAROLD, S. **Biodegradability: Review of the Current Situation.** The Lubrizol Corporation, company publication, 1993.

HART, A. **Knowledge Acquisition for Expert Systems.** Second Edition. London: Ed. McGraw-Hill, 1990.

HÉRY, C.; BATTERSBY, N. Development and applications of environmentally acceptable hydraulic fluids. **SAE Technical Paper 981493.**1998. 12p.

HYDAC. Disponível em: < <http://www.hydac.com/br-pt/produtos/trocadores-de-calor-radiadores.html>>. Acesso em março, 2013.

HYDRO-ENERGY. Disponível em: <<http://www.hydro-energy.com>>. Acesso em outubro, 2012.

HONARY, L. **Performance of selected vegetable oils in ASTM hydraulic tests.** SAE Technical Paper 952075, SAE, Warrendale, PA. 1995.

HONARY, L. **Biobased greases and lubricants: from research to commercialization.** Biomass R&D Technical Advisory Committee, National Ag-Based Lubricants (NABL). University of Northern Iowa, 2007.

HONG, T.; TESSMANN, R. **Computerized Design Analysis of Hydraulic System Dynamics**. BarDyne, Inc., 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2909:2002 Petroleum products -- Calculation of viscosity index from kinematic viscosity**, 2002. 9p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3448:1992 Industrial liquid lubricants -- ISO viscosity classification**, 1992. 4p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4021 Hydraulic fluid power -- Particulate contamination analysis -- Extraction of fluid samples from lines of an operating system**, 1992. 6p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4406 Hydraulic fluid power – Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles**, 1999. 7p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10708 Water quality -- Evaluation in an aqueous medium of the ultimate aerobic biodegradability of organic compounds - Determination of biochemical oxygen demand in a two-phase closed bottle test**, 1997. 17p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11500:2008, Hydraulic fluid power – Determination of particulate contamination by automatic counting using the light extinction principle**, 2008. 29p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11943:1999, Hydraulic fluid power – On-line automatic particle counting systems for liquids - Methods of calibration and validation**, 1999. 30p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12922:12 Lubricants, industrial oils and related products (class L) - Family H (Hydraulic systems) -- Specifications for categories HFAE, HFAS, HFB, HFC, HFDR and HFDU**, 2012. 10p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12937 Petroleum products -- Determination of water - Coulometric Karl Fischer titration method**, 2000. 11p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 14953 Water quality -- Evaluation of ultimate aerobic biodegradability of organic compounds in aqueous medium - Method by analysis of inorganic carbon in sealed vessels (CO<sub>2</sub> headspace test)**, 1999. 15p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15380 Lubricants, Industrial Oils and Related Products (Class L) – Family H (Hydraulic Systems) – Specifications for Categories HETG, HEES, HEPG and HEPR**, 2002. 18p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6296 Petroleum products -- Determination of water - Potentiometric Karl Fischer titration method**, 2000. 10p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6743/4 Lubricants, Industrial Oils and Related Products (Class L)–Classification–Part 4: Family H (Hydraulic systems)**, 1997.

JOHN DEERE. Disponível em: <<http://www.deere.com>>. Acesso em outubro, 2010.

KELLER, R. **Tecnologia de Sistemas Especialistas: Desenvolvimento e Aplicação**. São Paulo: Makron Books, 1991. 292p.

KESSLER, M.; FELDMANN, D.G. **Fluid qualification tests – evaluation of the lubricating properties of biodegradable fluids**. Industrial Lubrication and Tribology, v. 54 Iss: 3, 2002. pp.117 – 129.

KLAAS, H.; GOLD, P.W.; MURRENHOF, H.; SCHMIDT, M. **Analyzing the Results of Fluid Ageing Using Modern Database Techniques**. Olhydraulik und Pneumatik, v. 47, n. 2, 2003.

KLING, G., HARP, D. E., TOTTEN, G., AND WEBSTER, G.M. Ecological Compatibility. In Totten, G. (Ed.). **Handbook of Hydraulic Fluid Technology**. New York: Marcel Dekker, Chap 8. 2000, pp 427–468.

KONISHI, A.; OHKAWA, S.; NAKAMOTO, N.; NANBA, M.; YOSHIDA, T. **Development of a High Performance Biodegradable Hydraulic Oil for Construction Equipment**. SAE Technical Paper 971632, SAE Warrendale, PA (USA), 1997.

KODALI, D. R. **High performance ester lubricants from natural oils**. *Industrial Lubrication and Tribology*, v. 54, n. 4, 2002. pp. 165-70, 2002.

KRŽAN, B.; VIŽINTIN, J. **Tribological properties of an environmentally adopted universal tractor transmission oil based on vegetable oil**. *Tribology Int* 36, 2003. pp. 827–833.

LAL, K.; CARRICK, V. **Performance testing of lubricants based on high oleic vegetable oils, Ecological and Economical Aspects of Tribology**. Proceedings of the 9th International Colloquium, Technische Akademie Esslingen, 11-13 January, pp. 2.9-1-2.9-14.

LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. **Gerenciamento de Sistemas de Informação**. Editora LTC - Livros Técnicos e Científicos, 3ed, 2002.

LINSINGEN, I. Von. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. 2ª. Ed. revisada Florianópolis: Editora da UFSC, 2003. 399 p.

LISINGEN, I. Von.; DE NEGRI, V. J. Fundamentals of hydraulic systems and components. In: Totten, G. and De Negri, V. J. (Eds.). **Handbook of Hydraulic Fluid Technology**. Second Edition. CRC Press. Chap.1, pp. 1-51, 2012.

McCARTHY, John. **What is Artificial Intelligence?**. Disponível em: <<http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf>>. . Acesso em novembro, 2012.

MANNESMAN REXROTH. **Environmentally Acceptable Hydraulic Fluids HETG, HEPG, HEES for Axial Piston Units**. RA 90 221/05.93. 1993.

MANG, T.; DRESEL, W. **Lubricants and Lubrications**. Wiley, Weinheim, 2001.

MAROUGY, THELMA. What you need to know about going Green. **Hydraulics & Pneumatics**, 209 out. 2012. Disponível em:

<<http://hydraulicspneumatics.com/hydraulic-fluids/what-you-need-know-about-going-green>>. Acesso em fevereiro, 2012.

MATELLI, J.A. **Sistemas baseados em conhecimento para projeto de plantas de cogeração a gás natural**. 2009. 154p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.

MATOS FILHO, L. V. **Reprojeto de Equipamentos Mecatrônicos com base na Confiabilidade de Sistemas**. 2007. 130p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

MEINDORF, T.; MURRENHOFF, H. **Field Trial on Biodegradable Hydraulic Fluids in Off-Road and Heavy Duty Applications**. International Exposition for Power Transmission and Technical Conference 4-6. Aachen, Germany. 2000.

MICHAEL, P.; BLAZEL, B.; KIMBALL, A.; RIVERA-LOPEZ, R. **An Investigation of the Filterability of Synthetic Biodegradable Hydraulic Fluids**. Proceedings of the national conference on fluid power, 2008.

MILLER, M. **Biodegradable Fluid Performance Testing**. IFPE – International Fluid Power Exposition. Las Vegas. USA. 2008.

MILLER, M. **New Laws Governing Biobased, Environmentally Preferable Lubricants and Fuels**. Underwater Intervention 2005 Committee - International conference, 2005.

MRL HYDRAULICS. **System Design Considerations**. Disponível em: <[http://www.mrlhydraulics.com/uploads/Hydraulic\\_Fluid\\_System\\_Design\\_Decision\\_Guide.pdf](http://www.mrlhydraulics.com/uploads/Hydraulic_Fluid_System_Design_Decision_Guide.pdf)>, Acesso outubro, 2012.

MÜLLER, D. N. **Definições Básicas**. Disponível em: <<http://www.ulbra.tche.br/~danielnm/ia/defbas/de.html>>, Acesso novembro, 2012.

MURRENHOFF, H. **Environmentally Friendly Fluids - Chemical Modifications, Characteristics and Condition Monitoring**. Olhydraulik und Pneumatik, v. 48, n. 3. 2004. 31p.

MURRENHOFF, H. **Grundlagen der Fluidtechnik**, Teil 1: Hydraulik, lecture print, Aachen University. 2005.

MURRENHOFF, H.; SCHMIDT, M. **Influence of aging on fluid properties of environmentally acceptable fluids**. Proceedings of 13th International Colloquium Tribology, Germany. 30p. 2002.

MURRENHOFF, H.; SCHMIDT, M. **Analysis of Aging of Environmentally Friendly Hydraulic Fluids and Resulting Effects on Tribological Fluid Properties**. The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'03, Tampere, Finland. 2003.

NEUROAI. Disponível em: <<http://www.learnartificialneuralnetworks.com/>>. Acesso outubro, 2010.

NFPA. **National fluid power association**. Hydraulic fluid power - Design for nonintegral industrial reservoirs - NFPA/T3.16.2. 1996.

OGLIARI, A. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados**. 1999. 154p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1999.

OMV. Disponível em: < <http://www.omv.com> >. Acesso em novembro, 2012.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD Guidelines for testing of chemicals**. Paris, 1993. OECD 201: Alga, growth inhibition test; OECD 202: Daphnia sp., acute immobilisation test and reproduction test; OECD 301 A: DOC Die-Away-Test; OECD 301 B: CO2 Evolution Test; OECD 301 C: Modified MITI Test (I); OECD 301 D: Closed Bottle Test; OECD 301 E: Modified OECD Screening Test; OECD 301 F: Manometric Respirometry Test; OECD 302 B: Zahn-Wellens/EMPA test.

PANOLIN. Catálogo PANOLIN HLP SYNTH. Disponível em: <<http://www.panolin.com>>. Acesso em agosto, 2012.

PARKER. Disponível em: < <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.14ecfc66e7a40c> >

[1af8500f199420d1ca/?vgnnextoid=43cb5242ade5c110VgnVCM10000032a71dacRCRD&vgnnextfmt=EN&Keyword=PUMPS&Wtky=PUMPS](http://1af8500f199420d1ca/?vgnnextoid=43cb5242ade5c110VgnVCM10000032a71dacRCRD&vgnnextfmt=EN&Keyword=PUMPS&Wtky=PUMPS)

>. Acesso em dezembro, 2012.

PEARL, J. **Heuristic-intelligent search strategies for computer problem solving**: Addison Wesley Publishing Company. 1984.

PEREZ, R. J.; BRENNER, M. S. **Development of a new constant volume vane pump test for measuring wear characteristics of fluids**. Lubrication Engineering, v. 48, pp. 354-9. 1992.

PETROBRÁS. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/>>. Acesso em agosto, 2012.

PORCIÚNCULA, G. S. **Metodologia para análise de confiabilidade no projeto de sistemas automáticos**. 2009. 168p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.

RABIE, M. G. **Fluid Power Engineering**. NY: McGraw-Hill, 2009.

REXROTH. **Environmentally Acceptable Hydraulic Fluids**. Brochure No. RE 90221/05.10, Bosch Rexroth AG., Germany, 2010. Disponível em:

<[http://www.boschrexroth.com/country\\_units/america/united\\_states/sub\\_websites/brus\\_brh\\_m/en/products\\_mobile\\_hydraulics/8\\_fluid\\_information/\\_a\\_downloads/re90221\\_2012-05.pdf](http://www.boschrexroth.com/country_units/america/united_states/sub_websites/brus_brh_m/en/products_mobile_hydraulics/8_fluid_information/_a_downloads/re90221_2012-05.pdf)>. Acesso em fevereiro, 2012

REZENDE, Solange O. **Sistemas Inteligentes Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2005.

RHEE, I. Assessing the Biodegradability of Hydraulic Fluids Using a Biokinetic Model. **Tribology Transactions**, v. 51, Issue 1, pp68-73, 2008.

RHEE, I. Biodegradable hydraulic fluids. In Totten, G and De Negri, V. J. (Eds.). **Handbook of Hydraulic Fluid Technology**. Second Edition. CRC Press. Chap. 8, pp. 319-362, 2011.

RIEDEL, C.; MURRENHOFF, H. **Monitoring and prediction of fluid properties in hydraulic systems In**: Advanced strategies and technologies for cost-effective maintenance: Proceedings of

COMADEM 2009; 22nd international congress condition monitoring and diagnostic engineering management; Miramar Palace, San Sebastian, Spain, 2009.

RIGONI, E. **Metodologia para Implantação da Manutenção Centrada na Confiabilidade: Uma Abordagem Fundamentada em Sistemas baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy**. 2009. 342p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.

SAJJA, P. S.; AKERKAR, R. **Advanced Knowledge Based Systems: Model, Applications & Research**: e-Book. Ed. Sajja & Akerkar, v. 1, 2010. 191p.

SAUER DANFOSS. **Experience with Biodegradable Hydraulic Fluids**. Technical Information 520L0465. Denmark. 2011.

Disponível em: <[http://www.sauer-danfoss.com/stellent/groups/publications/documents/product\\_literature/520l0465.pdf](http://www.sauer-danfoss.com/stellent/groups/publications/documents/product_literature/520l0465.pdf)>. Acesso em fevereiro, 2012

SAUER DANFOSS. Disponível em: < <http://www.sauer-danfoss.com/Products/PistonPumpsandMotors/index.htm>>. Acesso em janeiro, 2013.

SCHMIDT, M.; MURRENHOFF, H. **Impact of aging on tribological properties of environmentally friendly hydraulic fluids**. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans. 2002.

SENAI. **Apostila de hidráulica básica**, RJ. 20--. 65p.

SEYFERT, C.; KESSELER, A.; LUTHER, R.; MEINDORF, Th. **Sensors for On-line Monitoring of Biodegradable Hydraulic Oils**. Olhydraulik und Pneumatik, v. 47, n. 5. 2002.

SILVA, J. C.; BACK, N. **Shaping the Process of Fluid Power System Design Applying an Expert System**. Research in Engineering Design, Berlin, v. 12, n. 1, p.8-17, 2000.

SILVA, J. C. **Expert system prototype for hydraulic system designs focusing on concurrent engineering aspects**. 1998. Tese (Doutorado) -

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1998.

SOUTO, R. B. **Projeto de Sistemas Automáticos com Modelagem e Controle da Comunicação Com o Ambiente Externo**. 2005. 188p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2005.

STAMMEN, C. **Elektrohydraulische Linearantriebe Entwicklung von Condition Monitoring Funktionen**. Ölhydraulik und Pneumatik, v. 47, n. 10, 2003. 8p.

SUZUKI, R.; TANAKA, Y.; TOTTEN, G.E. AND BISHOP, R.J. **Removing Entrained Air In Hydraulic Fluids and Lubrication Oils**. Machinery Lubrication, July-August, 2002. p. 56-62.

TERRESOLVE. Disponível em: < [www.terresolve.com](http://www.terresolve.com) >. Acesso em novembro, 2012.

THEISSEN, H. **Bio-oils in hydraulic power Experiences from the German Market Introduction Program**. In: Customer benefits of fluid power: conference proceedings, March 2006, Aachen, Germany. 5rd International Fluid Power Conference (5th IFK). Aachen, v. 2. 2006.

THEISSEN, H. **Effects of Contamination of Biobased Hydraulic Fluids with Mineral Oil**. Journal of ASTM International (JAI). v. 6, Issue 1, 2009.

TOMAZELA, M. **Administração limpa e enxuta em sistemas hidráulicos de colhedoras de cana-de-açúcar: uma proposta metodológica**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 2007.

TRINKEL. **Fluid Power Basics**. Penton Media, Inc. 2012. Cap. 6. Disponível em: <<http://hydraulicspneumatics.com/other-technologies/chapter-6-hydraulic-reservoirs>>. Acesso em junho, 2012.

TOTTEN, G. E.; BISHOP, R. J. Jr. **Hydraulic pump testing procedures to evaluate lubrication performance of hydraulic fluids**. SAE Technical Paper 952092, SAE, Warrendale, PA. 1995.

TOTTEN G. E.; WEBSTER, G. M. **Fire Resistance Testing Procedures: A Review and Analysis, in Fire Resistance of Industrial Fluids.** American Society for Testing and Materials; Philadelphia, 1996.

VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU. **VDMA 24568. VDMA Harmonization Sheet, Fluid Power, Rapidly Biologically Degradable Hydraulic Fluids, Minimum Technical Requirements,** Berlin, March, 1994.

VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU. **VDMA 24317 Fluidtechnik - Schwerentflammbare Druckflüssigkeiten - Technische Mindestanforderungen.** November, 2005.

VILLFORTH, F.J., Ed. **Hydraulics, Lubrication,** v. 82, n. 1, p.18–24, 1996.

VINADÉ, C. A. C. Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista. 2003. 217p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

U.S. Environmental Protection Agency USEPA. **Category for Persistent, Bioaccumulative, and Toxic New Chemical Substances.** Fed Reg 64: 60194-60204, 1999.

WATERMAN, D. A. **A Guide to Expert Systems.** Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

WILLING, A. **Lubricants based on renewable resources – an environmentally compatible alternative to mineral oil products.** *Chemosphere*, v. 43, pp 89-98, 2001.

WAN, W. B.; MALEQUE, M. A.; ANI, F. N.; MASJUKI, H. H. **Experimental investigation on system performance using palm oil as hydraulic fluid.** *Industrial Lubrication and Tribology* 59/5. pp 200–208. 2007.

WERNER, M. **Das Betriebs- und Alterungsverhalten biologisch Schnell abbaubarer Hydrauliköle**. Dissertation, RWTH Aachen, 2000.

WILSON, B. **Lubricants and functional fluids from renewable sources**. Industrial Lubrication and Tribology, v. 50, n. 1, pp. 6-15, 1998.

YEAPLE, F. **Fluid Power Design Handbook**, 2<sup>nd</sup> ed. New York: ed. Marcel Dekker Inc., Chap. 1, pp. 1-22, 1990.

YIN, J. and MEI, L. **Fault Diagnosis of Excavator Hydraulic System Based on Expert System**. Advances in Automation and Robotics, Vol.1 Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 122, 2012, pp 87-92

ZIMMERMANN, M. Aurélio. **Sistema especialista protótipo para auxílio na seleção de bombas hidrostáticas**. 2003. 1089. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

## **APÊNDICES**

## A. PROPRIEDADES DOS FLUIDOS HIDRÁULICOS BIODEGRADÁVEIS

Neste apêndice, uma revisão das propriedades mais relevantes dos fluidos biodegradáveis será mostrada, assim como também será discutido o efeito no desempenho no fluido e, por conseguinte no sistema hidráulico.

### A.1 VISCOSIDADE

Aos lubrificantes industriais e fluidos hidráulicos são atribuídos graus de viscosidade ISO em função da sua viscosidade cinemática, que por sua vez é descrito pela razão da viscosidade dinâmica e densidade. A temperatura de referência é de 40°C. A classificação de viscosidade ISO e DIN 51 519 para fluidos industriais definem 18 graus de viscosidade de 2 a 1500 mm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> a 40°C. Cada classe é definida pela viscosidade medida a 40°C.

A viscosidade é a propriedade física mais importante exibida por um fluido hidráulico. Se a viscosidade do fluido hidráulico é muito alta ocorrem problemas como:

- Resistência da vazão será maior quanto mais o fluido passa por folgas dos componentes.
- A temperatura do sistema aumenta devido à falta de lubrificação.
- Haverá queda de pressão no sistema.
- Aumento do consumo de energia.

Já se a viscosidade do fluido fica muito baixa se terá inconvenientes com a redução da eficiência nas bombas e o aumento da sua temperatura, assim como também o aumento da taxa de desgaste.

Como dito anteriormente, a viscosidade é medida a 40°C, no entanto, o ponto de operação crítica da maioria dos equipamentos é de 80°C ou superior. É comum o uso de óleos de viscosidade relativamente alta a fim de garantir uma viscosidade mínima de 8-10 cSt em altas temperaturas. Mas fluidos biodegradáveis têm maior índice de viscosidade do que os produtos de óleo mineral, sem a necessidade de adicionar aditivos.

Além disso, a lubrificação é melhor, pois as superfícies metálicas são umedecidas com mais intensidade. Os biodegradáveis também têm uma maior densidade, o que garante uma maior viscosidade dinâmica em relação de viscosidade cinemática (MURRENHOFF, 2005).

A viscosidade dinâmica é importante para a lubrificação, enquanto que a viscosidade cinemática é mais fácil de medir para efeitos de monitoração. Como mostra a Figura A.1 um fluido biodegradável HETG 32 a 100°C tem claramente uma maior viscosidade do que um fluido em base mineral HLP 46.

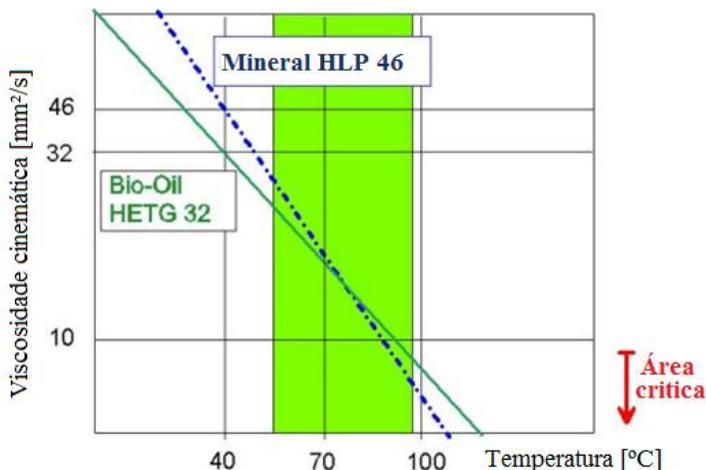


Figura A.1 Relação viscosidade-temperatura entre o bio-óleo (HETG 32) e óleo mineral (adaptado de Theissen (2006))

## A.2 MASSA ESPECÍFICA

Os fluidos hidráulicos são de baixa compressibilidade e expansão térmica volumétrica. Portanto, em condições normais de funcionamento, a massa específica de fluidos é praticamente constante. A massa específica para fluidos de base mineral varia na faixa de 0,85 e de 1,4 para fluidos sintéticos. Esta massa específica de fluidos hidráulicos é medida a 15°C. A massa específica de fluido hidráulico é dependente da temperatura e pressão, pois o volume de um fluido expande à medida que sua temperatura aumenta.

Segundo Totten (2000) a massa específica não só influencia a vazão e a queda de pressão, mas também afeta a frequência natural de um sistema hidráulico. Alguns exemplos da variação da massa específica com a temperatura são mostrados na Figura A.2 (YEAPLE, 1990).

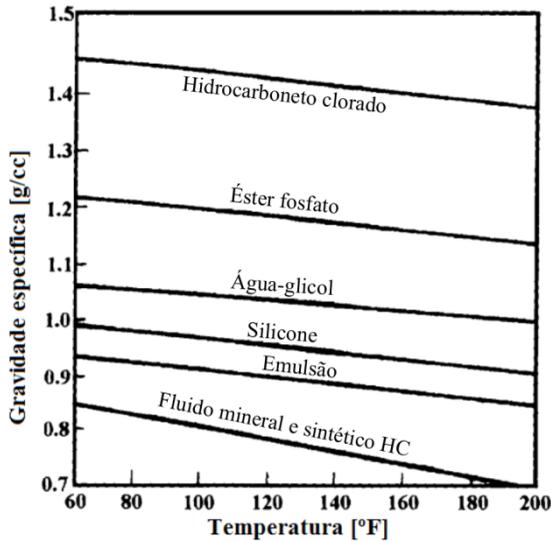


Figura A.2 Massa específica típica de fluidos hidráulicos (adaptado de YEAPLE (1990)).

### A.3 CAPACIDADE DE DISSOLUÇÃO DE GÁS

Ar e outros gases podem se dissolver em fluidos. Um fluido pode absorver um gás até que a saturação é alcançada, o que não precisa afetar negativamente as características do fluido. A solubilidade de um gás em um líquido depende da base do fluido, o tipo de gás, a pressão e a temperatura. Até aproximadamente 30 MPa, a capacidade de dissolução é diretamente proporcional à pressão. Segundo a lei de Henry, a quantidade de um determinado gás dissolvido em um determinado tipo e volume de líquido é diretamente proporcional à pressão parcial desse gás em equilíbrio com o líquido, a uma temperatura constante. Esta lei é expressa pela seguinte equação.

$$V_G = V_F \alpha_v \frac{p}{p_0} \quad (\text{A.1})$$

onde  $V_G$  é o volume de gás dissolvido,  $V_F$  o volume de fluido,  $p_0$  a pressão atmosférica,  $p$  a pressão do fluido, e  $\alpha_v$  a constante de solubilidade ou coeficiente de Bunsen.

O coeficiente de Bunsen depende do tipo e característica do fluido, mas sofre pequena influência da temperatura e da viscosidade. Esse coeficiente estabelece a concentração volumétrica do gás nas condições

normais de temperatura e pressão ( $1,013 \times 10^4$  MPa,  $20^\circ\text{C}$ ), possuindo os seguintes valores médios para os diferentes tipos de fluidos:

- Óleo mineral:  $\alpha_v=0,06$  a  $0,12$
- HFA:  $\alpha_v=0,02$  a  $0,05$
- HFC:  $\alpha_v=0,01$  a  $0,04$
- HFD:  $\alpha_v=0,012$  a  $0,04$

Segundo Linsingen (2003), normalmente, o ar dissolvido não afeta as propriedades do fluido. Porém, sob certas condições, como em regiões de baixa pressão estática (sucção de bombas, redução da secção de escoamento), o ar pode ser liberado do líquido (aeração), formando bolhas que, ao entrarem em regiões de pressão mais elevada, podem se tornar instáveis e plodir.

#### A.4 AERAÇÃO

Aeração é uma dispersão de bolhas de ar muito pequenas em um fluido hidráulico. Óleo sob baixa pressão de ar absorve cerca de 10 por cento em volume. Sob pressão alta, o percentual é ainda maior. Quando o líquido é despressurizado, o ar produz espuma quando ele é liberado da solução. Quando a concentração de ar em um sistema hidráulico excede o nível de saturação, as bolhas gasosas ficam suspensas no fluido.

Ar entra em um sistema hidráulico através do reservatório ou através de aberturas em componentes do sistema hidráulico. A entrada de ar através do reservatório contribui para a formação de espuma na superfície do fluido. Um bom projeto do reservatório e uso de inibidores de espuma geralmente eliminam a superfície de espuma.

Este ar tem que ser separado da superfície do fluido ou ele vai ser succionado pela bomba e isso pode causar danos ao sistema e seus componentes. A velocidade com que as bolhas de ar sobem à superfície depende do diâmetro das bolhas, a viscosidade do fluido, a densidade e a qualidade da base do fluido. Quanto maior a qualidade e a pureza da base, a liberação do ar é mais rápida.

O ar que entra poderá ter menos importância, desde que ele permanece dissolvido no fluido hidráulico. No entanto, os resultados do ar não dissolvido têm sérios problemas, principalmente:

- Redução do módulo de compressibilidade da mistura ar-óleo
- Redução da densidade do fluido de um valor correspondente à fração de volume de ar que entra

- Ligeiro aumento da viscosidade do fluido hidráulico
- Aeração excessiva no sistema hidráulico, níveis elevados de ruído e os possíveis danos das bombas e outros componentes.

Bolhas de ar livremente passando por uma bomba hidráulica são submetidas à compressão súbita sob condições adiabáticas, elevando a temperatura das bolhas de ar comprimido.

Segundo Yeaple (1990), este ar não dissolvido pode existir no fluido hidráulico, devido às seguintes razões:

- Liberação de ar dissolvido, devido à queda de pressão do local
- Aberturas de ar nas linhas de sucção, tubos ou conexões
- Fluido com ar retornando para o reservatório
- Baixo nível de fluido no reservatório
- Um projeto errado do reservatório
- Incorreta atividade de manutenção

## A.5 FORMAÇÃO DE ESPUMA

A formação de ar e espuma ilustrada na Figura A.3 pode ser formada pela má concepção de um reservatório e da linha de retorno do fluido. Se a espuma se acumula, ele pode causar graves problemas no sistema hidráulico. Espuma excessiva e arrastamento de ar podem levar a inúmeros problemas no circuito hidráulico como:

- Perda de potência
- Redução do módulo de compressibilidade
- A perda de fluido no sistema
- Aumento da temperatura
- Erosão e cavitação
- Ruído

Portanto, a maioria dos fluidos hidráulicos contém aditivos que causam a degradação rápida da espuma. Estes aditivos anti-espumantes geralmente são à base de silicone o qual pode acelerar o colapso de bolhas, reduzindo a tensão superficial da espuma.

Anti-espumantes são usados em concentrações muito pequenas (cerca de 0,001%). A concentração de anti-espumante em um fluido pode diminuir progressivamente, como resultado do envelhecimento e se fixar em superfícies metálicas criando problemas.

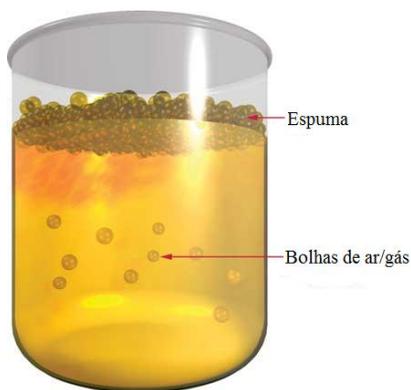


Figura A.3 Formação de espuma (adaptado de SUZUKI et. al (2002))

A propensão para a formação de espuma é medida de acordo com a norma ASTM D 892 ou DIN 51 566.

#### A.6 DEMULSIFICAÇÃO

Demulsificação é a capacidade de um fluido hidráulico para repelir a água que ingressou. A entrada da água pode resultar de um vazamento em um trocador de calor, a formação de condensação de água nos reservatórios como resultado das mudanças significativas do nível de óleo, filtragem pobre, contaminação da água por meio de selos defeituosos e condições ambientais extremas. A água em um fluido hidráulico pode levar a vários problemas, tais como:

- Formação de um fluido denso ou pastoso
- Cavitação
- Corrosão em bombas
- Aumento do atrito e desgaste nos componentes
- Aceleração e decomposição de elastômeros e plásticos
- Oxidação do fluido

Portanto, todas as tentativas possíveis devem ser feitas para manter o fluido de um sistema hidráulico sem contaminação por água. No entanto, se a contaminação da água ocorre, ela deve ser removida o mais rapidamente possível dos reservatórios de fluidos hidráulicos.

A norma ASTM D 1401 é a utilizada para avaliar as propriedades do fluido hidráulico em função do tempo de separação da água. Normalmente, os óleos que apresentam tempos de separação  $\leq 30$  min são adequados para o uso continuado em um sistema hidráulico (VILLFORTH, 1996). Algumas formas de minimizar o teor de umidade nos sistemas hidráulicos podem ser:

- Regular a drenagem de água não dissolvida no dreno instalado no ponto mais baixo do reservatório do fluido. Portanto, um bom projeto do reservatório é importante.
- O fluido hidráulico deve ter boa demulsificação.
- Utilizar elementos filtrantes capazes de remover quantidades limitadas de água livre nos fluidos hidráulicos. Esta não é, contudo, uma solução econômica para sistemas sujeitos a contaminação contínua por quantidades significativa de água, como os sistemas hidráulicos com fluidos biodegradáveis

#### A.7 LUBRIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS ANTI-DESGASTE.

O fluido hidráulico deve ser capaz de cobrir as superfícies de contato de todas as partes móveis como uma película lubrificante fina e contínua. O filme de lubrificação pode ser destruído, como resultado de forças de carga elevada, óleo insuficiente ou por baixa viscosidade. Isso poderia resultar em desgaste devido ao efeito corrosivo. O poder de lubrificação e a força da película de um fluido estão diretamente relacionados à sua natureza química e pode ser melhorado com a adição de determinados agentes químicos. Além do desgaste devido à corrosão, existe também o desgaste devido à fadiga, abrasão e corrosão.

#### A.8 ESTABILIDADE QUÍMICA

É uma propriedade importante do fluido hidráulico. É definida como a capacidade do fluido para resistir à oxidação e a deterioração por longos períodos. Todos os líquidos tendem a sofrer mudanças desfavoráveis nas condições de funcionamento grave. Alguns metais, como zinco, chumbo, bronze e cobre, tem reações químicas indesejáveis com certos líquidos. Estas reações resultam na formação de lodo, gomas, carvão ou outros, que obstruem os orifícios de válvulas e pistões. A estabilidade de líquidos pode ser melhorada pela adição de inibidores de oxidação, que deve ser compatível com as outras propriedades necessárias do líquido.

#### A.9 ESTABILIDADE QUÍMICA À OXIDAÇÃO

É a capacidade do fluido para resistir à degradação química por reação com o oxigênio atmosférico. É um critério extremamente importante quanto à qualidade dos fluidos hidráulicos, particularmente

em aplicações de alta temperatura. Ela determina a resistência ao envelhecimento. A degradação dos fluidos hidráulicos por oxidação pode resultar em aumento significativo da viscosidade, o desenvolvimento de ácidos orgânicos corrosivos, e de lacagem de superfícies críticas por produtos de oxidação resinosos. Para evitar tais ocorrências, são também empregados aditivos destinados a isolar as partículas de água das superfícies metálicas e inibidores de ferrugem.

#### A.10 PROPIEDADES ANTI-DESGASTE

As propriedades do anti-desgaste são medidas pelo ensaio da ASTM D-4172. Três bolas de aço inoxidável são colocadas no recipiente de ensaio cobertas com o fluido de teste. Uma bola é colocada no topo das três esferas através de um mandril com uma rotação de 1800 rot/min por uma hora. A temperatura do recipiente de ensaio é mantida a 75°C durante o ensaio. Após o teste, um microscópio apropriado inspeciona as cicatrizes das três esferas de aço para desgaste, que são medidos em milímetros. A cicatriz de menor diâmetro é uma indicação de melhor propriedade anti-desgaste. Os óleos vegetais, poliésteres e PAG são considerados com excelentes propriedades anti-desgaste. A Figura A.4 descreve o desempenho anti-desgaste de fluidos no teste Four-Ball.

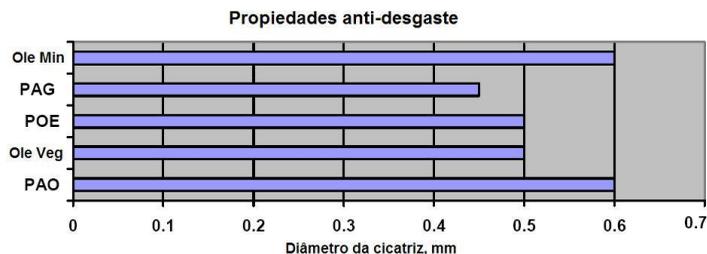


Figura A.4 Comparação da propriedade de anti-desgaste (adaptado de HAMID (2008))

#### A.11 CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS BIODEGRADÁVEIS

As considerações ambientais, incluindo a segurança das pessoas que lidam com o fluido hidráulico através de seu curso de vida, são fatores críticos na escolha de um produto. Estas grandes restrições na escolha de um fluido não podem ser substituídas por quaisquer

considerações de desempenho ou custo. Geralmente, um fluido hidráulico sintético deve ser seguro e benéfico para o ambiente, tanto quando novo e após a decomposição.

A possibilidade de medir o impacto ambiental dos fluidos pode ser feito a traves de vários testes. Esta questão é se diferenciar em testes sobre a biodegradabilidade no ambiente natural (solo, água) e na medição do potencial ecotoxicológico que está em função da saúde da vida, seja na água, solo ou ar.

O fluido hidráulico é geralmente trocado em intervalos fixos, com base na experiência do fabricante e do sistema. Uma abordagem mais sofisticada é colher amostras para análise laboratorial em intervalos regulares de tempo. Assim, os parâmetros do óleo como viscosidade, acidez, teor de aditivo e da contaminação com água e elementos de desgaste são determinadas. Isto permite avaliar o estado do óleo e sugerir medidas de manutenção, incluindo uma mudança de óleo, se necessário. Análise laboratorial, no entanto, não é barata e, portanto, é só aplicada para equipamentos com volumes grandes de óleo e / ou equipamentos onde se exige maior confiabilidade. Mas mesmo assim, continua a haver um intervalo de tempo entre os resultados recentes de laboratório e real condição do óleo.

Esta seção fornecerá uma visão geral da caracterização de um fluido biodegradável em função da suas propriedades ambientais, tais como a biodegradabilidade e toxicidade.

### **A.11.1 Biodegradabilidade**

Preocupações crescentes sobre o impacto de derrames de petróleo criou novos interesses para os fluidos hidráulicos ambientalmente seguros. Muitos fabricantes de equipamentos começaram buscando fluidos em resposta às mais exigentes normas ambientais. Por isto foram concebidos fluidos biodegradáveis e não tóxicos para ter menos impacto ao longo prazo sobre o ambiente no caso de uma derrame acidental. Para avaliar a degradação do fluido no meio ambiente, ensaios de biodegradabilidade foram desenvolvidos para prever o processo de degradação no meio ambiente.

A biodegradabilidade é definida segundo duas denominações amplamente divulgadas, facilmente biodegradável e biodegradabilidade inerente. Facilmente biodegradável é definida pela ASTM D6046-2 (ASTM, 2006) como a degradação de 60% do fluido no prazo de 28 dias ou degradação mínima de 60% em 28 dias segundo o método da norma européia OCDE 301 (OECD, 1984).

Biodegradabilidade inerente é definida como tendo propensão para biodegradabilidade para qualquer tempo ou grau. Na realidade, alguns fluidos minerais podem resistir durante anos e continuam a causando danos substanciais ao ambiente.

Harold (1993) apresentou um resumo dos valores típicos de biodegradabilidade para fluidos em função de ensaios feitos utilizando a norma CEC L-33-T-82.

Já Henke (1994 apud Totten, 2000, p443) fornece uma comparação da biodegradabilidade de diferentes fluidos (Figura A.5). Já In-Sik (2008) mostra dados de comparações mais atuais da biodegradabilidade de fluidos com base vegetal utilizados em aplicações militares (Figura A.6).

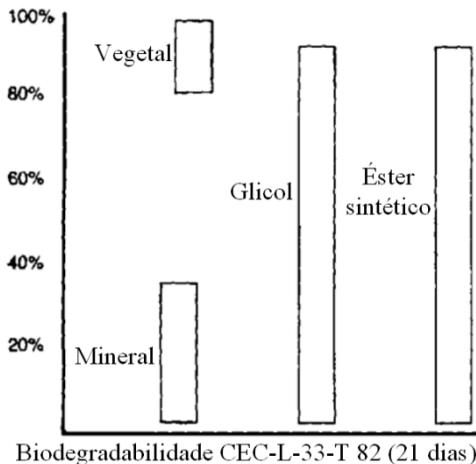


Figura A.5 Comparação da biodegradabilidade de fluidos (adaptado de HENKE, 1994)

Uma série de testes padrões de biodegradabilidade têm sido desenvolvidos para avaliar a biodegradabilidade de fluidos. Estes ensaios foram concebidos para determinar o grau de biodegradabilidade aeróbica aquática de lubrificantes, ou de seus componentes, em condições controladas de laboratório. Todos estes testes podem medir a biodegradabilidade dos fluidos baseando-se no do consumo de oxigênio ou a produção de dióxido de carbono de microrganismos.

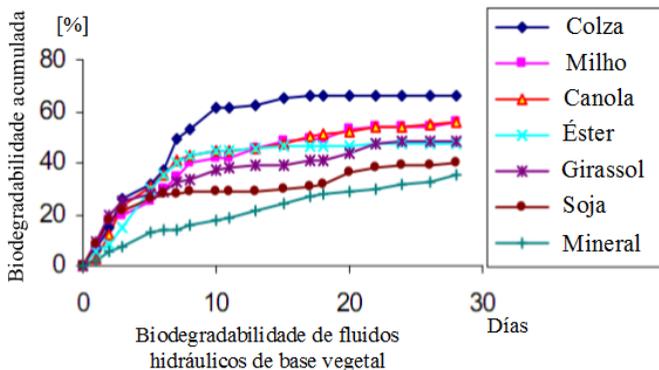


Figura A.6 Biodegradabilidade de bio-óleos hidráulicos. (adaptado de IN-SIK (2008))

Recentemente, uma comissão da ASTM desenvolveu vários métodos de ensaios de biodegradabilidade, os quais alguns são baseados no mesmo princípio aos ensaios na norma OCDE.

- ASTM D 5864 (similar à norma OECD 301B), Determining Aerobic Aquatic Biodegradation of Lubricants or Their Components.
- ASTM 6731 (similar à norma OECD 301F), Determining the Aerobic Aquatic Biodegradability of Lubricants or Lubricant Components in a Closed Respirometer.
- ASTM D 7373, Predicting Biodegradability of Lubricants Using a Bio-kinetic Model.
- ASTM D 6139, Determining the Aerobic Biodegradation of Lubricants or Their Components Using the Gledhill Shake Flask.

### A.11.2 Ecotoxicidade

Toxicidade (ecotoxicidade) pode ser definida como a tendência de que têm uma substância para produzir problemas bioquímicos e efeitos fisiológicos em um organismo vivo. Estes problemas incorporam tanto o efeito agudo e crônico, mas não inclui efeitos físicos.

O emprego de testes de toxicidade permite avaliar os possíveis impactos que talvez a simples caracterização física e química de água contaminada com fluido hidráulico não revele. Os testes conhecidos como “testes ecotoxicológicos” estudam os efeitos adversos das substâncias tóxicas, principalmente, sobre os ecossistemas aquáticos.

O fluidos de base tem que ser não-tóxicos para ser ecologicamente adaptáveis. Alguns estudos tem mostrado que as propriedades toxicológicas de fluidos totalmente formulados estão relacionadas com a base do fluido e seus aditivos. A toxicidade geralmente é a soma da toxicidade dos componentes e/ou aditivos.

A toxicidade pode ser medida de várias maneiras. O ensaio mais reconhecido e utilizado nos Estados Unidos é o ensaio de toxicidade aguda para dâfnias e trutas. Este teste mede a concentração letal do produto (fluido) na água que vai matar 50% dos peixes dentro de 96 horas. Quanto menor é a concentração, o lubrificante ou fluido hidráulico é mais tóxico. Para ser chamado de não tóxica, a concentração deve ser superior a 100 mg / litro.

Há uma serie de testes para medir a toxicidade de um ambiente aquático ou no solo. Alguns de estes testes são:

- OCDE 201 - Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test
- OCDE 202 - Daphnia sp., Acute Immobilisation Test and Reproduction Test
- OCDE 203 - Fish, Acute Toxicity Test
- AFNOR NFT 349
- ASTM D6081 Toxicity Studies – Daphnia Magna for aquatic toxicity.

Dados comparativos sobre a toxicidade em vários fluidos hidráulicos biodegradáveis foram apresentados por Cheng *et al.* (2001). Estes dados são expressos na forma LCXX, onde XX é a concentração letal em porcentagem para causar a morte dos organismos do ensaio, e estão resumidos na Tabela A.1.

Tabela A.1 Comparação de toxicidade de fluidos hidráulicos (adaptado de CHENG et al. (2001)).

<b>Fluido base</b>	<b>Truta LC<sub>50</sub></b>
Mineral	389->5000
Vegetal	633->5000
Poliglicol	850000->
Éster sintético	>5000

### **A.11.3 Estabilidade térmica à oxidação**

A estabilidade à oxidação é a resistência de um fluido hidráulico para a degradação induzida pelo calor causado por uma reacção química com o oxigénio. Normlamente, os fluidos hidráulicos devem conter

aditivos que neutralizam o processo de oxidação, para melhorar a estabilidade e prolongar a vida útil do fluido. Sem esses aditivos, a qualidade do fluido irá deteriorar-se rapidamente.

A estabilidade à oxidação de fluidos biodegradáveis tem sido melhorada através de modificação genética, a qual podem aumentar a estabilidade, reduzindo o nível de ácidos graxos insaturados no fluido. Segundo Fox and Stachowiak (2007), a estabilidade pode ser aumentada através da modificação química da estrutura do fluido através de técnicas como mistura, interesterificação hidrogenação, epoxidação. Após a modificação do óleo de base, a estabilidade da fórmula também pode ser melhorada com a adição de antioxidantes.

O teste utilizado para determinar a estabilidade à oxidação dos fluidos sob a influência ou não de um catalisador é o RPVOT test descrito na seção 4.1.1.

#### **A.11.4 Estabilidade térmica a hidrolise**

Quando fluidos hidráulicos entram em contacto com água, esta pode interagir com a base do fluido hidráulico, resultando na formação de ácidos. Os fluidos hidráulicos que possuem baixa estabilidade hidrolítica tendem a formar sais inorgânicos insolúveis dentro do sistema hidráulico, tendo efeitos como bloqueio de filtros e válvulas. Para combater este problema, fluidos hidráulicos são fabricados contendo aditivos resistentes à interação com água, ajudando a prolongar a vida útil do equipamento.

### **A.12 COMPATIBILIDADE COM VEDAÇÕES**

A maioria dos sistemas hidráulicos utiliza vedações de borracha e outros elastômeros para minimizar ou prevenir a perda de fluido hidráulico. A exposição de algumas vedações aos fluidos hidráulicos, em condições de alta temperatura, pode causar endurecimento ou falha nas vedações e, eventualmente, o vazamento do fluido.

Os fluidos hidráulicos são testados contra uma variedade de materiais de vedação para garantir este será compatível com vedações sob várias condições. De forma geral, vedações NBR (borracha nitrílica) ou FPM (Vitón) são usadas como material de fabricação de vedações estáticas ou dinâmicas. Para fluidos hidráulicos de potência em geral (base mineral) ambos os materiais são adequados, mas para alguns fluidos hidráulicos biodegradáveis é adequado o uso de só um tipo de material. A compatibilidade de vedações (material de fabricação) com os diferentes tipos de fluidos biodegradáveis é analisada na seção 5.4.7.

**B. BASE DE DADOS DE FLUIDOS HIDRÁULICOS  
BIODEGRADÁVEIS COMERCIAIS**

	<b>Fluido 1</b>	<b>Fluido 2</b>	<b>Fluido 3</b>	<b>Fluido 4</b>
<b>Tipo de fluido</b>	HEES-Tipo Ester Sintetico	HEES-Tipo Ester Sintetico	HEES-Tipo Ester Sintetico	HEES-Tipo Ester Sintetico
<b>Nome comercial</b>	Syntefluid N	Hydrostar HEP	BioHyd SE-S	Planthyd S
<b>Fabricante</b>	Avia	Bechem	BP	Fuchs
<b>Tipo de aplicação</b>	Simulação e carregamento Mineração Industria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeireira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Industria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeireira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Industria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeireira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Industria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeireira Máquinas agrícolas
<b>Grau de viscosidade disponível</b>	22- 32 -46 -68	22 - 32 - 46 -68	23 - 32 - 46 -68	22 - 32 - 46 -68
<b>Índice de viscosidade VI</b>	-	175(32)	180(46) - 180(68)	191(22) - 188(32) - 186(46) - 177(68)
<b>Compatibilidade de vedações</b>	NBR, FPM, AU, HNBR			
<b>Rotulos</b>	Blue Angel - (Alemanha) Eco-label trees - (EU) Japanese Eco Market - (Jápnão)	Blue Angel (Alemanha) White Swan - (Escandinavia) Japanese Eco Market - (Jápnão)	Blue Angel (Alemanha)	Blue Angel (Alemanha) (22 e 46) Eco-label trees - (EU) (22 e 46)
<b>Contato água</b>	sim: <0.1%	sim: <0.1%	sim: <0.1%	sim: <0.1%
<b>Contato outros fluidos</b>	sim: <2% óleo mineral			
<b><i>t minop</i> (°C)</b>	-30	-30	-30	-35
<b><i>t maxop</i> (°C)</b>	90	90	90	90
<b><i>p maxop</i> (bar)</b>	210	210	210	210
<b>Nível de biodegradabilidade</b>	>90% (CEC-L-33-A-93)	>70% (OECD 301 F)	>85% (CEC-L-33-A-93)	>60% (OECD 301 B)
<b>Nível de toxicidade</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
<b>Estabilidade á oxidação</b>	Alta	Alta	Alta	Alta
<b>Estabilidade á hidrólise</b>	Alta	Alta	Alta	Alta
<b>Propriedades anti-degaste</b>	-	FZG 12	FZG >12	FZG >13
<b>Classe de pureza (ISO 4406)</b>	19/16/13	19/16/13	19/16/13	19/16/13

	<b>Fluido 5</b>	<b>Fluido 6</b>	<b>Fluido 7</b>	<b>Fluido 8</b>
<b>Tipo de fluido</b>	HEES-Tipo Ester Sintetico	HEES-Tipo Ester Sintetico	HEES-Tipo Ester Sintetico	HETG-Tipo Triglicérido (vegetal)
<b>Nome comercial</b>	Biohyd MS	Panolin HLP Synth	NATURELLE HF-E	Biohyd
<b>Fabricante</b>	Omv	Panolin	Shell	BP
<b>Tipo de aplicação</b>	Simulação e carregamento Mineração Indústria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Indústria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Indústria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Indústria têxtil Robótica Hidrelétricas Indústria madeira Máquinas agrícolas
<b>Grau de viscosidade disponível</b>	32 - 46 - 68	22 - 32 - 46 - 68	32 - 46	32 - 46
<b>Índice de viscosidade VI</b>	157(32) - 187(46) - 211(68)	140(22) - 141(32) - 146(46) - 153(68)	156(32) - 182(46)	210 (32 e 46)
<b>Compatibilidade de vedações</b>	NBR, FPM, AU, HNBR	NBR, FPM, AU, HNBR	NBR, FPM, AU, HNBR	NBR, FPM, AU, HNBR
<b>Rotulos</b>	-	Blue Angel: Alemanha Korea Eco-label: Coreia do sul Czech Eco-label: República Checa Japanese Eco Market: Japão Croatia Eco-label: Croácia	-	Blue Angel (Alemanha)
<b>Contato água</b>	sim: <0.1%	sim: <0.1%	sim: <0.1%	sim: <0.1%
<b>Contato outros fluidos</b>	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral
<b><i>t<sub>minop</sub></i> (°C)</b>	-35	-30	-30	-20
<b><i>t<sub>maxop</sub></i> (°C)</b>	90	90	90	80
<b><i>p<sub>maxop</sub></i> (bar)</b>	210	210	210	170
<b>Nível de biodegradabilidade</b>	>90% (CEC-L-33-A-93)	≈ 70% (OECD 301 B)	≈76% (OECD 301 B)	>97% (CEC-L-33-A-93)
<b>Nível de toxicidade</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
<b>Estabilidade á oxidação</b>	Alta	Alta	Alta	Baixo
<b>Estabilidade á hidrólise</b>	Alta	Alta	Alta	Baixo
<b>Propriedades anti-desgaste</b>	FZG >10	FZG 12	FZG >12	FZG >12
<b>Classe de pureza (ISO 4406)</b>	19/16/13	19/16/13	19/16/13	19/16/13

	<b>Fluido 9</b>	<b>Fluido 10</b>	<b>Fluido 11</b>	<b>Fluido 12</b>
<b>Tipo de fluido</b>	HETG-Tipo Triglicerido (vegetal)	HETG-Tipo Triglicerido (vegetal)	HETG-Tipo Triglicerido (vegetal)	HETG-Tipo Triglicerido (vegetal)
<b>Nome comercial</b>	Plantohyd N	Biohyd M	BioSafe HO 32 NE	Biotec HVX 32
<b>Fabricante</b>	Fuchs	Omv	Raíso	Castrol
<b>Tipo de aplicação</b>	Simulação e carregamento Indústria têxtil Robótica Hidrelétricas Indústria madeireira Máquinas agrícolas			
<b>Grau de viscosidade disponível</b>	32 - 46 - 68	32 - 46 - 68	32 - 68	32
<b>Índice de viscosidade VI</b>	213(32) - 215(46) - 207(68)	218(46)	220(32)	200(32)
<b>Compatibilidade de vedações</b>	NBR, FPM, AU, HNBR			
<b>Rotulos</b>	Blue Angel (Alemanha)	-	-	-
<b>Contato água</b>	simr <0.1%	simr <0.1%	simr <0.1%	simr <0.1%
<b>Contato outros fluidos</b>	simr <2% óleo mineral			
<b><i>t minop</i> (°C)</b>	-27	-20	-20	-10
<b><i>t maxop</i> (°C)</b>	70	70	70	65
<b><i>p maxop</i> (bar)</b>	170	170	170	150
<b>Nível de biodegradabilidade</b>	>90% (CEC-L-33-A-93)	>98% (CEC-L-33-A-93)	>80% (OECD 301 F)	>90% (CEC-L-33-A-93)
<b>Nível de toxicidade</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
<b>Estabilidade á oxidação</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
<b>Estabilidade á hidrólise</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
<b>Propriedades anti-desgaste</b>	FZG >12	-	-	FZG >12
<b>Classe de pureza (ISO 4406)</b>	19/16/13	19/16/13	19/16/13	19/16/13

	<b>Fluido 13</b>	<b>Fluido 14</b>	<b>Fluido 15</b>	<b>Fluido 16</b>
<b>Tipo de fluido</b>	HETG-Tipo Triglicerido (vegetal)	HETG-Tipo Triglicerido (vegetal)	HEPG-Tipo Poliglicol	HEPG-Tipo Poliglicol
<b>Nome comercial</b>	MobilEAL 224H	Biotec Alpin	Hydrosynth	Hydrostar UMF
<b>Fabricante</b>	Mobil	Castrol	Avia	Bechem
<b>Tipo de aplicação</b>	Simulação e carregamento Indústria têxtil Robótica Hidrelétricas Indústria madeira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Indústria têxtil Robótica Hidrelétricas Indústria madeira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Manufatura Hidrelétricas Marinha Indústria madeira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Manufatura Hidrelétricas Marinha Indústria madeira Máquinas agrícolas
<b>Grau de viscosidade disponível</b>	32	22	22 - 32 - 46 - 68	22 - 36 - 46
<b>Índice de viscosidade VI</b>	212(32)	200(22)	-	-
<b>Compatibilidade de vedações</b>	NBR, FPM, AU, HNBR	NBR, FPM, AU, HNBR	NBR, FPM, HNBR	NBR, FPM, HNBR
<b>Rotulos</b>	-	-	-	-
<b>Contao água</b>	sim: <0.1%	sim: <0.1%	sim: <0.5%	sim: <0.5%
<b>Contato outros fluidos</b>	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral
<b><i>t<sub>minop</sub></i> (°C)</b>	-15	-33	-30	-20
<b><i>t<sub>maxop</sub></i> (°C)</b>	80	90	90	80
<b><i>p<sub>maxop</sub></i> (bar)</b>	150	150	180	180
<b>Nível de biodegradabilidade</b>	>70% (EPA 560/6-82-003)	-	-	-
<b>Nível de toxicidade</b>	Baixo	Baixo	Alto	Alto
<b>Estabilidade á oxidação</b>	Baixo	Baixo	Alta	Alta
<b>Estabilidade á hidrólise</b>	Baixo	Baixo	Alta	Alta
<b>Propriedades anti-desgaste</b>	FZG >12	FZG >12	-	-
<b>Classe de pureza (ISO 4406)</b>	19/16/13	19/16/13	19/16/13	19/16/13

	<b>Fluido 17</b>	<b>Fluido 18</b>	<b>Fluido 19</b>	<b>Fluido 20</b>
<b>Tipo de fluido</b>	HEPG-Tipo Poliglicol	HEPG-Tipo Poliglicol	HEPR-Tipo Polialfaolefinas	HEPR-Tipo Polialfaolefinas
<b>Nome comercial</b>	Biohyd PEG	RendiolPGE	EnviroLogic® 3032	SYNTOFLLUID PE-B 50
<b>Fabricante</b>	BP	Fuchs	Terresolve	Avia
<b>Tipo de aplicação</b>	Simulação e carregamento Mineração Manufatura Hidrelétricas Marinha Indústria madeireira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Manufatura Hidrelétricas Marinha Indústria madeireira Máquinas agrícolas	Simulação e carregamento Mineração Indústria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeireira	Simulação e carregamento Mineração Indústria têxtil Indústria do plástico Manufatura Robótica Hidrelétricas Marinha Maquinas construção civil Indústria madeireira
<b>Grau de viscosidade disponível</b>	32 - 46	32 - 46	32	46
<b>Índice de viscosidade VI</b>	220(32) - 222(46)	194(32) - 203(46)	190	191(46)
<b>Compatibilidade de vedações</b>	NBR, FPM, HNBR	NBR, FPM, HNBR	NBR, FPM, HNBR	NBR, FPM, HNBR
<b>Rotulos</b>	Blue Angel (Alemanha)	-	Eco-kibel trees (EU)	White Swan (Escandinávia)
<b>Contao água</b>	sim: <0.5%	sim: <0.5%	sim: <0.1%	sim: <0.1%
<b>Contato outros fluidos</b>	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral	sim: <2% óleo mineral
<b><i>t<sub>minop</sub></i> (°C)</b>	-20	-20	-35	-35
<b><i>t<sub>maxop</sub></i> (°C)</b>	80	80	80	80
<b><i>p<sub>maxop</sub></i> (bar)</b>	180	180	210	210
<b>Nível de biodegradabilidade</b>	>90% (CEC-L-33-A-93)	-	>90% (CEC-L-33-A-93)	>90% (CEC-L-33-A-93)
<b>Nível de toxicidade</b>	Alto	Alto	Baixo	Baixo
<b>Estabilidade á oxidação</b>	Alta	Alta	Alta	Alta
<b>Estabilidade á hidrólise</b>	Alta	Alta	Alta	Alta
<b>Propriedades anti-desgaste</b>	FZG >12	FZG >12	FZG >12	FZG >12
<b>Classe de pureza (ISO 4406)</b>	19/16/13	19/16/13	19/16/13	19/16/13

## **C. ARVORES DE DECISÃO DAS PRINCIPAIS REGRAS**

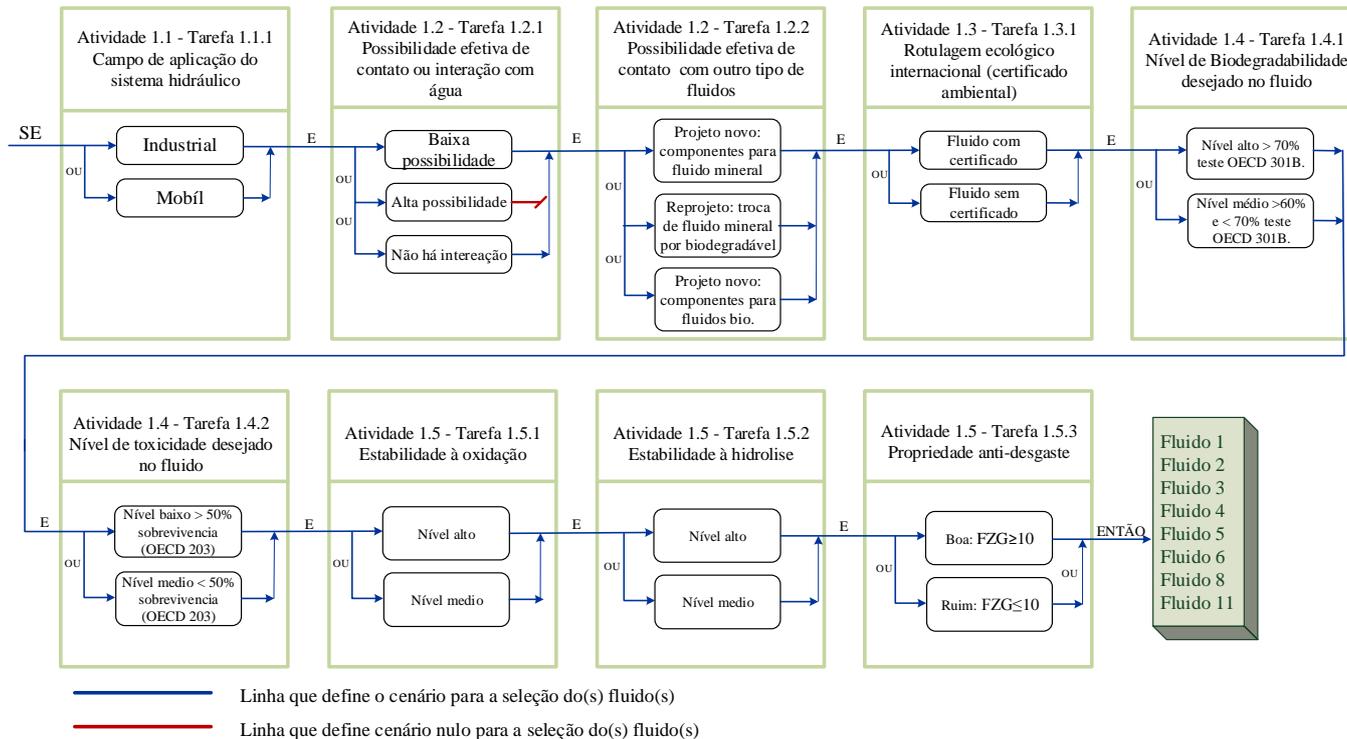


Figura C1. Arvore de decisão 1 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos (continua)

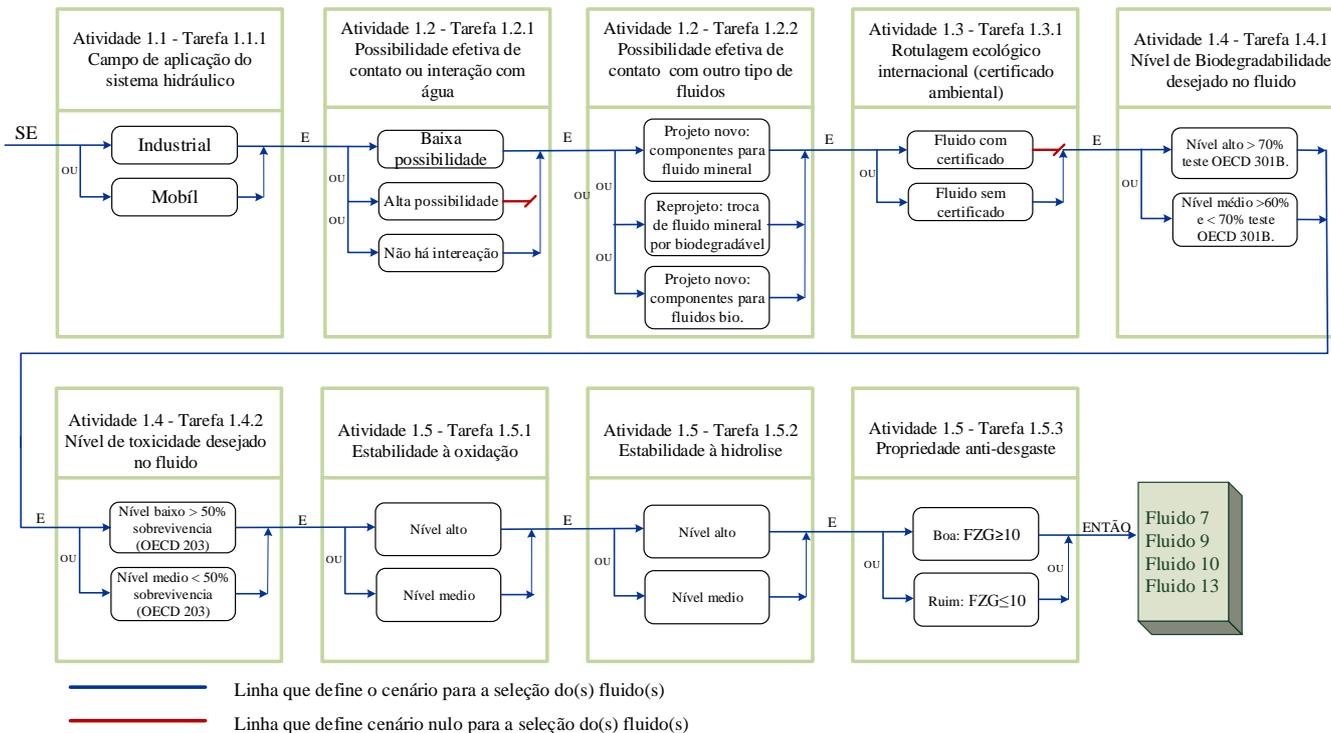


Figura C2. Arvore de decisão 2 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos

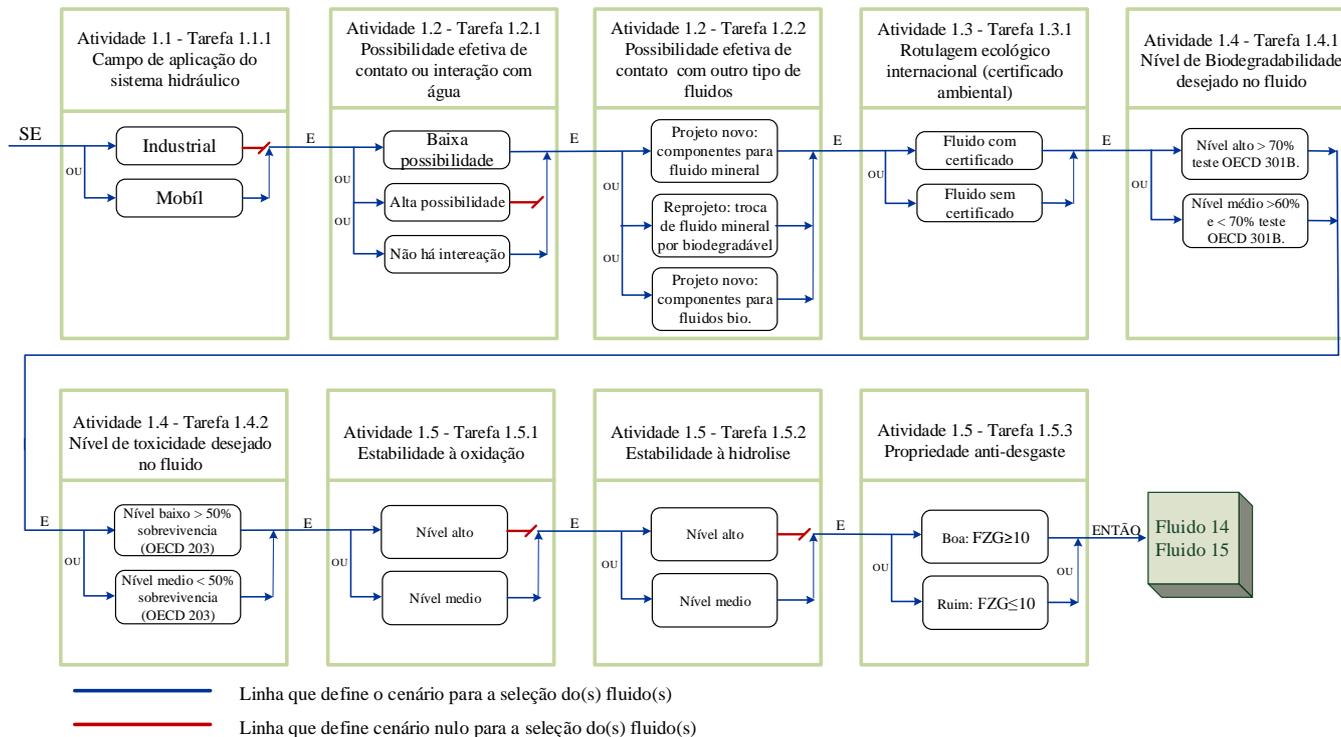


Figura C3. Arvore de decisão 3 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos

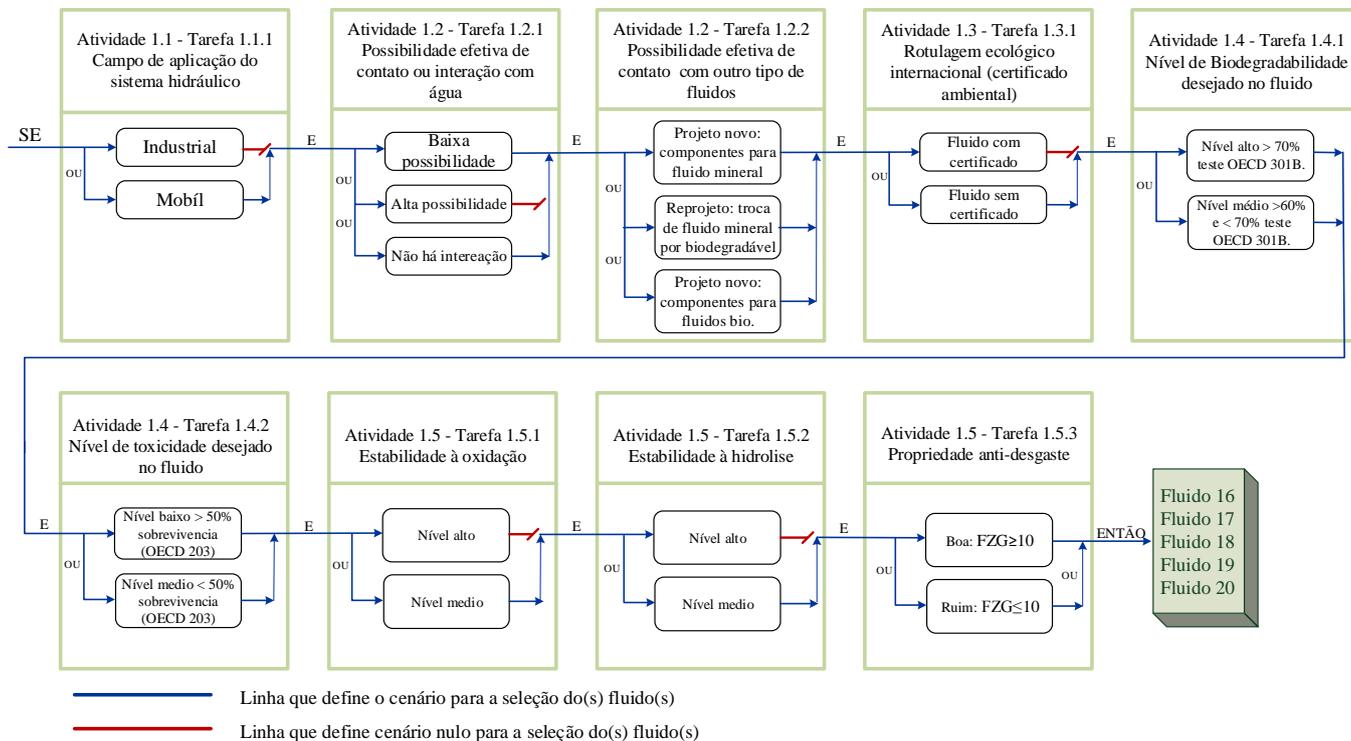


Figura C4. Arvore de decisão 4 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos

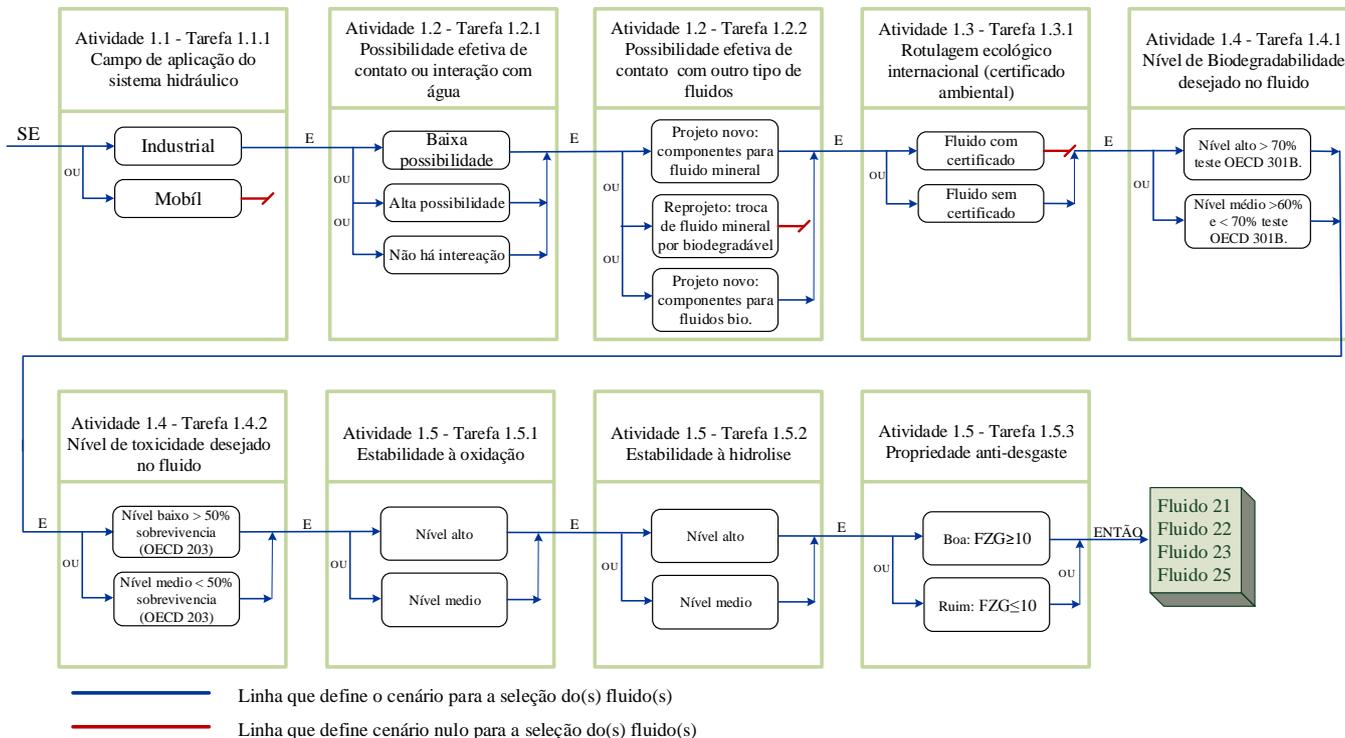


Figura C5. Arvore de decisão 5 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos

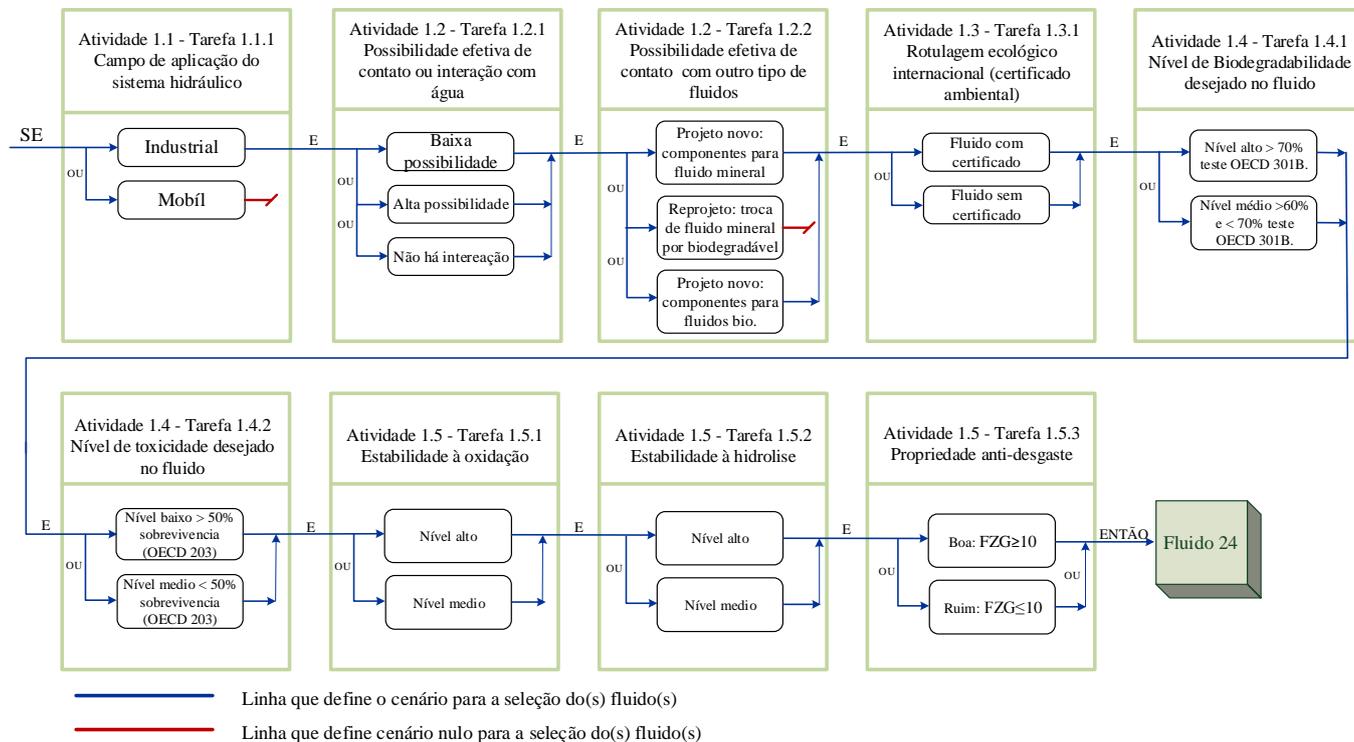


Figura C6. Arvore de decisão 6 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos

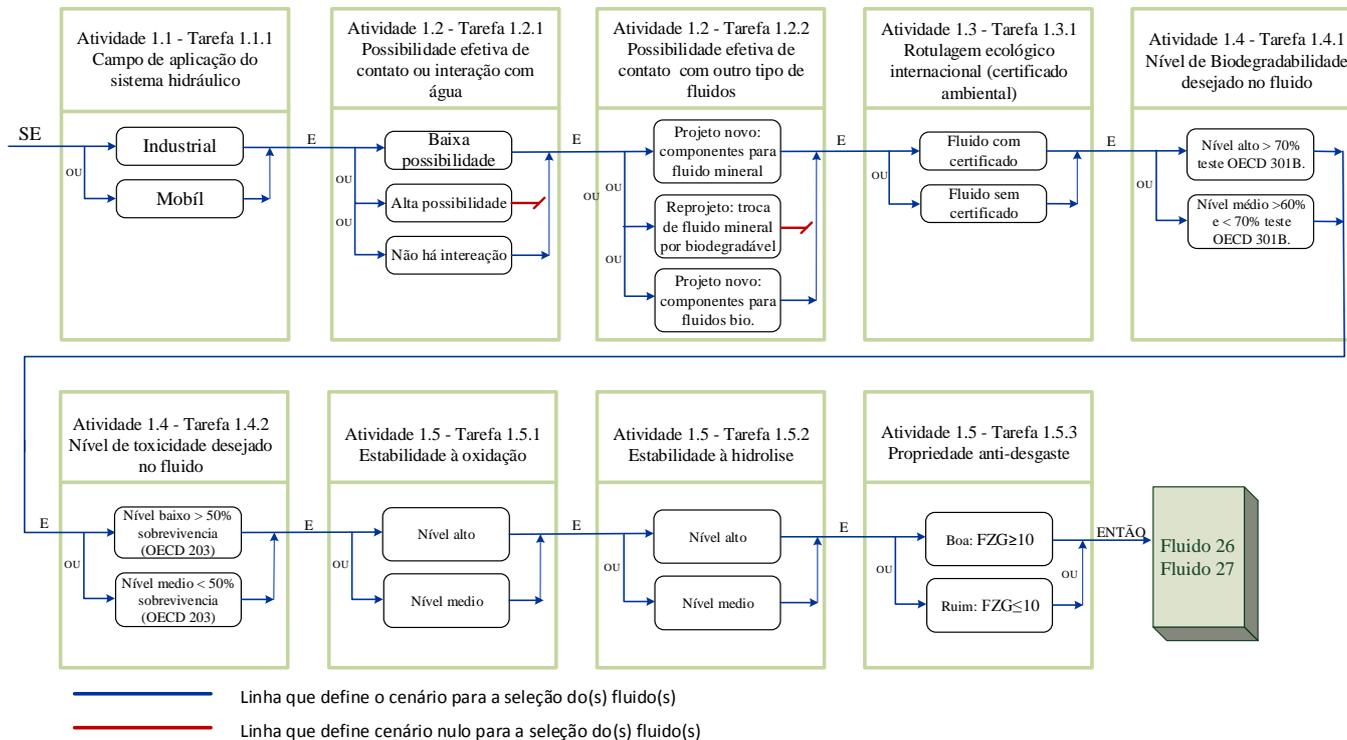


Figura C7. Arvore de decisão 7 que define cenários possíveis para a seleção de fluidos

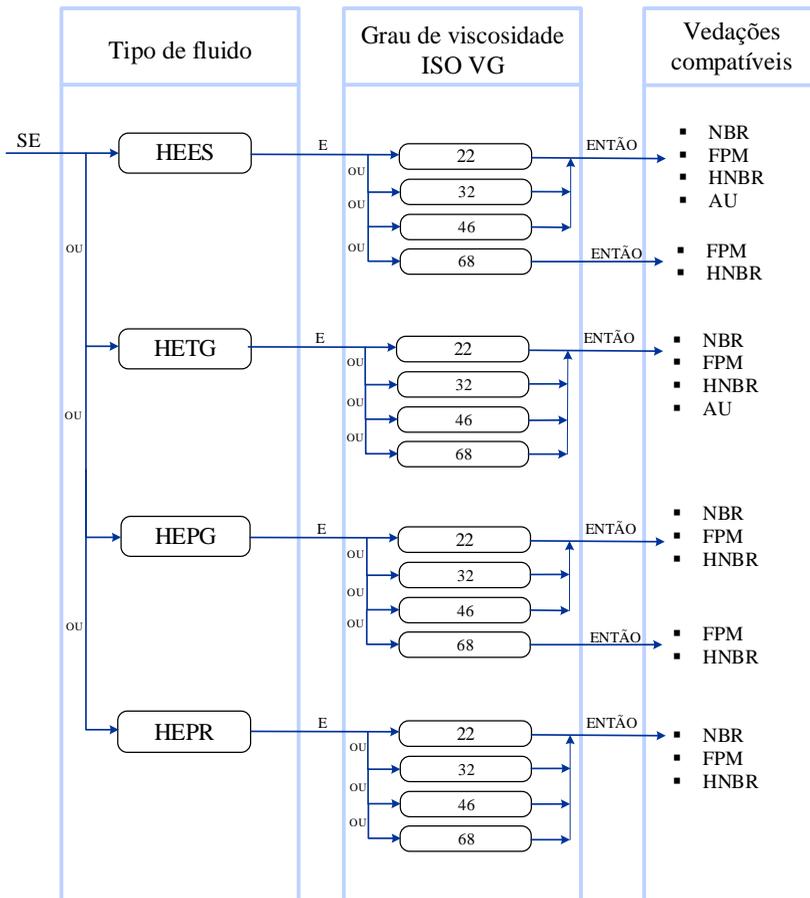


Figura C8. Arvore de decisão das regras que definem a compatibilidade de vedações com fluidos biodegradáveis

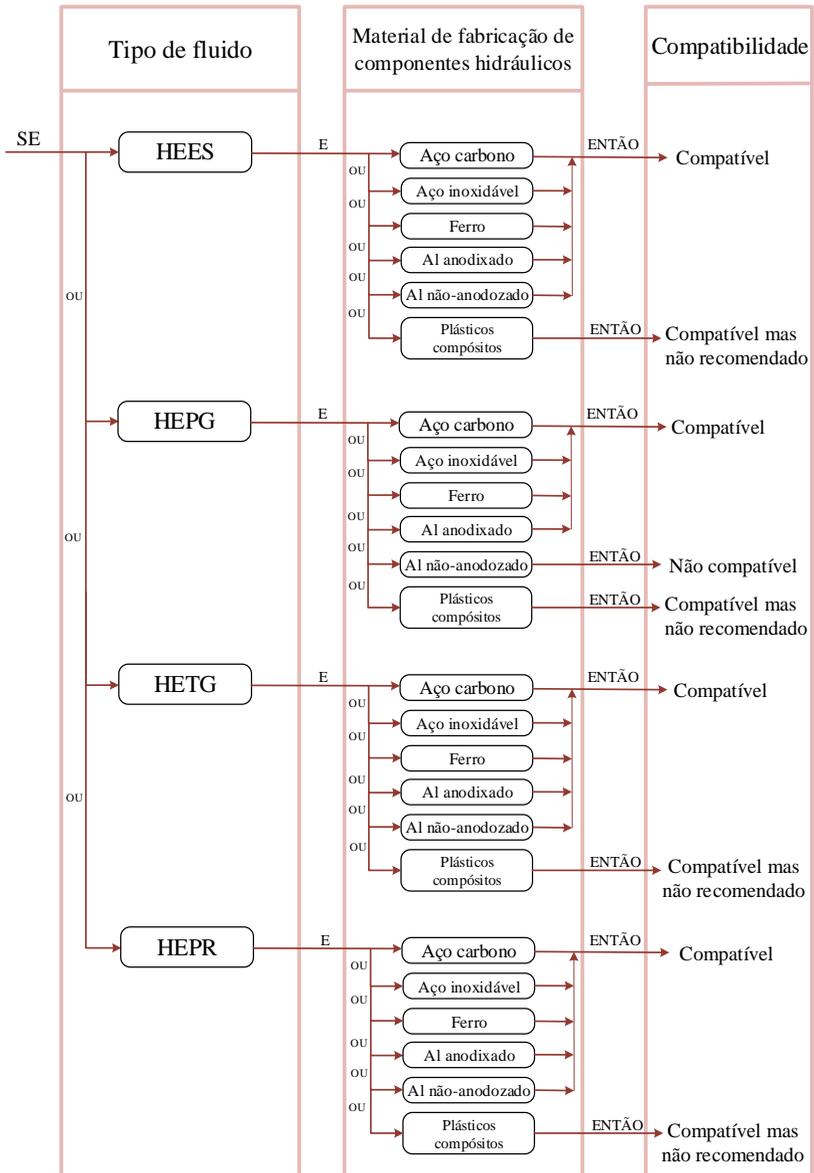


Figura C9. Arvore de decisão das regras que definem a compatibilidade de materiais de fabricação com fluidos biodegradáveis

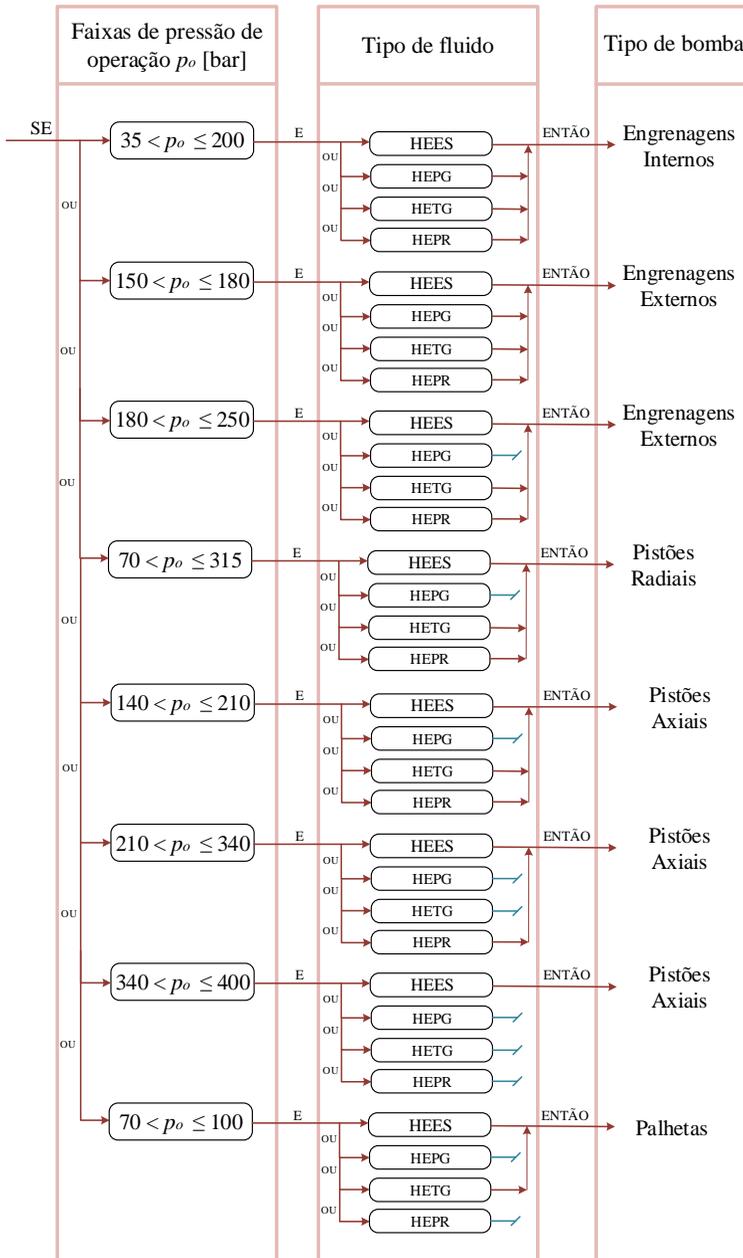


Figura C10. Árvore de decisão das regras que selecionam o tipo de bomba hidráulica

## **D. QUESTIONARIO DE VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO**



## Systematization of Hydraulic System Design with Biodegradable Fluids SHBIO



### VALIDATION FORM

The purpose of this questionnaire is to validate the computational tool called SHBIO (Systematization of Hydraulic System Design with Biodegradable Fluids).

To facilitate analysis, the proposed prototype is validated under specific criteria related to the inference engine, as well as, the general aspects attached to the application and design of the SHBIO. Please, answer the following questions according to the alternative that best expresses your opinion and, if necessary, makes relevant comments to validate the SHBIO.

Each validation criteria proposed has a scale of 1 to 5, where:

Very good = 5  
 Good = 4  
 Normal = 3  
 Bad = 2  
 Very bad = 1

Name \*

1. Clarity of the questions - verify if the questions assists the correct understanding by the user. \*

1 2 3 4 5

Comments

2. Clarity of the answers - checks if the answers assists the correct understanding by the user. \*

1 2 3 4 5

Comments

**3. Objectivity and quality of the questions** - checks the reliability of informations in the questions in relation to subject investigated. \*

1 2 3 4 5



**Comments**

**4. Objectivity and quality of answers** - checks the reliability of informations in the answers in relation to subject investigated. \*

1 2 3 4 5



**Comments**

**5. Reliability of responses** - Checks the set of attributes that bear on the capability of software to maintain its level of performance under stated conditions for a stated period of time. \*

1 2 3 4 5



**Comments**

**6. Changeability** - verifies the effort required to modify the code, remove errors, and substitute components. \*

1 2 3 4 5



**Comments**

7. The final report is presented in a clear, objective, organized way and correct according to results and conclusions of the inference process. \*

1 2 3 4 5



Comments

8. How do you describe the system in terms of its user interface? (Final report, Input information, explanations, help facilities, etc.) \*

9. The prototype presented some runtime error? (please, inform the error)

10. In your opinion, what are the strongest point in this system? \*

11. In your opinion, what are the weakest points in this system? \*

12. Please, state your general comments about this system.

Send form

## **E. MANUAL DO PROTÓTIPO – CLIPS**

Este apêndice é um “manual de instruções” do sistema especializado desenvolvido. Estão aqui apresentadas as instruções de instalação do protótipo SHBIO, tais quais descritas no arquivo de ajuda (*readme*) da pasta de instalação.

### **Instalação do SHBIO**

A instalação do protótipo SHBIO é feita a partir do arquivo de distribuição disponível em: [www.laship.ufsc.br](http://www.laship.ufsc.br). Neste arquivo estão incluídos o ambiente CLIPS, a base de conhecimento do protótipo SHBIO em arquivos com extensão .clp, um arquivo batch para carregar a base no CLIPS, um arquivo de ajuda (*readme*) e duas pastas com arquivos e figuras necessárias para a interface HTML. Apenas duas etapas devem ser seguidas para instalar o protótipo:

1. Criar um diretório em seu computador para copiar os arquivos do SHBIO (por exemplo, c:\shbio)
2. Faça o download do programa SHBIO disponível na página web citada anteriormente salvando, o mesmo, no Diretório (Pasta) criado em (1)
3. Descompactar o arquivo SHBIO.rar (o arquivo de distribuição) no diretório criado.

### **Uso do protótipo**

Finalizada a instalação, carrega-se a base de conhecimento do protótipo no CLIPS através dos seguintes passos:

1. Iniciar o programa CLIPS executando o arquivo clipswin.exe;
2. Carregar o arquivo batch (arquivo SHBIO.bat) no CLIPS, entrando no menu “File” e selecionando “Load Batch”, conforme mostrado na Figura E.1.

Se corretamente carregado, a tela de apresentação do protótipo SHBIO é mostrada ao usuário, conforme Figura E.2.

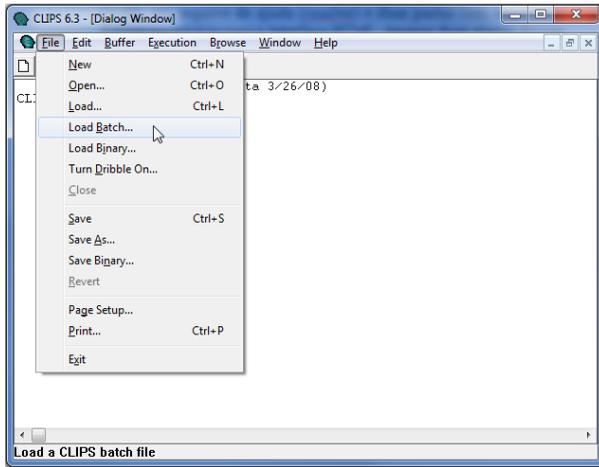


Figura E.1 Carregando o protótipo no ambiente CLIPS

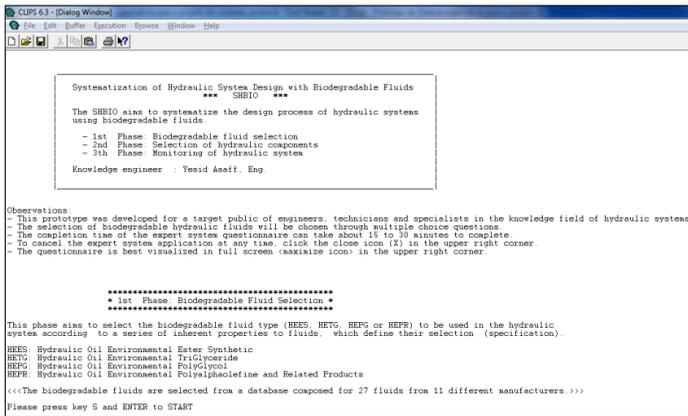


Figura E.2 Tela de apresentação do protótipo HBIO

### Interface com o usuário

Após a tela de apresentação, o protótipo SHBIO inicia as perguntas referentes aos requisitos de projeto para as três fases do sistema especialista. Todos os dados são inseridos através do teclado. No final de cada fase, o sistema informa ao usuário da geração de um arquivo html, o qual apresenta um relatório parcial da cada fase.

Completado todo o questionário, o sistema especialista apresenta uma mensagem ao usuário orientando-lo para acessar o arquivo chama-

do “Final\_report.html” que é salvo no mesmo diretório de instalação do protótipo. O usuário pode abrir este arquivo em qualquer navegador (Internet Explorer, Firefox ou Chrome) para ver o relatório final de todas as soluções do sistema especialista. Exemplo do arquivo de saída gerado pelo protótipo é apresentado na figura E.3

Depois da mensagem da geração dos arquivos de saída, o protótipo por fim pergunta ao usuário se ele deseja fazer uma nova consulta, ou se quer encerrar a seção aberta. Encerrando a seção, o sistema especialista pode ser novamente carregado seguindo os passos apresentados no começo desta seção.

<b>APPLICATION CIRCUIT</b>	
<b>Specification</b>	<b>Description</b>
<p>This question defines the hydraulic circuit which brings intrinsic a list of components that will be selected in the following activities. According to application field that you selected from 1st phase - Question 1, was defined a <b>Industrial</b> hydraulic circuit. The components list related to this circuit are:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reservoir</li> <li>▪ Heat exchanger</li> <li>▪ Accumulator</li> <li>▪ Filters</li> <li>▪ Hydraulic pump/motor</li> <li>▪ Actuation system (Cylinder, valve)</li> </ul> 	

Figura E.3 Tela de apresentação de soluções do arquivo de saída