

FERNANDO DE BRITO SANTOS

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DAS NOVAS  
TECNOLOGIAS E ARQUITETURAS PARA O SISTEMA  
ELÉTRICO AUTOMOTIVO**

Trabalho de Curso apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia  
Automotiva (Mestrado Profissional).

São Paulo  
2005

014



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Relatório de Defesa**

Relatório de defesa pública de Dissertação do(a) Senhor(a) Fernando de Brito Santos no Programa: Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 2 dias do mês de maio de 2005, realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Fernando de Brito Santos, apresentada para a obtenção do título de Mestre em Profissional - Área: Engenharia Automotiva, intitulada:

"Uma contribuição para a avaliação das novas tecnologias e arquiteturas para o sistema elétrico automotivo"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Vínculo do Docente	Síglia da Unidade	Resultado
Carlos Antonio França Sartori	Presidente	Docente Externo	Aprovado x
Jose Roberto Cardoso	Titular	EP	Aprovado x
Gabriel Felix Gueler	Titular	Docente Externo	Aprovado x
<b>Resultado Final:</b> x <i>Aprovado</i>			
<b>Parecer da Comissão Julgadora</b>			

Eu, Elisabete Aparecida F da Silva Ramos, Técnico Acadêmico, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as), São Paulo, aos 2 dias do mês de maio de 2005.

*Jose Roberto Cardoso*  
Jose Roberto Cardoso

*Gabriel Felix Gueler*  
Gabriel Felix Gueler

*Carlos Antonio França Sartori*  
Carlos Antonio França Sartori  
Orientador(a)

Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.  
Nos termos do artigo 110. do RG-USP, encaminhe-se o presente relatório à CPG, para homologação.

**FERNANDO DE BRITO SANTOS**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DAS NOVAS  
TECNOLOGIAS E ARQUITETURAS PARA O SISTEMA  
ELÉTRICO AUTOMOTIVO**

Trabalho de Curso apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Automotiva  
(Mestrado Profissional).

Área de Concentração:  
Sistemas de Potência  
Engenharia de Energia e Automação  
Elétricas

Orientador:  
Prof. Dr. Carlos Antonio França Sartori

São Paulo  
2005

Dedico essa obra aos meus pais e avós pelo constante apoio e incentivo aos meus estudos em todos os momentos de minha vida.

À Karina pela sensibilidade em entender a importância do meu trabalho, e pela compreensão nas muitas horas de convívio perdidas.

A todos os amigos da General Motors do Brasil pelo reconhecimento do esforço e motivação ao meu aperfeiçoamento técnico.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Antonio França Sartori pelas diretrizes precisas, pelo exemplo de dedicação e pela paciência em acompanhar este trabalho.

Ao Prof. Dr. José Roberto Cardoso e Prof. Dr. Ronaldo Breyne Salvagni e à General Motors do Brasil que possibilitaram o início desta jornada.

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE ABREVIATURAS

### RESUMO

### ABSTRACT

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>7</b>
2.1	Introdução .....	7
2.2	Considerações Gerais Sobre a Evolução do Sistema Elétrico em 6V / 7V CC e 12V / 14V CC .....	7
2.3	Aspectos Gerais dos Principais Trabalhos Relacionados ao Sistema Elétrico em 36V / 42V CC .....	10
2.3.1	Considerações Preliminares .....	11
2.3.2	Principais Aspectos Relacionados à Definição do Sistema Elétrico em 36V / 42V CC .....	11
2.3.3	Considerações Sobre a Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC na Adequação dos Componentes Elétricos Embarcados .....	16
2.3.3.1	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Alternadores e Motores Elétricos .....	18
2.3.3.2	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Motores Elétricos Pequenos .....	21
2.3.3.3	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nas Lâmpadas .....	23
2.3.3.4	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Cabos Elétricos .....	25
2.3.3.5	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Semicondutores .....	27
2.3.3.6	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Conversores CC- CC .....	30
2.3.3.7	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nas Baterias .....	32
2.3.3.8	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Fusíveis .....	35
2.3.3.9	Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Relés, Interruptores e Conectores .....	37
2.3.4	Considerações Sobre as Propostas de Arquiteturas para o Sistema Elétrico em 42V CC e CA.....	40

2.3.4.1	Propostas de Arquiteturas para o Sistema Elétrico em 42V CA.....	42
2.3.4.2	Propostas de Arquiteturas para o Sistema Elétrico em 42V CC.....	43
2.3.5	Considerações Sobre as Ferramentas Utilizadas como Auxílio no Desenvolvimento do Sistema Elétrico em 42V CC.....	46
2.3.6	A Expectativa Atual de Implementação do Sistema Elétrico em 42V CC.....	51
2.3.7	Inter-Relações entre Algumas Tecnologias Emergentes Aplicáveis aos Sistemas Embarcados e o Sistema Elétrico em 42V CC.....	53
<b>2.4</b>	<b>Compêndio das Principais Características do STD em 42V / 14V CC.....</b>	<b>55</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>62</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações Gerais .....</b>	<b>62</b>
<b>3.2</b>	<b>Critérios e Definições dos Índices de Mérito.....</b>	<b>62</b>
3.2.1	Introdução .....	62
3.2.2	Critérios Gerais .....	63
3.2.3	Definições dos Índices de Mérito .....	64
<b>3.3</b>	<b>Aspectos Teóricos .....</b>	<b>76</b>
3.3.1	Introdução .....	76
3.3.2	Método de Agregação Aditiva .....	76
3.3.2.1	Função de Valor.....	78
3.3.2.2	Taxa de Substituição .....	80
3.3.3	Avaliação das Alternativas.....	83
3.3.4	Análise de Sensibilidade .....	88
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DAS ARQUITETURAS PARA O SISTEMA ELÉTRICO AUTOMOTIVO .....</b>	<b>96</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações Gerais .....</b>	<b>96</b>
<b>4.2</b>	<b>Características Técnicas das Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo .....</b>	<b>96</b>
4.2.1	Arquitetura 1 .....	97
4.2.2	Arquitetura 2 .....	99
4.2.3	Alternativa 3.....	100
4.2.4	Arquitetura 4 .....	101
4.2.5	Arquitetura 5 .....	102
4.2.6	Arquitetura 6 .....	103

4.2.7	Arquitetura 7 .....	104
4.2.8	Arquitetura 8 .....	105
4.2.9	Arquitetura 9 .....	106
4.2.10	Arquitetura 10 .....	107
4.2.11	Arquitetura 11 .....	108
<b>4.3</b>	<b>Avaliação das Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo .....</b>	<b>109</b>
4.3.1	Definição das Funções de Valor para os Índices de Mérito.....	110
4.3.2	Definição das Taxas de Substituição para os Índices de Mérito.....	120
4.3.3	Avaliação das Arquiteturas Elétricas para o Sistema Elétrico Automotivo..	123
4.3.4	Análise de Custo <i>versus</i> Benefício .....	129
4.3.5	Análise de Sensibilidade .....	133
4.3.5.1	Método Numérico .....	133
4.3.5.2	Método Gráfico (Ensslin).....	139
4.3.5.3	Método Gráfico (Shimizu).....	141
<b>4.4</b>	<b>Discussão dos Resultados .....</b>	<b>145</b>
4.4.1	Discussão dos Resultados do Método de Agregação Aditiva.....	145
4.4.2	Discussão dos Resultados da Análise de Custo <i>versus</i> Benefício .....	155
4.4.3	Discussão dos Resultados da Análise de Sensibilidade.....	157
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>160</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>162</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>164</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Fig. 1.1</b> – Evolução e expectativa do consumo elétrico nos veículos (Fonte:[100]).....	3
<b>Fig. 2.1</b> – Logomarca (a) e identificação de produto (b) “42V PowerNet” .....	14
<b>Fig. 2.2</b> – Exemplo típico de uma arquitetura para o sistema elétrico em 42V CC .....	43
<b>Fig. 2.3</b> – Exemplo típico de uma arquitetura para o sistema elétrico em 42V CC .....	44
<b>Fig. 3.1</b> – “ <i>Perfil de impacto</i> ” para a decisão de compra de um imóvel .....	85
<b>Fig. 3.2</b> – Análise custo <i>versus</i> benefício para a decisão de compra de um imóvel .....	87
<b>Fig. 3.3</b> – Análise de sensibilidade (Ensslin) para a decisão de compra de um imóvel – Método gráfico .....	93
<b>Fig. 3.4</b> – Análise de sensibilidade (Shimizu) para a decisão de compra de um imóvel – Método gráfico .....	95
<b>Fig. 4.1</b> – Arquitetura elétrica proposta por Hellman [13] .....	98
<b>Fig. 4.2</b> – Arquitetura elétrica proposta por Hellman e Miller [13], [93] .....	99
<b>Fig. 4.3</b> – Arquitetura elétrica proposta por Becker e Dwyer [44], [45] .....	100
<b>Fig. 4.4</b> – Arquitetura elétrica proposta por Miller, Huang e Nicastrì [53], [54], [100] .....	101
<b>Fig. 4.5</b> – Arquitetura elétrica proposta por Miller, Huang, Nicastrì e Silva [43], [53], [54], [100] .....	102
<b>Fig. 4.6</b> – Arquitetura elétrica proposta por Nicastrì [99], [100] .....	103
<b>Fig. 4.7</b> – Arquitetura elétrica proposta por Kassakian, Daniels e Altes [62], [81], [98] .....	104
<b>Fig. 4.8</b> – Arquitetura elétrica proposta por Masrur, Afridi e Miller [18], [93]-[95]....	105
<b>Fig. 4.9</b> – Arquitetura elétrica proposta por Emadi [128], [138].....	106
<b>Fig. 4.10</b> – Arquitetura elétrica proposta por Nicastrì [100].....	108
<b>Fig. 4.11</b> – Arquitetura elétrica de grande parte dos veículos atuais.....	109
<b>Fig. 4.12</b> – Taxa de substituição relativa para os índices de mérito.....	121
<b>Fig. 4.13</b> – Desempenho global das arquiteturas elétricas para o sistema elétrico automotivo .....	125
<b>Fig. 4.14</b> – “ <i>Perfil de impacto</i> ” para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo .....	126
<b>Fig. 4.15</b> – “ <i>Perfil de impacto</i> ” agrupado para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo .....	127
<b>Fig. 4.16</b> – Análise de custo <i>versus</i> benefício para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo .....	132
<b>Fig. 4.17</b> – Análise de sensibilidade para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo – Método numérico.....	138
<b>Fig. 4.18</b> – Análise de sensibilidade (Ensslin) para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo – Método gráfico.....	140
<b>Fig. 4.19</b> – Análise de sensibilidade (Shimizu) para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo – Método gráfico.....	144
<b>Fig. 4.20</b> – Ampliação do resultado da análise de custo <i>versus</i> benefício para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo.....	156

## LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1 – Regulação de Tensão do Barramento de tensão em 42 volts CC.....	16
Tab. 2.2 – Dispositivos Elétricos Previstos para 2010 .....	17
Tab. 2.3 – Principais Fatos Correlatos ao Desenvolvimento de STD em 42V / 14V CC e Referências Bibliográficas.....	56
Tab. 3.1 – Proposição dos Índices de Mérito .....	65
Tab. 3.2 – Exemplo de Aplicação da Metodologia para uma Decisão de Compra de um Imóvel .....	79
Tab. 3.3 – Função de Valor das Alternativas para a Decisão de Compra de um Imóvel	80
Tab. 3.4 – Taxas de Substituição Relativas para a Decisão de Compra de um Imóvel...	82
Tab. 3.5 – Taxas de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel .....	83
Tab. 3.6 – Desempenhos Globais para a Decisão de Compra de um Imóvel.....	84
Tab. 3.7 – Agrupamento de Custo e Benefício para a Decisão de Compra de um Imóvel .....	86
Tab. 3.8 – Análise Custo <i>versus</i> Benefício para a Decisão de Compra de um Imóvel ...	87
Tab. 3.9 – Variação das Taxas de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel .....	90
Tab. 3.10 – Desempenhos Globais com Variação de +10% na Taxa de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel.....	91
Tab. 3.11 – Desempenhos Globais com Variação de -10% na Taxa de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel.....	91
Tab. 3.12 – Análise de Sensibilidade (Ensslin) para a Decisão de Compra de um Imóvel – Método Gráfico.....	92
Tab. 3.13 – Desempenhos Globais com Taxa de Substituição do Índice de Mérito Ganho Líquido Igual a um para a Decisão de Compra de um Imóvel.....	94
Tab. 3.14 – Desempenhos Globais com Taxa de Substituição do Índice de Mérito Ganho Líquido Igual a zero para a Decisão de Compra de um Imóvel.....	94
Tab. 4.1 – Descrição da Simbologia Adotada na Representação Gráfica das Arquiteturas Elétricas .....	97
Tab. 4.2 – Função de Valor para o Índice de Mérito Custo Agregado.....	110
Tab. 4.3 – Função de Valor para o Índice de Mérito Consumo de Combustível .....	111
Tab. 4.4 – Função de Valor para o Índice de Mérito “Payback”.....	111
Tab. 4.5 – Função de Valor para o Índice de Mérito Expansibilidade.....	111
Tab. 4.6 – Função de Valor para o Índice de Mérito Prazo para Expansão .....	112
Tab. 4.7 – Função de Valor para o Índice de Mérito Custo Associado à Expansão .....	112
Tab. 4.8 – Função de Valor para o Índice de Mérito Oportunismo.....	112
Tab. 4.9 – Função de Valor para o Índice de Mérito Modismo .....	113
Tab. 4.10 – Função de Valor para o Índice de Mérito Confiabilidade.....	113
Tab. 4.11 – Função de Valor para o Índice de Mérito Complexidade .....	113
Tab. 4.12 – Função de Valor para o Índice de Mérito Detecção de Falhas.....	114
Tab. 4.13 – Função de Valor para o Índice de Mérito Intercambiabilidade.....	114
Tab. 4.14 – Função de Valor para o Índice de Mérito Mão-de-Obra Especializada.....	114
Tab. 4.15 – Função de Valor para o Índice de Mérito Tecnologia Atual.....	115
Tab. 4.16 – Função de Valor para o Índice de Mérito Inovação Tecnológica .....	115
Tab. 4.17 – Função de Valor para o Índice de Mérito Aceitação do Mercado.....	115
Tab. 4.18 – Função de Valor para o Índice de Mérito Interface Humana.....	116

Tab. 4.19 – Função de Valor para o Índice de Mérito Peso .....	116
Tab. 4.20 – Função de Valor para o Índice de Mérito Complexidade da Arquitetura ..	116
Tab. 4.21 – Função de Valor para o Índice de Mérito Adequação à Evolução Tecnológica.....	117
Tab. 4.22 – Função de Valor para o Índice de Mérito Requisitos de CEM .....	117
Tab. 4.23 – Função de Valor para o Índice de Mérito Redução na Emissão de Poluentes .....	117
Tab. 4.24 – Função de Valor para o Índice de Mérito Estoque.....	118
Tab. 4.25 – Função de Valor para o Índice de Mérito Reposição .....	118
Tab. 4.26 – Função de Valor para o Índice de Mérito Novos Equipamentos .....	118
Tab. 4.27 – Função de Valor para o Índice de Mérito Tempo Padrão .....	119
Tab. 4.28 – Função de Valor para o Índice de Mérito Recursos .....	119
Tab. 4.29 – Função de Valor para o Índice de Mérito Choques Elétricos.....	119
Tab. 4.30 – Função de Valor para o Índice de Mérito Aspectos de IEM .....	120
Tab. 4.31 – Taxas de Substituição para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo .....	122
Tab. 4.32 – Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas para o Sistema Elétrico Automotivo .....	124
Tab. 4.33 – Desempenho Local das Arquiteturas nos Índices de Mérito Agrupados ...	128
Tab. 4.34 – Agrupamento de Custo e Benefício para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo.....	129
Tab. 4.35 – Análise de Custo <i>versus</i> Benefício para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo.....	130
Tab. 4.36 – Variação das Taxas de Substituição para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo.....	133
Tab. 4.37 – Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas com Variação de +10% na Taxa de Substituição Custo Agregado.....	135
Tab. 4.38 – Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas com Variação de -10% na Taxa de Substituição Custo Agregado.....	136
Tab. 4.39 – Análise de Sensibilidade para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo – Método Numérico .....	137
Tab. 4.40 – Análise de Sensibilidade (Ensslin) para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo – Método Gráfico .....	139
Tab. 4.41 – Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas com Taxa de Substituição do Índice de Mérito Custo Agregado Igual a 1.....	141
Tab. 4.42 – Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas com Taxa de Substituição do Índice de Mérito Custo Agregado Igual a 0.....	142
Tab. 4.43 – Análise de Sensibilidade (Shimizu) para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo – Método Gráfico .....	143

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	-	<i>Anti-Blocking System</i> (sistema de freios antiblocante)
AC	-	<i>Alternate current</i>
AMPI	-	Alternador e motor de partida integrados
CA	-	Corrente alternada
CC	-	Corrente contínua
CEM	-	Compatibilidade eletromagnética
DC	-	<i>Direct current</i>
EDC	-	Estado de carga
EPA	-	<i>Environmental Protection Agency</i>
FTP	-	<i>Federal Test Procedure</i>
IEC	-	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEM	-	Interferência eletromagnética
LED	-	<i>Light emitting diode</i> (diodo emissor de luz)
MCI	-	Motor de combustão interna
MIT	-	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MPP	-	Membrana de permuta de prótons
PWM	-	<i>Pulse width modulation</i> (modulação em largura de pulso)
SAE	-	<i>Society of Automotive Engineers</i>
STD	-	Sistemas de tensão dupla
VAEE	-	Válvulas de admissão e exaustão eletromecânicas

## RESUMO

Este trabalho visa apresentar os principais aspectos relacionados às novas tecnologias e arquiteturas elétricas aplicáveis aos veículos automotores, analisando suas características técnicas face aos sistemas atuais. Em particular, destaca-se a comparação entre a aplicação de sistemas elétricos em 36V / 42V, em corrente contínua (CC) e alternada (CA), e o sistema elétrico em 12V / 14V CC.

Apresenta-se, assim, uma revisão da literatura sobre este tema, discutindo-se, de uma forma abrangente, a situação atual e as eventuais conseqüências da implementação de sistemas em 36V / 42V em CC ou CA para os componentes elétricos embarcados de última geração. As características técnicas das arquiteturas para aplicação de tal sistema elétrico, propostas na literatura disponível, são apresentadas, e os diferentes pontos de vista, relacionados à adoção desta nova tecnologia, são considerados no desenvolvimento deste trabalho.

A análise destas arquiteturas considera índices de mérito, definidos de acordo com critérios específicos sugeridos neste trabalho, e a aplicação de uma metodologia de avaliação, permitindo, assim, que o compêndio final desta análise seja apresentada e discutida de forma conclusiva.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to present the main aspects related to the new technologies and electrical architectures applicable to automotive vehicles, analyzing their technical characteristics before the current electrical systems. In particular, emphasis is given to a comparison between the application of 36V / 42V electrical system, in direct current (DC) and alternate current (AC), and 12V / 14V DC electrical system.

A literature review about the mentioned subject is presented, discussing, in a widely basis, the current situation and the eventual consequences of the 36V / 42V electrical system implementation, in DC or AC, on last generation on-board electrical components. The technical characteristics of the architectures considered for the implementation of that electrical system, proposed in the available literature, are presented, and the different point of views, related to the adoption of this new technology, are considered during the development of this work.

The analysis of those architectures considers merit indexes, defined according to specific criterions suggested in this work, and the application of an assessment methodology, allowing, therefore, a conclusive presentation and discussion of the final compendium of this analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de motores de combustão interna (MCI), ocorrido no final do século 19, deu início a um dos maiores desafios da indústria automobilística: A ignição da mistura ar-combustível. A melhor solução encontrada para este desafio, tendo em vista propiciar um meio estável e periódico de ignição, foi a implementação de um dispositivo que gerasse uma descarga elétrica dentro da câmara de combustão [1].

Durante os primeiros anos de existência dos automóveis, o sistema elétrico foi somente utilizado para fornecer energia para esta finalidade.

Lâmpadas a óleo e acetileno eram amplamente utilizadas, enquanto as lâmpadas incandescentes, vagarosamente, as substituíram nos novos modelos de automóveis. As baterias empregadas eram do tipo secas, sendo necessário sua troca quando descarregadas. Baterias tipo chumbo-ácido também eram empregadas, porém, devido à ausência de geradores de CC para fins automotivos, elas tinham que ser recarregadas, periodicamente, em locais específicos. O sistema elétrico dos veículos, até então, era formado por uma rede de alimentação contínua em 6 volts [1].

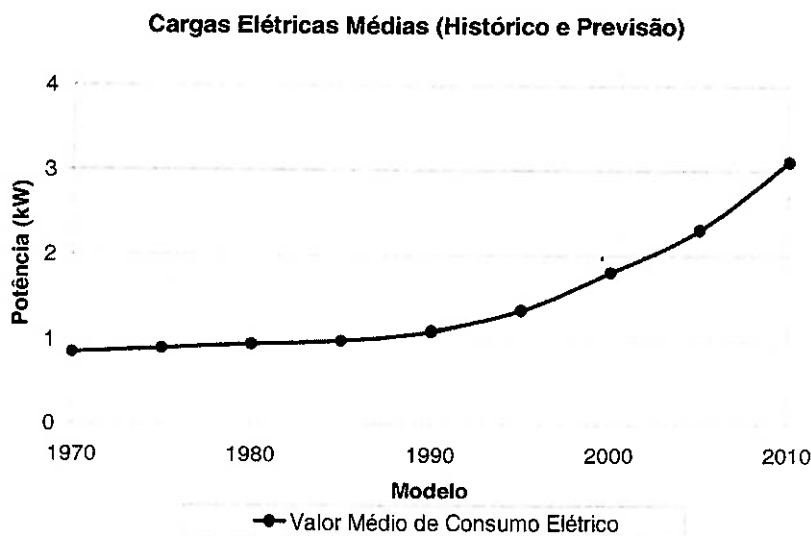
Em 1912, com o desenvolvimento dos primeiros motores de partida elétricos pela Dayton Electrical Laboratory Company (DELCO), a pedido da Cadillac Motor Car Company, o primeiro veículo de partida elétrica foi lançado e uma nova era na história do sistema elétrico automotivo se iniciou. Devido a grande quantidade de energia necessária para o funcionamento do motor de partida, o que levaria a bateria a descarregar-se com uma frequência muito maior, desenvolveu-se, nesta mesma época, os geradores de CC, com tensão nominal em 7V. Desta forma, o sistema elétrico passou a fornecer energia, não somente para a partida como, também, para os sistemas de iluminação, ignição e para a carga da bateria [2]-[4].

Os anos subseqüentes podem ser identificados pelo marcante desenvolvimento do sistema de ignição dos veículos, cujo objetivo era superar as deficiências introduzidas pelos dispositivos geradores de descarga elétrica (basicamente ímãs e bobinas vibratórias). O sistema elétrico automotivo, entretanto, neste mesmo período, sofreu, apenas, algumas poucas intervenções. Mencionam-se, como exemplos, a introdução do sistema Bendix nos motores de partida, o desenvolvimento de dispositivos de regulação de tensão para os geradores de CC e, para as baterias, a substituição de caixas de madeira por caixas de borracha rígida.

O contínuo desenvolvimento da indústria automobilística levou à introdução de motores cada vez maiores, cujas tecnologias empregadas levaram a uma maior exigência de energia por parte do sistema elétrico. Por volta de 1955, o desenvolvimento de um MCI V8, de alta taxa de compressão, foi o responsável por mostrar a necessidade de maior potência para o sistema de ignição. Esta conclusão foi obtida ao observar-se que, durante a tentativa de partida, a tensão da bateria caía e, como conseqüência, o sistema de ignição não era acionado. De forma simultânea, na mesma época, surgiram novos equipamentos para os veículos, como rádios, sistema de iluminação mais potente e motores de partida maiores, sendo que, no entanto, nenhum destes novos equipamentos justificava a elevação da tensão nominal do sistema elétrico [5]-[7]. Assim, a transição de 6V / 7V CC para 12V / 14V CC ocorreu devido a crescente necessidade de um sistema de ignição mais confiável, face aos requisitos mais exigentes de disponibilidade de energia durante a partida dos novos motores. Observa-se que a maioria das montadoras da época implementaram este sistema em um período de dois anos [2]-[4]. Nos dias atuais, aproximadamente cinco décadas após a implementação do sistema elétrico em 12V / 14V CC, vive-se um cenário parecido.



Menciona-se que, atualmente, o crescimento da demanda por energia elétrica é observada, de uma forma predominante, nos veículos de luxo europeus e norte-americanos. A fim de ilustrar este fato, a Fig. 1.1 reproduz, para o período de 1970 a 2010, a evolução e a expectativa da potência consumida nos veículos automotores, conforme apresentada em [100].



**Fig. 1.1** – Evolução e expectativa do consumo elétrico nos veículos (Fonte:[100])

Observa-se, ainda, que a previsão para os próximos anos, realizada com base na interpolação dos dados atuais, indica que, para o ano de 2010, existirá uma demanda de 3,2kW nos veículos automotivos [100]. Destaca-se o aumento de demanda da ordem de 4%, por ano, ocorrido durante as duas últimas décadas, resultando na duplicação da demanda no período entre 1978 e 1998.

De acordo com uma pesquisa conduzida pela “Allied Business Intelligence Inc.”, estima-se que, em 2010, 39% do custo de um veículo, de categoria média, estará relacionado ao custo de equipamentos eletro-eletrônicos [127].

Dentre os fatores que contribuem para a crescente demanda de energia nos últimos projetos de automóveis, um dos maiores, certamente, é a substituição de sistemas, que

antes eram acionados de forma mecânica ou hidráulica, por sistemas que passam a ser acionados de forma elétrica [100]. As motivações, que conduzem a estas substituições, podem ser compreendidas, tanto pela necessidade de inovação tecnológica e satisfação dos clientes, quanto por razões de atendimento a requisitos como, por exemplo, aqueles relacionados aos aspectos normativos de controle de emissões de poluentes, consumo de combustível e compatibilidade eletromagnética (CEM) [10], [24], [53]. Assim, pode-se citar a introdução de sistemas de navegação, freio antiblocante (ABS), “airbags”, sistema eletrônico de condicionador de ar, “break-by-wire”, “drive-by-wire”, e componentes como válvulas de admissão e exaustão eletromecânicas (VAEE), e conversor catalítico, eletricamente aquecido.

De forma ilustrativa, pode-se afirmar que os sistemas do tipo “by-wire” são formados através da adição de dispositivos elétricos e eletrônicos para controlar os processos, até então executados de modo mecânico ou hidráulico. Assim, o sistema “break-by-wire”, ou freio eletrônico, por exemplo, é formado por um potenciômetro, localizado no pedal do freio e atuadores eletromagnéticos, localizados nos discos e tambores de freio. O princípio de funcionamento do sistema baseia-se na transformação, de forma proporcional, da pressão no pedal de freio, aplicada pelo motorista, em uma determinada força de atuação nos discos e tambores de freio, aplicada pelos atuadores elétricos.

Prevê-se, desta forma, que a introdução, de modo abrangente, destes equipamentos elétricos nos veículos automotores atuais implica, no mínimo, em uma revisão do sistema de carga, tendo em vista a redefinição da potência gerada pelo alternador [23], [28], [34], [53]. Ressalta-se, no entanto, que os alternadores automotivos de 14V, do tipo Lundell, utilizados nos veículos, possuem um limite máximo estimado de potência

de saída de 3,0kW, o que se traduz em uma capacidade máxima de corrente da ordem de 200A, considerando-se o sistema elétrico em 12V / 14V CC [27], [39], [43], [53].

Desta forma, de acordo com Kassakian e Miller, prevê-se que, em um futuro não muito distante, a demanda por energia elétrica nos veículos automotores superará a capacidade de geração do alternador tipo Lundell de 14V: Neste momento, a simples implementação de equipamentos elétricos adicionais, mostrará um dos grandes desafios da indústria automobilística [23], [53].

Na busca de possíveis soluções para este desafio, o aumento da tensão do sistema elétrico dos automóveis, apresenta-se como uma alternativa atraente [53].

Entre os diversos aspectos positivos para alguns componentes automotivos existentes, mencionam-se aqueles relacionados ao dimensionamento dos cabos elétricos e demais subsistemas vinculados ao consumo de potências elevadas.

Por outro lado, apesar da grande motivação em aplicar tal solução, pode-se comentar que, face ao estágio de desenvolvimento tecnológico do sistema elétrico automotivo atual, esta solução apresenta-se bastante complexa [14].

Desde o início dos anos 90, Institutos e Sociedades internacionais, como o MIT (“Massachusetts Institute of Technology / Industry Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems” e “Forum Bordnetz”) e a SAE (“Dual/Higher Voltage Study Group” e “42 Volt Advisory Committee”), vêm promovendo encontros entre os fabricantes de veículos e os principais fornecedores automotivos. Estes fóruns têm como objetivo estudar as implicações do aumento da tensão do sistema elétrico dos automóveis com relação à segurança, durabilidade e custos de transição, entre outros temas. Dentre os diversos estudos publicados a partir destes fóruns, destaca-se o estabelecimento do barramento de tensão em 42 volts CC como o futuro padrão para o setor automotivo, bem como a definição dos valores

aceitáveis para a regulação da tensão deste barramento [13], [20], [27], [39], [43], [53], [60], [63], [81], [100], [101], [115], [123], [127].

De acordo com um estudo conduzido pela “Standard and Poor’s” em 2001, estima-se que 25% a 35% dos veículos na Europa, Estados Unidos e Japão possuirão o barramento de tensão em 42 volts CC em 2010 [123].

Finalmente, dois fatores que possuem elevado peso na decisão da eventual transição do barramento de tensão são a busca pela redução do consumo de combustível, através do aumento de eficiência dos equipamentos elétricos atuais e a conformidade com as leis ambientais, através do controle de emissões de poluentes [26], [51], [97], [107], [106], [113]-[115], [118]-[121], [126]. O barramento de tensão em 42 volts CC permitiria disponibilizar meios para alcançar os objetivos citados, através da introdução de novos equipamentos elétricos, como por exemplo, alternadores e motores elétricos mais eficientes, VAEE e conversores catalíticos eletricamente aquecidos.

Motivado pelos aspectos anteriormente mencionados, este trabalho apresenta um compêndio dos principais trabalhos relacionados a este tema e, uma análise e discussão abrangente das principais arquiteturas propostas na literatura, com base em resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Introdução**

Os avanços tecnológicos do sistema elétrico automotivo têm, tipicamente, levado à introdução de soluções inovadoras nos últimos 40 a 50 anos. Pode-se mencionar que, tais soluções foram responsáveis por dividir a história da evolução do sistema elétrico automotivo em duas fases: sistema elétrico em 6V / 7V CC, sendo este, posteriormente, substituído pelo sistema elétrico em 12V / 14V CC, e os estudos que consideram a necessidade de uma nova transição do sistema elétrico automotivo para 36V / 42V CC. Este capítulo descreve as considerações gerais sobre os principais trabalhos relacionados ao desenvolvimento tecnológico dos sistemas elétricos automotivos.

### **2.2 Considerações Gerais Sobre a Evolução do Sistema Elétrico em 6V / 7V CC e 12V / 14V CC**

O sistema elétrico dos veículos automotores, embora assuma uma grande importância na atualidade, vem sendo estudado desde as primeiras décadas do século XX. Dentre os principais aspectos considerados, destacam-se as avaliações da influência do sistema elétrico sobre a performance do MCI e o desenvolvimento de soluções que tornem os geradores de CC mais potentes e eficientes, devido a fatores como, o aumento da demanda por energia elétrica e o desejo de redução no consumo de combustível, respectivamente.

Um dos trabalhos mais completos que retratam os aspectos relacionados à evolução do sistema elétrico automotivo em 6V / 7V CC, desde sua criação até suas últimas aplicações, foi apresentado por Johnston [1]. Outros trabalhos que, também, abordaram

este tema, cujos enfoques vão além do aspecto histórico-evolutivo do sistema elétrico automotivo, podem ser encontrados em [2]-[7].

Alguns aspectos ressaltados por Johnston merecem destaque, como por exemplo, o desenvolvimento de velas de ignição (1908), dínamos ou geradores de CC (1908), motores de partida (1912) e reguladores de tensão eletromecânicos (1912-1920) [1].

Com relação ao desenvolvimento dos motores de partida, é interessante ressaltar que os primeiros dispositivos empregados em veículos eram altamente integrados, possuindo ambos os enrolamentos de partida e geração de energia na mesma armadura, cada qual com seus próprios comutadores e escovas [1].

Embora, na literatura, existam poucos trabalhos relacionados à evolução do sistema elétrico em 6V/ 7V CC, a utilização deste sistema, em veículos automotores, fez-se presente no período compreendido entre 1912 e 1965, sendo substituído, vagarosamente, pelo sistema elétrico em 12V / 14V CC [1]-[4]. Ressalta-se, que o primeiro veículo a possuir o sistema elétrico em 12V / 14V CC foi um Cadillac em 1955 e o último veículo que adotou este sistema foi um Volkswagen em 1965 [1], [55].

Segundo Hartzell e Miller, o fator motivador para a mudança do sistema elétrico automotivo de 6V / 7V CC para 12V / 14V CC ocorreu devido à introdução de um MCI V8 com taxa de compressão de 8:1 [5]-[7], [8]. O sistema elétrico em 6V / 7V CC mostrou-se inadequado para esta aplicação devido à elevada taxa de compressão e a melhor performance do sistema de admissão e exaustão dos MCI, que exigiram uma maior demanda de energia por parte do sistema de ignição [7], [8]. Outros fatores como, por exemplo, o crescimento do conteúdo eletro-eletrônico e o requisito de melhor desempenho do motor de partida com relação à velocidade de partida, contribuíram para a mudança do sistema elétrico automotivo, porém, não foram essenciais para isto.

Em 1952, Hartzell descreveu, de forma interessante, o crescimento do conteúdo eletro-eletrônico nos veículos da época vinculado ao crescimento da capacidade dos geradores de CC [5]. Neste trabalho, observou-se que, logo quando as primeiras baterias foram introduzidas nos veículos, por volta do ano de 1912, os geradores possuíam potência nominal de 120W, ou vinte ampéres considerando-se o sistema elétrico em 6 volts CC. Por volta de 1925, “geradores de vinte e cinco ampéres” eram amplamente utilizados. Finalmente, por volta de 1952, “geradores de quarenta e cinco ampéres” passaram a se tornar padrão, devido à introdução de sistemas de iluminação, ar condicionado e limpadores de pára-brisa, entre outros.

De modo semelhante, a evolução do sistema elétrico automotivo em 12V / 14V CC está, também, ressaltada no trabalho publicado por Johnston, de onde se destacam o desenvolvimento de motores de partida com solenóide de atuação (1956), alternadores tipo Lundell (1961), reguladores de tensão eletrônicos (1961), baterias livre de manutenção (1969) e sistemas de gerenciamento do MCI (1981) [1]. Observa-se, de modo ilustrativo, que o sistema elétrico automotivo de geração de energia, conhecido como 12V / 14V CC, é formado por uma bateria, cuja tensão nominal é 12,6 volts, e por um alternador, cuja tensão nominal é 14,5 volts. Tal sistema elétrico, a partir deste ponto, será referenciado, de forma simplificada, por sistema elétrico em 14V CC.

A partir da década de 1960, quando o sistema elétrico em 14V CC já era amplamente utilizado, observou-se uma crescente preocupação relacionada aos impactos e conseqüências da proliferação de sistemas eletro-eletrônicos nos veículos automotores. Desta forma, estudos relacionados, por exemplo, à redução de peso dos componentes elétricos dos veículos, através do aumento da tensão de operação e, até mesmo, àqueles relacionados a tópicos considerados bastante atuais na engenharia elétrica, tal como a análise de CEM, se tornaram freqüentes [9], [10].

Na década de 1970, outras tentativas de introdução de um sistema elétrico com barramento de tensão elevada foram realizadas. Assim, o trabalho publicado pela DELCO REMY, em 1977, ressalta uma análise dos impactos da introdução de um barramento de tensão em 24 volts CC no peso e no tamanho dos componentes elétricos automotivos, tais como alternador, motor de partida, bateria, relés, interruptores e buzinas [9]. Como resultado, este trabalho mostrou que a eventual adoção do sistema elétrico em 24 volts CC não apresentava benefícios significativos para a redução do peso dos veículos, apesar de mostrar-se vantajoso para alguns sistemas isolados como, por exemplo, os cabos elétricos.

Já no ano de 1984, motivado por questões de segurança, o "International Electrotechnical Commission" (IEC) editou a norma IEC-479-1, que seria complementada em 1987 pela norma IEC-479-2, estabelecendo os limites de 50 volts rms para sistemas de corrente alternada (CA) e 65 volts para sistemas de CC, como valores máximos para a exposição humana a tensões de contato, sem que sejam necessários dispositivos de isolamento para evitar efeitos nocivos à saúde [11], [12]. Este estudo, que a princípio não apresentava vínculos com a indústria automobilística, tornou-se muito útil como base para as subseqüentes pesquisas a respeito de uma eventual elevação da tensão do barramento nos veículos. De fato, tais limites, em conjunto com outros fatores como, por exemplo, a possibilidade de fabricação de baterias, que possuem, aproximadamente, 2,1 volts por célula, ditaram os critérios fundamentais para a adoção internacional do barramento de tensão em 42 volts CC como padrão para a eventual transição do sistema elétrico automotivo.

### **2.3 Aspectos Gerais dos Principais Trabalhos Relacionados ao Sistema Elétrico em 36V / 42V CC**



### **2.3.1 Considerações Preliminares**

Neste item descreve-se a evolução dos trabalhos relacionados ao sistema elétrico automotivo em 36V / 42V CC.

Em um primeiro momento, serão abordados os aspectos relacionados ao progresso das discussões internacionais que levaram à consolidação do sistema elétrico em 36V / 42V CC como o padrão a ser, eventualmente, adotado pela indústria automobilística. Como próximo item, serão abordadas, também, as novas funcionalidades, relativas ao atendimento de aspectos normativos e, ao conforto e conveniência dos passageiros, que podem ser introduzidas nos veículos devido a este sistema, além das influências da adoção deste sistema na adequação dos principais componentes elétricos automotivos atuais. Em seguida, as proposições de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo em 36V / 42V CC serão expostas, de forma a possibilitar sua implementação nos veículos atuais. Além disso, serão destacadas, também, as principais ferramentas de análise utilizadas como auxílio no desenvolvimento desta tecnologia. Na seqüência, será realizada uma análise dos principais trabalhos que abordam a expectativa atual relacionada ao prazo para a implementação do sistema elétrico em 36V / 42V CC nos veículos automotores. Finalmente, seguirá uma descrição da inter-relação entre algumas das tecnologias embarcadas emergentes atuais e o sistema elétrico em 36V / 42V CC.

### **2.3.2 Principais Aspectos Relacionados à Definição do Sistema Elétrico em 36V / 42V CC**

O período entre o final da década de 1980 e o início da década de 1990, foi fundamental para a consolidação dos estudos iniciais que formaram a base para as demais considerações sobre uma eventual transição da tensão do barramento de distribuição de

energia elétrica nos veículos automotores. Dois temas fundamentais podem ser ressaltados como aspectos motivadores de tais trabalhos: a busca de soluções que visem adequar o sistema de geração de energia elétrica dos veículos com relação aos novos requisitos de demanda de energia, e a preocupação de Instituições e Sociedades internacionais em orientar esta busca, além de consolidar a solução definida por toda a indústria automobilística.

Alguns dos primeiros trabalhos com o objetivo de estudar a aplicação de sistemas de tensão elevada nos veículos automotores foram publicados entre 1989 e 1991, motivados pelo constante crescimento do conteúdo elétrico automotivo [13]-[16]. Dentre eles, os trabalhos desenvolvidos por Hellmann e Matouka, merecem destaque devido à discussão de fatores como, por exemplo, a necessidade de estabelecer uma faixa de regulação de tensão mais estreita, em comparação à do sistema elétrico em 14V CC e a possibilidade de existência de sistemas de tensão dupla (STD) [13], [14]. Entenda-se por STD como a coexistência de dois barramentos de tensão no mesmo veículo, conectados através de conversores CC-CC. Neste tipo de sistema, um dos barramentos mantém o padrão de tensão atual em 14V CC, enquanto o outro desenvolve tensões elevadas.

Com relação à faixa de regulação de tensão para o eventual barramento de tensão elevada, destacam-se alguns trabalhos que ressaltam a necessidade de estabelecer valores de regulação mais próximos à tensão nominal do sistema, evitando, desta forma, uma excessiva variação de tensão, como a encontrada no sistema elétrico em 14V CC [17]. Neste sistema, a tensão do barramento pode variar de 11,0V até 15,5V, dependendo do estado de carga (EDC) e da temperatura da bateria [17]. Como resultado, os dispositivos elétricos automotivos devem ser desenvolvidos para operarem sobre uma ampla faixa de tensão, fazendo com que se tornem desnecessariamente caros.

além de apresentarem reduzida eficiência quando operam nas tensões mais elevadas da faixa de regulação. Como exemplo, pode-se citar o aumento da potência dissipada, proporcional ao quadrado da tensão, devido à utilização de dispositivos elétricos na faixa superior de regulação de tensão, quando, na maioria das condições, eles estão proporcionando um desempenho maior do que o necessário [14].

Já em 1992, devido às evoluções satisfatórias no estudo sobre a adoção de um novo barramento de tensão elevada nos veículos automotores, foi possível a publicação da norma SAE J2232, elaborada pelo grupo de trabalho formado pela SAE, intitulado "Dual/Higher Voltage Study Group" [18]. Neste documento, os limites previamente sugeridos pela norma IEC-479-1 e IEC-479-2, foram ratificados para aplicação no ambiente automotivo, resultando na confirmação dos valores de 65 volts para sistemas de CC e 50 volts para sistemas de CA, de forma oficial, para a indústria automobilística [11], [12].

Por outro lado, em 1994, a pedido da Mercedes-Benz, hoje Daimler-Chrysler, o MIT formou e liderou um grupo de trabalho, intitulado "MIT/Industry Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems", formado pelas principais montadoras e fornecedores automotivos americanos da época, com o objetivo de avaliar a necessidade de aumentar o valor da tensão do barramento do sistema elétrico automotivo, bem como estabelecer seus principais valores de regulação [19], [20]. O MIT designou Kassakian, professor de Engenharia Eletrônica no MIT e chefe do Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos e Eletrônicos do MIT, para liderar este grupo de trabalho [21].

No segundo semestre de 1995, após a realização de diversas reuniões e, tendo como base a norma publicada pela SAE, o grupo de trabalho liderado pelo MIT chegou ao consenso de que o sistema elétrico em 36V / 42V CC representa, possivelmente, a

melhor solução para a indústria automobilística [18], [20]. O mesmo grupo decidiu tornar sua decisão pública, através da publicação de trabalhos nos fóruns da IEEE e SAE [24], [53]. Observa-se, de modo ilustrativo, que o sistema elétrico em 36V / 42V CC proposto, seria formado por uma bateria, cuja tensão nominal seria de 37,8 volts, e por um alternador, cuja tensão nominal seria de 42 volts. Tal sistema elétrico, a partir deste ponto, será referenciado, de forma simplificada, por sistema elétrico em 42V CC. Este grupo de trabalho, liderado pelo MIT, decidiu, ainda, criar uma identificação visual única que proporcionasse uma fácil diferenciação dos componentes desenvolvidos para o barramento de tensão em 42 volts CC perante os atuais, conforme mostra a Fig. 2.1 [19]. Nesta figura, observa-se a logomarca, utilizada em materiais promocionais, e o símbolo de identificação do produto, que deve ser aplicado diretamente no produto para prevenir o uso indevido de um equipamento 42 volts em um barramento de tensão em 14 volts CC [42], [62]. Ressalta-se que, tanto a logomarca quanto o símbolo de identificação do produto, não foram patenteados de forma a incentivar sua utilização.

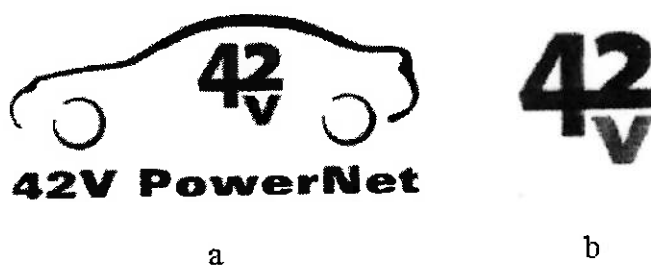


Fig. 2.1 – Logomarca (a) e identificação de produto (b) “42V PowerNet”

Já em 1996, após as primeiras recomendações do grupo de trabalho liderado pelo MIT, a Mercedes-Benz, hoje Daimler-Chrysler, organizou outro grupo de trabalho, chamado “Forum Bordnetz”, formado pelas principais montadoras e fornecedores automotivos europeus, com o objetivo de introduzir as discussões sobre o barramento de tensão elevada na Comunidade Européia. Durante a segunda reunião do “Forum Bordnetz”, um

representante do grupo de trabalho liderado pelo MIT esteve presente para apresentar as recomendações deste grupo, juntamente com os argumentos que as suportavam, ressaltando a necessidade de obter um consenso entre os dois grupos de trabalho no sentido de unir esforços para a consolidação dos estudos relacionados ao sistema elétrico em 42V CC [20]. O “Forum Bordnetz” não somente adotou as recomendações do grupo de trabalho liderado pelo MIT, como também assumiu a responsabilidade de criar uma especificação formal para o barramento de tensão em 42 volts CC, levando-se em consideração os aspectos técnicos do impacto deste barramento no desempenho dos diversos componentes do sistema elétrico de um veículo moderno [22].

O trabalho publicado por Hartmann, em 1999, pode ser considerado um dos principais estudos que objetivam disseminar o estágio de desenvolvimento da especificação do barramento de tensão em 42 volts CC, além das futuras ações do “Forum Bordnetz” com relação a sua publicação final [22]. Neste trabalho, ressalta-se a adoção de margens de regulação de tensão mais rígidas, se comparadas com o sistema elétrico em 14V CC, como pode ser observado através da Tab. 2.1.

Já em 2000, durante uma reunião do “Motor Vehicle Concil” da SAE Internacional, decidiu-se criar um grupo de trabalho, intitulado “SAE Advisory Committee”, com o objetivo de promover o desenvolvimento de soluções globais, viáveis, financeiramente, para a implementação do sistema elétrico em 42V CC nos veículos automotores atuais [75]. Dentre as atividades deste grupo de trabalho, destacam-se os estudos relacionados ao impacto da implementação do sistema elétrico em 42V CC na adequação dos principais componentes elétricos automotivos como, por exemplo, lâmpadas e baterias. No próximo item deste capítulo será realizada uma breve discussão sobre este tema.

**Tab. 2.1 – Regulação de Tensão do Barramento de tensão em 42 volts CC**

Especificação	Voltagem	Definição
$U_{\text{máx din}}$	58 V	Sobre-tensão dinâmica máxima
$U_{\text{máx}}$	50 V	Voltagem contínua máxima
$U_{\text{eff máx}}$	48 V	Voltagem efetiva máxima
$U_n$	42 V	Voltagem nominal
$U_{\text{min op}}$	30 V	Voltagem mínima de operação
$U_{\text{partida}}$	21 V	Voltagem mínima para partida
$U_{\text{min}}$	18 V	Voltagem mínima

Fonte:[22]

### 2.3.3 Considerações Sobre a Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC na Adequação dos Componentes Elétricos Embarcados

A grande maioria dos estudos relacionados ao futuro do sistema elétrico automotivo tem início com uma previsão das novas tecnologias e funções que podem ser incorporadas aos veículos, como mostra, de forma sintetizada, a Tab. 2.2 [23]-[25]. É interessante notar que, segundo Kassakian, existe uma previsão de que grande parte destes dispositivos elétricos estarão disponíveis nos veículos de luxo a partir do ano de 2010; porém, segundo Miller, alguns destes dispositivos serão implementados por exigência dos clientes ou por se tornarem obrigatórios, e outros devido a vantagem de permitirem aos fabricantes atenderem requisitos legais, como economia de combustível e emissões de poluentes [23], [61].

Outros trabalhos, por sua vez, mostram os dispositivos elétricos que poderão ser introduzidos nos veículos automotores em um prazo mais curto, como publicado por Truett [25]. Neste trabalho, sistemas como, por exemplo, lâmpadas a gás xenônio.

imagens infravermelhas projetadas no pára-brisa (também conhecido como visão noturna) e “x-by-wire”, ainda podem ser disponibilizados em veículos com o sistema elétrico em 14V CC, tal como se observa nos veículos da marca Cadillac. Ressalta-se, ainda, o trabalho publicado por Madov, no qual são citados os dispositivos elétricos disponíveis atualmente nos modelos de luxo da Audi e Daimler-Chrysler como, por exemplo, minigeladeiras, identificadores de impressão digital e bancos com massageadores [26].

**Tab. 2.2 – Dispositivos Elétricos Previstos para 2010**

Dispositivo Elétrico	Consumo de Pico (W)	Consumo Médio (W)
Válvulas de admissão e exaustão eletromecânicas (VAEE)	2400	800
Bomba de água	300	300
Pára-brisa aquecido	2500	200
Conversor catalítico aquecido	3000	60
Suspensão ativa	12000	360
Total	20200	1720

Fonte:[23]-[25]

Por outro lado, uma análise mais criteriosa das informações contidas na Tab. 2.2 revela que a simples adoção dos dispositivos elétricos mostrados, nos veículos atuais, é demasiadamente complexa, devido ao limite de 3,0kW de geração de energia elétrica, imposto pela utilização de alternadores tipo Lundell. Existe um consenso na literatura disponível que afirma que o limite máximo de potência de um alternador tipo Lundell é 3,0kW, sendo que, nos dias atuais, pelo menos 2,2kW já são consumidos pelos dispositivos elétricos em 14V [8], [27], [39], [43], [53], [100].

Desta forma, torna-se evidente que será necessário realizar uma adequação no projeto dos alternadores 14V atuais para que, no futuro, eles possam suportar os elevados requisitos de demanda por energia, que os dispositivos elétricos instalados exigirão. De maneira semelhante, este raciocínio pode ser extrapolado para os demais componentes do sistema elétrico automotivo, pois, certamente, eles também serão afetados de algum modo, pela introdução de sistemas de tensão elevada.

Assim, nos próximos itens, serão abordadas as influências da adoção do sistema elétrico em 42V CC, na adequação dos seguintes componentes do sistema elétrico automotivo: alternadores e motores elétricos, motores elétricos pequenos, lâmpadas, cabos elétricos, semicondutores, conversores CC-CC, baterias, fusíveis e conectores.

### **2.3.3.1 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Alternadores e Motores Elétricos**

A adequação dos alternadores e motores elétricos ao eventual barramento de tensão em 42 volts CC implica no redimensionamento do número de espiras e da bitola do condutor utilizado nos enrolamentos destas máquinas [14], [15], [27]. Assim, devido a benefícios relacionados à eficiência e ao consumo de corrente elétrica, tais dispositivos serão, preferencialmente, instalados no barramento de tensão em 42 volts CC [13], [14]. Mohan, em 1991, publicou um trabalho descrevendo as razões que levam os alternadores e motores elétricos a operarem de modo mais eficiente, quando acionados através de tensões elevadas [15]. Neste trabalho, destaca-se que a elevação da tensão de operação nas máquinas elétricas exigirá mudanças no número de espiras e na bitola do condutor utilizado em seus enrolamentos, fazendo com que as perdas resistivas se



mantenham, enquanto as perdas associadas à queda de tensão nos diodos e escovas sejam reduzidas devido a menor corrente elétrica conduzida.

Por outro lado, a importância do desenvolvimento de dispositivos elétricos que operem de modo mais eficiente, também está relatada em trabalhos publicados anos mais tarde [28]-[34]. Dentre estes trabalhos, destaca-se o trabalho publicado por Kassakian, por ilustrar que uma redução de 100W na potência elétrica consumida por um veículo, resultado de uma possível melhoria na eficiência do seu sistema elétrico, produz o mesmo efeito, com relação ao consumo de combustível, do que a redução de 50kg no mesmo veículo. Outros merecem destaque devido à apresentação de propostas com o objetivo de aumentar a eficiência dos alternadores como, por exemplo, a aplicação de alternadores refrigerados pela água do sistema de arrefecimento do MCI, ou o chaveamento dos enrolamentos do estator do alternador entre conexões estrela e triângulo [30], [32]. Ressalta-se que algumas destas propostas vêm, aos poucos, sendo introduzidas em veículos com sistema elétrico em 14V CC como, por exemplo, o Daimler-Chrysler Maybach, com resultados que indicam um aumento de até 25% na potência de saída de alternadores Lundell [35].

A eventual adoção do sistema elétrico em 42V CC possibilitaria, ainda, integrar as funções de partida e geração de energia em um único dispositivo elétrico, chamado alternador e motor de partida integrado (AMPI) [14], [16]. A possibilidade de aplicação do AMPI volta a ser considerada devido à eventual elevação da tensão do barramento e à crescente demanda por energia elétrica nos automóveis, permitindo, respectivamente, que as perdas do alternador sejam reduzidas e que, a potência nominal do alternador e do motor de partida voltem a se tornar equivalentes [14]. Do ponto de vista histórico, como foi ressaltado por Johnston em [1], estes dispositivos foram desmembrados no

passado, devido à elevada potência requerida para partir os MCI, em face da reduzida potência demandada pelos equipamentos elétricos daquela época.

Uma das principais funcionalidades, provenientes da aplicação do AMPI em veículos automotores, é a operação do MCI de forma intermitente, desligando-o, por exemplo, em caso de tráfego ou devido a semáforos [36]. Tal conceito, conhecido como “start-stop”, possibilitaria uma sensível redução no consumo de combustível dos veículos [36].

Com relação aos desafios da aplicação de alternadores em sistemas de tensão elevada, destaca-se o controle dos picos de tensão gerados por variações extremas de carga, fato conhecido como “load dump” [28]. A ocorrência do “load dump” pode ser compreendida quando uma bateria, em condição de carga, é desconectada, causando uma inesperada queda na corrente do alternador e um conseqüente aumento em sua tensão. Assim, considerando-se o sistema elétrico em 14V CC, os picos de tensão gerados pela ocorrência deste fenômeno podem alcançar até 40 volts, sendo limitados a este valor, através do uso de diodos tipo Zener nos alternadores [23].

Observa-se que, para os sistemas elétricos em 42V CC, os efeitos do “load dump” são ainda mais nocivos, o que acarreta em custos adicionais, relacionados à proteção, nos componentes elétricos embarcados [16], [17]. Destacam-se, desta forma, alguns trabalhos publicados no sentido de evitar este custo adicional através do uso de MOSFETs ativos nos alternadores [37], [38].

Por outro lado, as considerações relacionadas aos aspectos construtivos do AMPI, bem como sua utilização, de modo auxiliar, na propulsão do veículo com o objetivo de reduzir seu consumo de combustível, foi tema do trabalho publicado por Ehsani [39]. Neste trabalho, assim como em alguns outros, destaca-se uma detalhada análise comparativa entre os motores elétricos tipo imã permanente, relutância variável e

indução com relação a aspectos como, por exemplo, eficiência, densidade de torque, custo, ruído acústico e temperatura de operação [39]-[43].

Destaca-se, ainda, alguns trabalhos publicados com o objetivo de analisar a aplicação de alternadores do tipo Lundell nos eventuais STD em 42V / 14C CC [44]-[46]. Dentre estes trabalhos, a proposta apresentada por Becker merece destaque, por descrever um método que torna o alternador capaz de gerar energia diretamente compatível com os barramentos de tensão em 42 volts CC e 14 volts CC, de forma simultânea [44].

Com relação aos aspectos de interferência eletromagnética (IEM), destaca-se a análise conduzida por Klotz, onde se observou que os motores elétricos, adaptados para o barramento de tensão em 42 volts CC, apresentam níveis menores de emissões eletromagnéticas em frequências baixas, devido a menor corrente elétrica conduzida, se comparado com os níveis de emissões de um motor 14V equivalente [47]. Porém, em frequências superiores a 1MHz, as faíscas geradas no comutador pelo sistema de tensão elevada dominam os níveis de emissões eletromagnéticas, fazendo com que um motor em 42V supere os níveis encontrados para um motor em 14V.

#### **2.3.3.2 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Motores Elétricos Pequenos**

Os motores elétricos pequenos são amplamente utilizados em veículos de luxo para executar desde as funções mais básicas como, por exemplo, ajuste de espelhos retrovisores externos e atuação em sistemas de travas elétricas, até as funções mais sofisticadas como, por exemplo, dispositivos massageadores ou ventiladores acoplados aos bancos do veículo [26]. Estima-se, com base na literatura disponível, que a

quantidade de motores elétricos pequenos montados em um veículo de luxo, totalmente equipado, pode atingir facilmente a barreira de uma centena [48].

Por outro lado, a adequação dos motores elétricos pequenos para operação direta através do barramento de tensão em 42 volts CC, envolve a consideração de novos fatores, além dos já descritos no item anterior, que conduzem a uma análise voltada para o processo produtivo de tais componentes [47], [48]. Assim, um dos fatores mais abordados na literatura se refere à adequação do condutor utilizado nos enrolamentos de um motor de tamanho reduzido, uma vez que sua bitola tornar-se-ia extremamente reduzida, resultando em dificuldades no processo produtivo relacionadas à sua fragilidade. Além deste fator, destaca-se, também, o considerável acréscimo no tempo necessário para obtenção do número de espiras requeridas nos enrolamentos do motor, para que este se torne compatível com o barramento de tensão em 42 volts CC. Outros fatores como, por exemplo, o eventual desgaste prematuro das escovas em motores 42V pequenos devido aos arcos e descargas elétricas geradas entre os circuitos do comutador, também, foram considerados na literatura existente [48].

Os principais fornecedores da indústria automobilística consideram que não existe uma solução eficaz, a curto prazo, para a fabricação de motores elétricos pequenos que operem diretamente através do barramento de tensão em 42 volts CC [47]. Como resultado, a grande maioria dos trabalhos publicados abordando este tema considera a utilização de tais motores conectados a um barramento de tensão em 14 volts CC, que estará disponível na forma de STD em 42V / 14V CC, durante o período de transição para sistemas elétricos totalmente em 42V CC.

O trabalho publicado por Klotz, no ano de 2001, é bastante ilustrativo com relação à descrição dos vários métodos que podem ser utilizados para o estabelecimento de um barramento de tensão em 14 volts CC através do barramento de tensão em 42 volts CC

que, eventualmente, estará disponível nos veículos em um futuro próximo [47]. Neste trabalho, ressalta-se que a utilização de conversores CC-CC, centralizados para esta finalidade, deve ser considerada somente quando existirem muitos equipamentos de baixa potência conectados ao barramento de tensão em 14 volts CC. Caso contrário, deve-se considerar sua obtenção através da modulação do barramento de tensão em 42 volts CC em largura de pulso (PWM), de modo a produzir um tipo de sinal que possua tensão efetiva em 14 volts CC. Destaca-se, ainda, neste trabalho, a proposta de acionamento dos motores elétricos pequenos através de um conversor CC-CC, controlado via PWM, ao qual são agregados alguns componentes eletrônicos para atuarem como dispositivos supressores de IEM. Desta forma, apesar dos níveis de emissões eletromagnéticas serem maiores devido à frequência de chaveamento da modulação PWM, a aplicação dos dispositivos supressores de IEM fazem com que tais emissões permaneçam em níveis próximos àqueles encontrados quando o mesmo motor é acionado diretamente por um barramento de tensão em 14 volts CC.

Outras considerações relacionadas à aplicação da modulação do barramento de tensão em 42 volts CC em PWM para acionamento de motores elétricos pequenos em 14V podem ser encontradas em [50], [51].

### **2.3.3.3 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nas Lâmpadas**

A adequação das lâmpadas incandescentes à elevação da tensão do barramento envolve um aumento do comprimento de seu filamento e uma redução de sua espessura. Assim, devido a fatores como vibração, por exemplo, as lâmpadas adaptadas ao barramento de tensão em 42 volts CC possuirão vida e robustez reduzidas, além de reduções em desempenho, eficiência e foco [14], [16]. Entretanto, mencionam-se outras fontes

luminosas que podem substituir as lâmpadas incandescentes em sistemas de tensão elevada como, por exemplo, as lâmpadas a gás xenônio e os diodos emissores de luz (LED), que, além de apresentarem ótima durabilidade, vêm sendo cada vez mais utilizadas nos veículos de luxo modernos. Porém, segundo Matouka e West, enquanto o custo de tais fontes luminosas alternativas impedirem sua aplicação nos modelos de veículos cuja produção alcança larga escala, o sistema de iluminação automotivo continuará utilizando lâmpadas incandescentes, que permanecerão conectadas ao barramento de tensão em 14 volts CC [14], [16].

Por outro lado, alguns trabalhos merecem destaque por analisar eventuais soluções que irão permitir a utilização das lâmpadas 12 volts atuais, em conexão com o barramento de tensão em 42 volts CC [49]-[51]. Observa-se que, algumas propostas de aplicação de conversores CC-CC para geração do barramento de tensão em 14 volts CC, apesar de representarem uma solução que tornaria o uso das lâmpadas muito semelhante às condições encontradas atualmente, foram descartadas devido ao seu elevado custo [49], [50]. Em contrapartida, a proposta de aplicação da modulação em PWM para obtenção do barramento de tensão em 14 volts CC através do barramento de tensão em 42 volts CC, como apresentada por So, agregaria alguns benefícios adicionais ao sistema de iluminação dos veículos de modo mais simples e menos custoso, se comparada com a utilização de conversores CC-CC [49]. Entre estes benefícios pode-se citar, como exemplos, a possibilidade de eliminar os relés usados para o controle das setas indicadoras de direção e farol alto, a possibilidade de ajustar automaticamente o fator de utilização do PWM de acordo com as oscilações de tensão do barramento em 42 volts CC e a possibilidade de adicionar funções de controle de intensidade de iluminação de modo mais simples [49]-[51]. Em adição aos benefícios já citados, destaca-se, ainda, a

possibilidade de substituir as lâmpadas de 12 volts atuais por lâmpadas de 6 volts, notadamente mais robustas e retentoras de melhores características óticas [28].

Com relação às conseqüências do acionamento do sistema de iluminação através da modulação PWM, destaca-se a realização de avaliações práticas, cujos resultados indicam, de forma abrangente, um desempenho superior deste sistema, se comparado com o acionamento direto através de um barramento de tensão em 14 volts CC [49], [51]. Assim, nos trabalhos publicados por So e Berryhill, destacam-se os aspectos relacionados à manutenção da aparência, coloração e luminosidade do filamento das lâmpadas, quando em funcionamento através da modulação PWM, além do substancial aumento da vida média destes componentes quando analisadas por meio da distribuição de Weibull [49], [51]. Outro aspecto interessante ressaltado nestes trabalhos está relacionado com a necessidade de limitação da corrente inicial fornecida às lâmpadas, devido à grande variação da resistência de seu filamento, podendo chegar a apresentar valores de seis a oito vezes menores, quando em temperatura ambiente.

Já com relação aos aspectos de IEM, as primeiras avaliações, conduzidas com base nas normas atualmente disponíveis para o barramento de tensão em 14 volts CC, mostram que os níveis de emissões eletromagnéticas dos sistemas de iluminação acionados através da modulação PWM encontram-se ligeiramente superiores àqueles obtidos, quando o mesmo sistema é acionado por um barramento de tensão em 14 volts CC [51]. Porém, conforme ressaltado na literatura disponível, a aplicação de dispositivos supressores de IEM pode reduzir os níveis de emissões encontrados, levando o sistema a atender as normas em vigência nos dias atuais.

#### **2.3.3.4 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Cabos Elétricos**

O chicote elétrico de um típico veículo de luxo atual possui, em média, mais do que 2 quilômetros de fios, 2000 terminais, 300 conectores, praticamente 1000 circuitos diferentes e chega a pesar até 35kg [54]. Ressalta-se, ainda, que o chicote elétrico é um dos componentes mais caros e complexos do sistema elétrico veicular, sendo que sua complexidade é constantemente incrementada devido à contínua introdução de novos sistemas elétricos [27], [53], [54].

Desta forma, destaca-se a publicação de vários trabalhos que ressaltam os principais aspectos referentes aos benefícios que a eventual implementação do sistema elétrico em 42V CC trará para os chicotes elétricos [14], [16], [27], [52]-[57]. Um dos benefícios mais citados na literatura existente está relacionado com a possibilidade de redução da bitola dos cabos elétricos, resultando em uma conseqüente redução em seu peso e custo. Os primeiros estudos voltados para a análise da redução de bitola dos cabos elétricos, proporcionada pela eventual adoção do sistema elétrico em 42V CC, concluem que a concentração dos circuitos que possuem as menores dimensões ( $0,35\text{mm}^2$  e  $0,50\text{mm}^2$ ) passariam de 63%, para veículos médios, que possuem o sistema elétrico em 14V CC, para 98%, considerando o mesmo veículo com o novo sistema, mantendo-se as perdas constantes [14], [53], [54]. Ainda assim, tais trabalhos ressaltam que a redução da bitola dos cabos elétricos seria limitada por um determinado valor mínimo ( $0,35\text{mm}^2$ ), relacionado à manutenção de sua resistência mecânica, garantindo, deste modo, a integridade dos circuitos elétricos durante a montagem e eventuais reparos no veículo [14], [53]-[55], [57].

Por outro lado, ressalta-se a publicação de trabalhos que, além de considerar a redução da bitola dos cabos elétricos devido à eventual implementação do sistema elétrico em 42V CC, também, consideram este aspecto associado à utilização do conceito de sinais multiplexados nos veículos [53]-[55]. Assim, segundo Neubert, dependendo do grau de



multiplexagem dos sinais presente em um determinado veículo, a maior parte dos circuitos elétricos já possuirão a bitola mínima, o que reduz o potencial de ganhos relacionados aos aspectos peso e custo dos veículos [55]. Neste trabalho, ressalta-se, ainda, que existe um potencial de redução de 40% no peso do chicote elétrico de um veículo que não possui o sistema de multiplexagem de sinais, sendo que este valor é reduzido para até 20%, caso o veículo possua um complexo sistema de multiplexagem de sinais.

Além dos efeitos da introdução do sistema elétrico em 42V CC nos cabos elétricos já mencionados, destacam-se outros como, por exemplo, a possibilidade de redução do diâmetro do feixe de cabos elétricos, permitindo que os chicotes tornem-se mais flexíveis e fáceis de montar, e a possibilidade de redução das perdas associadas à resistência dos cabos elétricos através da adoção de uma solução de compromisso entre a redução de peso e a redução das perdas nos condutores [14], [27], [55], [56]. Outro aspecto interessante relacionado à adoção do barramento de tensão em 42 volts CC refere-se ao desenvolvimento de novas tecnologias de condutores que poderão vir a substituir, em algumas aplicações, os atuais chicotes elétricos utilizados nos veículos [27], [57]-[59]. Neste sentido, mencionam-se duas das tecnologias mais citadas na literatura: circuito impresso flexível e cabos flexíveis horizontais. As vantagens da utilização destas tecnologias envolvem uma grande redução no espaço físico ocupado, além de uma grande redução no peso do chicote elétrico [58].

#### **2.3.3.5 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Semicondutores**

A história do desenvolvimento dos primeiros transistores bipolares de potência está diretamente relacionada com a evolução do sistema de ignição dos automóveis, que

passou a empregar este dispositivo por volta do ano de 1963 [1], [28]. Entretanto, mesmo com a grande proliferação de sistemas eletro-eletrônicos nos veículos atuais, ressalta-se, de forma ilustrativa, que o mercado automotivo representa somente 4% do volume de negócios da indústria eletrônica [28].

Um dos principais fatores que influenciam negativamente a aplicação de semicondutores nos veículos atuais é o custo associado ao requisito de operação em toda a faixa de tensão apresentada pelo sistema elétrico em 14V CC. Como mencionado anteriormente, a variação da tensão neste sistema pode chegar a valores da ordem de 40 volts devido à eventual ocorrência do efeito “load dump” [14], [17], [23], [24], [28].

Como resultado, os semicondutores aplicados em dispositivos automotivos devem ser superdimensionados, tanto com relação à corrente conduzida, afetando diretamente a área da pastilha, quanto com relação à tensão suportada, afetando diretamente sua espessura e dopagem [53], [54]. Ressalta-se, ainda, que apesar deste superdimensionamento afetar o custo dos semicondutores, o efeito “load dump” pode nunca ocorrer em grande parte dos veículos, o que evidencia a necessidade de eliminar esta característica do sistema elétrico automotivo atual [24]. Assim, observa-se que a especificação preliminar para o barramento de tensão em 42 volts CC considera esta necessidade, dentre outros efeitos indesejáveis presentes no sistema elétrico atual [22].

Com relação à eventual elevação da tensão do barramento nos semicondutores, destaca-se a possibilidade de reduzir a corrente necessária para o desenvolvimento de uma determinada potência, resultando em uma correspondente redução na área requerida do semicondutor [53]-[55], [57], [60], [62]-[64]. Assim, como consequência direta da redução em sua área, o custo do semicondutor pode ser reduzido. Como exemplo, mencionam-se alguns trabalhos que sugerem a possibilidade de redução de 50% no custo de um semicondutor utilizado para controlar uma carga de 600W, caso ela seja

transferida para o barramento de tensão em 42 volts CC, onde sua área poderia ser reduzida em até 80% [53]-[55], [60], [67]. Destaca-se, também, a possibilidade de aumentar a potência controlada pelo semicondutor no barramento de tensão em 42 volts CC, através da adoção de uma solução de compromisso entre a redução em seu custo, proporcionada pela redução de sua área, e o aumento da potência controlada, proporcionada pela manutenção de sua área [53]-[55], [60].

De acordo com Miller e Kassakian, caso as previsões de redução de custo dos semicondutores realmente ocorram, a adoção do barramento de tensão em 42 volts CC irá possibilitar uma grande proliferação de seu uso nos veículos, possibilitando a eletrificação de um número cada vez maior de sistemas mecânicos ou hidráulicos [61], [64]. Assim, tais sistemas, que oferecem resistência ao MCI mesmo quando não estão em uso, passariam a incorporar funções inteligentes, fazendo uso da energia de forma mais eficiente, e somente quando necessário, resultando em uma redução no consumo de combustível [53], [54], [61]. Além disso, de acordo com Kahn, a aplicação de semicondutores possibilitará, não somente obter melhor desempenho dos sistemas atuais, mas também desenvolver sistemas capazes de executar novas e complexas funções como, por exemplo, os conversores CC-CC [34].

A proliferação do uso de semicondutores nos veículos irá beneficiar, da mesma forma, a aplicação de dispositivos inversores e retificadores utilizados para controlar o funcionamento do AMPI, cujos efeitos na implementação de sistemas conhecidos como “start-stop”, podem significar um grande avanço rumo aos objetivos de redução da emissão de poluentes e do consumo de combustível [62]-[64], [68]. Outros aspectos importantes foram abordados por Ehsani e Kassakian como, por exemplo, a consideração sobre a geração de energia para acionamento de dispositivos elétricos quando o MCI for desligado pelo sistema “start-stop”. Nesta condição, o AMPI não

poderá gerar a energia requerida para suprir a demanda dos dispositivos elétricos, sendo necessária, portanto, a utilização da própria bateria do veículo [62]. Assim, recomenda-se o uso de centrais de gerenciamento de cargas, capazes de evitar que o EDC das baterias alcancem níveis reduzidos a ponto de impossibilitar a partida do MCI [39].

Já com relação ao desenvolvimento de novos materiais para os semicondutores, destinados a operarem em sistemas elétricos em 42V CC, ressaltam-se alguns trabalhos publicados pelos principais fornecedores da indústria automobilística, com o objetivo de disseminar os resultados de suas pesquisas mais recentes [23], [56], [64]-[68]. Estes trabalhos destacam, de forma abrangente, os principais resultados relacionados ao desempenho dos novos semicondutores quando submetidos, por exemplo, a elevadas temperaturas, compatíveis com aquelas encontradas no compartimento do motor dos veículos atuais, e a picos de sobre-tensões dinâmicas da ordem de centenas de volts, compatíveis com a especificação do barramento de tensão em 42 volts CC. Ressalta-se, ainda, a baixa resistência característica entre dreno e fonte encontrada nos novos semicondutores, permitindo que as perdas associadas a sua utilização sejam reduzidas, além de possibilitar uma redução no tamanho de seus respectivos dissipadores.

Quanto aos aspectos de IEM, resalta-se que os semicondutores, desenvolvidos para o sistema elétrico em 42V CC, devem apresentar uma redução, da ordem de 10dB $\mu$ V, nos índices de IEM conduzida, devido à redução na magnitude da corrente conduzida [67].

#### **2.3.3.6 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Conversores CC-CC**

Os conversores CC-CC, apesar de amplamente empregados nas diversas centrais eletro-eletrônicas atuais com o objetivo de adequar a tensão do barramento à sua tensão de

operação, receberão, devido a eventual aplicação do sistema elétrico em 42V CC nos veículos, a função de tornar-se um meio eficaz para a conexão física entre os barramentos de tensão em 42 volts e 14 volts CC. Muito embora a utilização de conversores CC-CC internos às centrais eletro-eletrônicas seja mantida, novos conversores CC-CC deverão, eventualmente, ser aplicados, exclusivamente, para esta finalidade [53]. Tal componente permitirá, entre outros fatores, beneficiar a alocação dos componentes elétricos entre os barramentos de tensão, de modo a maximizar seu desempenho.

As configurações dos conversores CC-CC, encontradas na literatura, geralmente consideram a utilização de MOSFETs de alta capacidade de tensão e corrente, chaveados através de um sinal modulado em PWM, para atuarem como interruptores de potência e elementos retificadores síncronos [69], [70], [72]. Dispositivos supressores do tipo indutor-capacitor também são considerados, sendo geralmente alocados na região de baixa tensão dos conversores.

No ano de 2000, Pfaelzer publicou um dos primeiros trabalhos relacionados ao desenvolvimento de conversores CC-CC para aplicação em STD em 42V / 14V CC [69]. Neste trabalho, descreve-se o projeto de uma célula de chaveamento, formada por dispositivos MOSFETs, moduladores PWM e dispositivos supressores do tipo indutor-capacitor, utilizada para converter, bidirecionalmente, a energia entre os barramentos de tensão. Alguns anos depois, Pfaelzer publicou um novo trabalho, considerando a conexão de cinco células de chaveamento, em paralelo, para a obtenção de um conversor CC-CC de 1kW de potência [70]. Neste trabalho, ressalta-se a redução do efeito "ripple", presente na corrente transferida entre os barramentos, obtida através da aplicação de várias células de chaveamento conectadas em paralelo entre si.

Já em 2003, Peng publicou um trabalho propondo o uso de conversores CC-CC sem componentes magnéticos e que empregam osciladores internos para a geração dos sinais destinados ao chaveamento dos dispositivos MOSFETs [71]. Neste trabalho, ressalta-se que os indutores, existentes na maioria dos projetos tradicionais de conversores CC-CC, são os componentes mais ineficientes e volumosos deste tipo de equipamento, levando os conversores a operarem em frequências da ordem de dezenas a centenas de kHz, para que seu tamanho e peso possam ser reduzidos. Desta forma, Peng propõe a utilização de conversores CC-CC que operem como multiplicadores da voltagem armazenada nos diversos capacitores do circuito, cujas cargas são mantidas balanceadas durante todo o ciclo de chaveamento [71]. Pode-se citar algumas das vantagens da aplicação deste tipo de conversor CC-CC como, por exemplo, a ausência de componentes magnéticos, alta eficiência, baixo nível de emissão eletromagnética, além de seu reduzido peso e tamanho.

Destaca-se, ainda, o trabalho publicado por Weiner onde os aspectos relacionados à inter-relação dos conversores CC-CC com os sistemas de gerenciamento de cargas são abordados [72]. Neste trabalho, sugere-se que os conversores CC-CC sejam equipados com microprocessadores, que permitam monitorar as tensões de cada barramento, tornando possível a criação de um processo de decisão para permitir a transferência de energia entre eles.

#### **2.3.3.7 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nas Baterias**

Durante um determinado período da história dos automóveis, as baterias foram somente empregadas para fornecer energia ao seu sistema de iluminação [1]. Porém, a partir do desenvolvimento dos primeiros motores de partida e geradores elétricos de CC, as

baterias passaram a desempenhar funções mais complexas como, por exemplo, partir o motor dos veículos, estabilizar a voltagem do sistema elétrico, armazenar a energia elétrica gerada pelos geradores, além de continuar fornecendo energia elétrica para os equipamentos veiculares, principalmente quando o MCI estiver desligado [34].

Nos dias atuais, as discussões, que conduzem à eventual implementação de sistemas de tensão elevada nos veículos automotores têm introduzido novos desafios para os fabricantes de baterias: o desenvolvimento de soluções que viabilizem as baterias de tensão elevada.

Grande parte dos veículos produzidos atualmente são equipados com baterias 12 volts do tipo chumbo-ácido, caracterizadas por possuírem seis células, formadas por conjuntos de placas de chumbo positivas e negativas, intercaladas entre si, submersas em uma solução de ácido sulfúrico [73].

O eventual desenvolvimento de uma bateria 36V, compatível com o barramento de tensão em 42 volts CC, envolverá a triplicação da quantidade de células e de suas interconexões, resultando em um maior tamanho, peso e custo deste componente [14], [16], [28], [34]. Além disso, destaca-se, ainda, a redução da confiabilidade das baterias, devido ao aumento da quantidade das conexões internas, e o grande impacto desta modificação no processo produtivo das mesmas, levando a uma re-avaliação de grande parte das ferramentas de injeção e dispositivos atuais [13], [16], [28].

Por outro lado, destaca-se que, o desenvolvimento de novas tecnologias para as baterias automotivas, motivado primeiramente para aplicação em veículos de propulsão elétrica, têm levado a produção de baterias com potência e energia específicas cada vez maiores [34]. Porém, apesar de apresentarem tamanho reduzido e menor peso, a aplicação de tecnologias de baterias tais como, polímero de lítio e níquel metal hidreto, aos veículos movidos a MCI, ainda são inviáveis do ponto de vista econômico [14], [34], [74].

Assim, até que alguma tecnologia mostre-se adequada, as baterias do tipo chumbo-ácido atuais deverão ser aplicadas aos veículos que, eventualmente, adotarem o barramento de tensão em 42 volts CC, devido a sua vantajosa relação entre custo e benefício [28], [56].

Uma das principais preocupações, motivadas pela eventual adoção do STD em 42V / 14V CC, onde duas baterias do tipo chumbo-ácido seriam montadas no mesmo veículo, relaciona-se com a possibilidade da ocorrência de falhas elétricas, geradas ou pela inversão de baterias ou pela inversão de polaridade, quando da necessidade de reparos ou serviços [56]. De modo a evitar este tipo de falha, destaca-se um recente trabalho nesta área, que considera um projeto diferenciado para os terminais elétricos das baterias de 36V que, além de evitar a inversão de polaridade e o curto-circuito entre os terminais, também auxiliaria na prevenção contra a formação de arcos voltaicos [75].

Outro aspecto que merece destaque dentre as principais preocupações relacionadas à eventual adoção de sistemas de tensão elevada refere-se ao correto dimensionamento das baterias de 36V, face aos elevados requisitos de ciclagem exigidos por sistemas como, por exemplo, “start-stop”. Neste caso, destaca-se a publicação de alguns trabalhos, que apresentam uma metodologia para comparação de desempenho entre vários tipos construtivos de baterias 36V do tipo chumbo-ácido [76]. Destaca-se, ainda, a proposta apresentada por Cox, que considera a aplicação de um sistema de monitoramento dos parâmetros funcionais da bateria, tais como tensão, temperatura, corrente e condutância, de modo a viabilizar uma análise da sua condição de operação para, eventualmente, acionar determinados procedimentos em condições críticas de operação como, por exemplo, baixo EDC e sobrecarga [77].

Por fim, ressalta-se o impacto da utilização de baterias do tipo chumbo-ácido em veículos equipados com STD em 42V / 14V CC e sistema de freios regenerativos. Entenda-se como sistema de freio regenerativo um sistema capaz de recuperar parte da



energia dissipada na forma de frenagem em energia elétrica. Nestas condições, a bateria instalada no veículo deve ser capaz de absorver uma grande quantidade de energia elétrica em um espaço de tempo extremamente reduzido, característica esta não encontrada em baterias do tipo chumbo-ácido [116].

#### **2.3.3.8 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Fusíveis**

O fusível, componente amplamente utilizado no sistema elétrico automotivo atual, tem como função primária a proteção dos cabos elétricos, presentes nos circuitos nos quais este dispositivo encontra-se conectado [78]. O nível de proteção exercida, considerando-se o sistema elétrico em 14V CC, limita-se aos eventuais cenários de falhas existentes neste sistema como, por exemplo, curtos-circuitos para terra. A adequação dos fusíveis ao eventual STD em 42V / 14V CC, envolve um dos maiores desafios relacionados à implementação deste tipo de sistema, motivado pelo mecanismo de sustentação dos arcos voltaicos e pelos níveis de energia associados, ambos notoriamente mais nocivos em sistemas de tensão elevada [64].

As primeiras análises do efeito da aplicação de STD em 42V / 14V CC nos fusíveis automotivos foram conduzidas utilizando-se fusíveis 14V, mesmo sendo estes componentes dimensionados para um limite de operação em 32 volts [14], [56], [57], [78]. Como resultado destas avaliações, observou-se uma série de falhas, tais como, a ocorrência prolongada de arcos voltaicos, a solda dos terminais dos fusíveis nos contatos do seu alojamento, a corrosão dos terminais dos fusíveis quando conectados em circuitos “energizados” e o derretimento e quebra do corpo dos fusíveis [56], [57], [79]. Apesar do resultado, destaca-se que as conseqüências destas avaliações foram fundamentais para mostrar a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias de

fusíveis para operação em tensões elevadas [14], [27], [56], [57], [79]. Além disso, ressalta-se, ainda, a necessidade de prover aos novos fusíveis, e a seus receptáculos, a capacidade de evitar a montagem indevida dos fusíveis desenvolvidos para o sistema elétrico em 14V CC, em locais específicos para os fusíveis destinados ao barramento de tensão em 42 volts CC [14], [79].

Com relação às novas tecnologias para os fusíveis automotivos, destaca-se a proposta de utilização de dispositivos eletrônicos, que atuam como sensores de corrente elétrica, desconectando-os quando este parâmetro assume valores maiores do que um limite pré-determinado [56], [57], [80]. Destacam-se, ainda, outras propostas, relacionadas com o uso de fusíveis semelhantes aos atuais, porém utilizando novas ligas em seu elo fusível e corpo, capazes de resistir a maior solicitação de tensão [56], [57].

Assim, os trabalhos publicados por Jaspar e Williams, em 2000, destacam-se por apresentarem uma proposta de fusíveis específicos para o barramento de tensão em 42 volts CC, tendo como base a utilização de novos materiais e acabamentos [78], [79]. Neste trabalho, ressalta-se que a aplicação de elos fusíveis de zinco, terminais de cobre revestido, além da utilização de um corpo reforçado, que contenha uma barreira interna para evitar a formação de arcos voltaicos, permitiria, aos fusíveis atuais, tornarem-se compatíveis com o barramento de tensão elevada. Os aspectos relacionados à intercambiabilidade entre os fusíveis para os barramentos de tensão em 42 volts e 14 volts CC, bem como a elevação da tensão máxima de operação de 32V para 60V, também, foram abordados nestes trabalhos.

Um dos maiores desafios para a aplicação de fusíveis em eventuais STD em 42V / 14V CC, está relacionado à prevenção contra a ocorrência de falhas envolvendo os barramentos de tensão [55], [57]. Deste modo, a prevenção contra novos tipos de falhas como, por exemplo, o curto-circuito entre os barramentos, cuja consequência seria a

elevação da tensão do barramento em 14 volts para 42 volts CC, ou a perda de um terra comum, cuja consequência seria a aplicação de uma tensão reversa no barramento de tensão em 14 volts CC, devem ser analisadas devido ao severo dano que sua ocorrência pode causar aos componentes eletro-eletrônicos embarcados. Ressalta-se, ainda, que este tema tem exigido um esforço considerável dos integrantes dos fóruns internacionais mencionados anteriormente, no sentido de obter soluções eficazes que evitem a ocorrência deste tipo de falha [81]. Uma das propostas mais consideradas, baseia-se na utilização de critérios mais rígidos para o projeto dos chicotes elétricos como, por exemplo, maximizar a separação física entre os barramentos de tensão, seja através de rotas distintas, seja através da aplicação de suportes mecânicos isolantes, com o objetivo de minimizar a ocorrência de curtos-circuitos [55], [81].

#### **2.3.3.9 Influência da Adoção do Sistema Elétrico em 42V CC nos Relés, Interruptores e Conectores**

Os relés, interruptores e conectores existentes nos veículos automotores atuais são, em sua grande maioria, os principais equipamentos utilizados com o objetivo de possibilitar um meio controlável para o acionamento de dispositivos elétricos como, por exemplo, os motores elétricos utilizados em sistemas de vidros elétricos.

Um dos principais critérios de projeto para estes equipamentos relaciona-se ao seu desempenho face aos arcos voltaicos gerados no momento em que um dispositivo elétrico é desconectado. No instante em que os contatos elétricos iniciam seu movimento de abertura, a área de contato reduz-se e seu material, eventualmente, derrete, como resultado da elevada densidade de corrente elétrica [82]. Tal processo, gera um aumento de temperatura que conduz à evaporação de uma parcela do material

dos contatos elétricos, provocando, conseqüentemente, a ionização dos gases entre os contatos, ou seja, o arco voltaico [84]. Observa-se que no caso dos conectores, a ocorrência dos arcos voltaicos provoca sua inutilização, devido ao derretimento de seus terminais [88].

Por outro lado, nota-se que os arcos voltaicos gerados em sistemas elétricos em 14V CC são inerentemente instáveis, ou seja, eles quebram-se, assim que se formam [16]. Em contrapartida, os arcos gerados em sistemas de tensão elevada são instáveis, somente se uma distância mínima existir entre os condutores [14], [51], [55], [56], [83], [85]. Assim, observa-se que grande parte dos relés, interruptores e conectores atuais não podem ser utilizados nos eventuais sistemas elétricos em 42V CC [82]-[88].

Um dos trabalhos mais detalhados sobre o efeito de degradação provocada pelos arcos voltaicos nos contatos elétricos de relés ou interruptores, foi publicado por Leung [82]. Neste trabalho, destaca-se que os arcos voltaicos são responsáveis, não somente pela erosão dos contatos, devido ao derretimento de seu material, mas, também, pela solda dinâmica entre os mesmos, causada durante a formação da conexão elétrica. Outro fato interessante, ressaltado neste trabalho, está relacionado com a variação da intensidade de erosão encontrada, de acordo com o tipo de carga controlada [82]-[84].

Alguns outros trabalhos destacam-se devido às análises relativas ao desenvolvimento de eventuais soluções para adequar os relés e interruptores automotivos ao STD em 42V / 14V CC [83]-[87]. Nestes trabalhos, observa-se que as análises concentraram-se no acionamento de cargas indutivas, que provocam arcos de maior duração e comprimento, devido à energia armazenada nos indutores e a constante de tempo do circuito. Outras considerações, no sentido de reduzir os efeitos dos arcos voltaicos, foram avaliadas com resultados satisfatórios como, por exemplo, o aumento da área de contato, a utilização de contatos múltiplos, o aumento da distância entre os contatos e a utilização de novos

materiais para os contatos. Ressalta-se, ainda, que os materiais dos contatos elétricos utilizados nos relés e interruptores atuais, apesar de apresentarem um ótimo desempenho para os sistemas elétricos em 14V CC, quando aplicados em sistemas de tensão elevada, favorecem a formação de arcos voltaicos de duração e comprimento maiores do que aqueles encontrados quando são utilizados materiais menos nobres [85]. Com relação aos conectores, os trabalhos publicados por Schramm e Sakiyama merecem destaque, por abordarem os principais aspectos relacionados à adequação destes dispositivos ao STD em 42V / 14V CC [88], [89]. Nestes trabalhos, observa-se que os conectores, além de estarem sujeitos aos efeitos dos arcos voltaicos, devem resistir aos efeitos de vibração e, conseqüentemente, intermitência dos contatos. Além disso, os conectores devem possuir, também, uma isolação suficiente para evitar a fuga de corrente entre os contatos de suas cavidades, fenômeno este potencializado devido à utilização de tensões elevadas.

Uma das mais interessantes propostas apresentadas com o objetivo de reduzir os efeitos nocivos dos arcos voltaicos nos relés, interruptores e conectores, está relacionada com a aplicação de imãs localizados de modo perpendicular ao caminho do arco [55], [89]. Desta forma, quanto maior for a densidade do fluxo magnético, maior será o caminho percorrido pelo arco, provocando uma redução em sua duração, energia e, conseqüentemente, nos danos causados.

Destaca-se, ainda, outra proposta apresentada com este mesmo objetivo, relacionada com a utilização da modulação PWM para o acionamento dos dispositivos elétricos conectados através dos relés, interruptores e conectores [51]. Esta proposta baseia-se na eliminação do efeito do arco voltaico no momento em que o pulso, típico da modulação do PWM, é desligado.

Já com relação aos efeitos de IEM originados através da ocorrência dos arcos voltaicos, o trabalho publicado por Diez merece destaque por abordar alguns aspectos da interação deste fenômeno com os cabos elétricos veiculares [87]. Neste trabalho, observa-se a possibilidade de utilização de modelos matemáticos com o objetivo de prever as tensões induzidas nos cabos elétricos devido à ocorrência de arcos voltaicos.

#### **2.3.4 Considerações Sobre as Propostas de Arquiteturas para o Sistema Elétrico em 42V CC e CA**

O trabalho publicado por Hellmann, em 1991, pode ser considerado um dos primeiros estudos a abordar propostas de arquiteturas para implementação de sistemas de tensão elevada nos veículos automotores [13]. Porém, devido à fase inicial das discussões sobre este tema, as propostas apresentadas não consideravam alguns aspectos que, anos mais tarde, tornar-se-iam fundamentais para a viabilidade destes sistemas, tais como, sua tensão nominal e a utilização do AMPI.

Em meados da década de 1990, outros trabalhos foram apresentados com o objetivo de analisar propostas de modificações do sistema elétrico automotivo em 14V CC, permitindo sua utilização em conjunto com equipamentos elétricos de consumo elevado [90]-[92]. Nestes trabalhos, descreve-se que o grande número de dispositivos eletro-eletrônicos, em conjunto com a instalação de acessórios elétricos, são os maiores responsáveis por problemas de descarga de bateria, que poderiam ser resolvidos com a utilização de um sistema de gerenciamento de energia associado a uma arquitetura com duas baterias 12 volts. Nesta proposta, o sistema de gerenciamento de energia seria responsável por supervisionar o EDC das baterias, atuar no acionamento dos dispositivos elétricos de forma a evitar picos de demanda simultâneos e evitar que os equipamentos elétricos, que continuam ativos quando o veículo é desligado,

descarreguem a bateria a ponto de impossibilitar a partida do MCI. Outro aspecto importante, considerado nestes trabalhos, foi a utilização de duas baterias, independentemente projetadas, para executar as funções específicas de partida e fornecimento de energia enquanto o veículo estiver desligado. Desta forma, uma das baterias seria otimizada para o fornecimento de energia instantânea, enquanto a outra seria projetada para suportar descargas profundas, sem prejuízos para sua vida útil.

Já o final da década de 1990, destaca-se como o período de maior publicação de trabalhos relacionados a proposições de eventuais arquiteturas para implementação de sistemas elétricos veiculares, com barramento de tensão elevada [8], [17], [23], [24], [28], [34], [53], [54], [61], [93]-[96]. Assim, destacam-se, como exemplos, as propostas de arquiteturas para sistemas de tensão elevada em CA e CC, além de STD em 42V / 14V CC e sistemas de distribuição de sinais multiplexados. Menciona-se, de forma ilustrativa, que a origem da aplicação de sistemas em CA em veículos automotores, baseou-se na observação das redes de distribuição de energia utilizadas nos aviões, navios e estações espaciais [8], [34]. Além disso, ressalta-se, ainda, que as indústrias de aeronaves e satélites, decidiram aumentar a tensão do barramento elétrico de seus equipamentos, assim que notaram um aumento da demanda por energia elétrica [8].

De modo geral, a maior parte das arquiteturas propostas nesta época são bastante semelhantes, distinguindo-se, basicamente, pela aplicação de barramentos de tensão em CA ou CC. Observa-se, contudo, que grande parte destes trabalhos destacam, de forma abrangente, as principais diferenças entre a mudança no valor da tensão nominal do barramento elétrico, ocorrida há 50 anos, e a eventual transição atual, que será gradual, com os sub-sistemas 14V e 42V CC operando lado a lado, por algum tempo, em uma arquitetura mais complexa [62]-[64].

### 2.3.4.1 Propostas de Arquiteturas para o Sistema Elétrico em 42V CA

Os trabalhos que consideram a utilização de barramentos de tensão elevada em CA ressaltam, de forma geral, os benefícios da aplicação deste sistema, tais como, a obtenção de qualquer valor de tensão, a partir do uso de transformadores baratos, e relativamente pequenos, e a possibilidade de uso de motores elétricos à indução, mais robustos e confiáveis que os motores CC [8], [17], [23], [24], [28], [54], [61], [93]-[95]. Outros trabalhos ressaltam, ainda, os principais desafios da aplicação de sistemas em CA nos veículos como, por exemplo, a complexidade do sistema eletrônico de controle do AMPI e do conversor de energia, além dos aspectos relacionados a IEM, devido à elevada frequência do barramento [23], [24], [28].

Nota-se, com poucas variações, que o sistema elétrico com barramento de tensão elevada em CA seria formado por um alternador trifásico, um conversor CA-CA, utilizado para regular a saída de frequência e tensão variável do alternador, e um conversor CA-CC, utilizado para manter uma bateria 12 volts carregada. A bateria 12 volts é necessária em sistemas de CA para suprir os picos de demanda, acionar o motor de partida em CC e fornecer energia aos dispositivos elétricos que permanecem ativos quando o MCI é desligado. O motor de partida em CC, por sua vez, também é necessário em sistemas de CA monofásicos, devido à baixa capacidade de torque de um motor elétrico tipo indução [94].

Em 1998, Masrur publicou alguns trabalhos que abordaram, detalhadamente, as consequências da aplicação de arquiteturas, com sistemas de distribuição de energia em CA, nos componentes do sistema elétrico automotivo, tais como motores e cabos [94], [95]. Neste trabalho, destaca-se a possibilidade de redução de custo do sistema elétrico devido à introdução de sistemas em CA trifásicos. Por outro lado, em 1996, Khan já



havia realizado um estudo da aplicação deste tipo de arquitetura, onde foram destacados alguns efeitos indesejáveis como, por exemplo, a necessidade de utilizar cabos de retorno de corrente, conversores CA-CC para a carga da bateria e a importância da análise do efeito pelicular no cálculo de resistência dos circuitos elétricos [34].

#### 2.3.4.2 Propostas de Arquiteturas para o Sistema Elétrico em 42V CC

A utilização de barramentos de tensão elevada em CC, também, foi analisada por uma série de trabalhos publicados no final da década de 1990 [23], [34], [53], [54], [61], [93], [96]. Dentre os benefícios da utilização deste tipo de sistema, ressaltam-se, como exemplos, a ampla disponibilidade de dispositivos eletro-eletrônicos já desenvolvidos para este sistema, a obtenção de margens de regulação de tensão mais estreitas para o barramento de tensão em 14 volts CC, por meio da utilização de conversores CC-CC e a capacidade de transferência de energia entre os barramentos de tensão em 42 volts e 14 volts CC, em caso de descarga de uma das baterias. Observa-se, com poucas variações, que o sistema elétrico com barramento de tensão em CC seria formado por um AMPI trifásico, um conjunto inversor e retificador para acionamento do AMPI, um conversor CC-CC e as baterias 36 e 12 volts, conforme ilustra a Fig. 2.2.

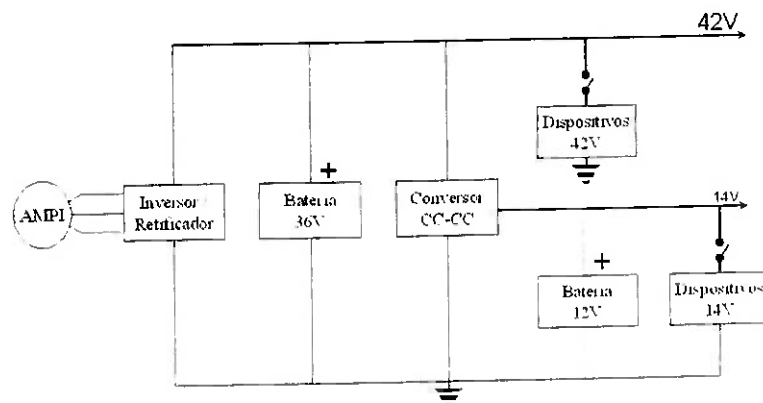
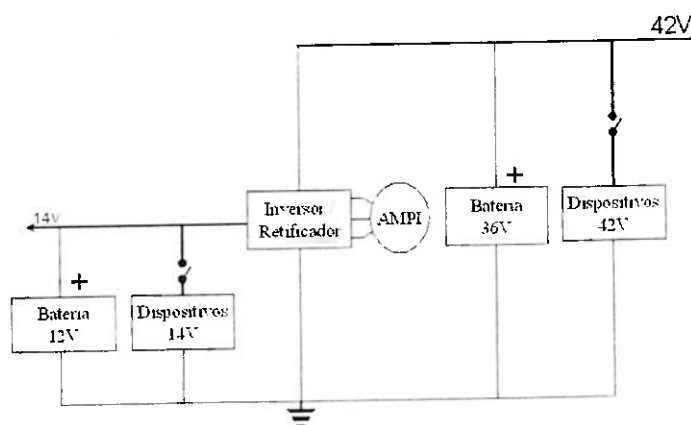


Fig. 2.2 – Exemplo típico de uma arquitetura para o sistema elétrico em 42V CC

Nota-se, ainda, que a utilização de duas baterias, independentemente projetadas, além de permitir a otimização de suas funções, permite, também, que o conversor CC-CC seja dimensionado pelo valor da potência média especificada para o barramento de tensão em 14 volts CC, ao invés de seu valor de pico [23].

Os trabalhos publicados por Miller, neste período, divulgaram dois modelos de arquiteturas para implementação de STD em 42V / 14V CC que receberam atenção especial dos principais grupos de trabalho internacionais devido a sua elevada viabilidade técnica [34], [53], [61], [96]. Um destes modelos baseia-se na utilização de um AMPI trifásico, um inversor, um conversor CC-CC e as baterias 36 e 12 volts, que seriam conectadas conforme ilustra a Fig. 2.2. O outro modelo proposto por Miller considera a utilização de um AMPI com enrolamentos duplos independentes no estator para geração de energia, simultaneamente, para os barramentos de tensão em 42 volts e 14 volts CC, conforme ilustra a Fig. 2.3.



**Fig. 2.3** – Exemplo típico de uma arquitetura para o sistema elétrico em 42V CC

Outro trabalho publicado por Miller, na mesma época, destaca-se devido à proposta de utilização de uma arquitetura com barramentos de tensão em CC simétricos em +12V e

-12V, através da aplicação de um único alternador tipo Lundell, com enrolamentos duplos independentes no estator, capaz de gerar energia elétrica diretamente compatível com a especificação de tensão de cada barramento [93].

Já no início desta década, observa-se que, grande parte dos trabalhos publicados concentraram suas análises em propostas de arquiteturas com barramentos de tensão em CC, o que, de certa forma, conduziu à elaboração de alternativas mais detalhadas, abrangendo novos aspectos para a eventual implementação deste tipo de sistema de tensão elevada [63], [64], [81], [97]-[100].

Assim, um dos aspectos mais considerados em alguns destes trabalhos foi a possibilidade de remoção da bateria de 12 volts, até então empregada nos STD em 42V / 14V CC, como ilustra a Fig. 2.2 e Fig. 2.3 [63], [64], [81], [98]. Nesta condição, apesar da utilização da bateria de 12 volts proporcionar um aumento da confiabilidade do sistema, através da transferência de energia entre os barramentos, sua remoção proporcionaria uma redução no custo e peso do veículo, além de uma modificação no projeto dos conversores CC-CC, que passariam a ser unidirecionais, com potência de saída determinada pelo pico de demanda do barramento de tensão em 14 volts CC. Destaca-se, ainda, que um sistema eletrônico de gerenciamento da energia instalada no veículo, permitiria evitar que a bateria de 36 volts descarregue, impossibilitando a partida do MCI do veículo.

Já os trabalhos publicados por Nicastrì foram responsáveis por introduzir um novo aspecto às discussões para a eventual implementação de STD em 42V / 14V CC: a provisão para conexão de baterias auxiliares de partida rápida, ou "jump start" [99], [100]. A proposta apresentada neste trabalho baseia-se na disposição de um conector específico para partidas rápidas nos veículos, em conjunto com um sistema de controle capaz de verificar a compatibilidade entre a tensão dos barramentos antes de realizar

efetivamente a conexão elétrica. Ressaltam-se, ainda, outros trabalhos que apresentam alternativas construtivas para o desenvolvimento de conectores para esta finalidade [101].

Por outro lado, destaca-se, também, o trabalho publicado por Bigorra, onde são considerados aspectos relacionados à utilização de arquiteturas multiplexadas e distribuídas, através do conceito de zoneamento de potência [102]. Neste trabalho, sugere-se que o veículo seja dividido em três zonas principais (motor, passageiros e bagagem), onde cada uma delas possuiria uma central eletrônica capaz de processar sinais multiplexados e acionar os dispositivos elétricos correspondentes, por meio de conversores CC-CC incorporados. Outros trabalhos que, também abordaram o conceito de arquiteturas multiplexadas, em conjunto com o STD em 42V / 14V CC, porém, de modo mais detalhado, explorando os benefícios da integração destas tecnologias, podem ser encontrados em [103], [104].

Ressalta-se que, cada montadora está livre para definir a arquitetura que melhor satisfaz seus próprios critérios, uma vez que inexistem normas que especifiquem um padrão a ser, eventualmente, adotado. Assim, a aplicação de ferramentas adequadas que permitam a realização de uma análise comparativa eficaz entre as arquiteturas disponíveis torna-se fundamental, para que seja possível determinar a melhor topologia a ser empregada, face às diferentes classes de veículos encontradas no mercado.

### **2.3.5 Considerações Sobre as Ferramentas Utilizadas como Auxílio no Desenvolvimento do Sistema Elétrico em 42V CC**

As principais ferramentas de desenvolvimento mencionadas na literatura englobam, de forma abrangente, tanto a realização de simulações computacionais, quanto à realização de testes com protótipos funcionais com o objetivo de orientar, de forma objetiva, a

escolha da melhor alternativa. Com relação às ferramentas que consideram a realização de simulações computacionais, destaca-se o trabalho publicado por Afridi, em 1994, onde se considerou a utilização de um software de cálculo de atributos múltiplos, tais como peso, custo, perdas elétricas e probabilidade de falha, resultando na análise de inúmeras alternativas de arquiteturas de modo quantitativo [17]. Esta ferramenta, conhecida como MAESTrO, foi desenvolvida para calcular os atributos mencionados para as arquiteturas analisadas, baseando-se em modelos internos para cada componente elétrico automotivo, obtidos e refinados de modo empírico, através de informações de fabricantes, montadoras e especialistas do setor. Ressalta-se que, o atributo perdas elétricas, diferente dos demais por depender da topologia da arquitetura analisada, é calculado através de simuladores de circuitos como, por exemplo, o SPICE. Como resultado, o software MAESTrO gera representações gráficas do atributo custo em relação aos demais, onde as arquiteturas são identificadas por pontos em cada gráfico.

Outras ferramentas de desenvolvimento que fazem uso de simuladores computacionais como, por exemplo, SIMULINK, também podem ser encontradas na literatura [105], [106]. Destaca-se, assim, a possibilidade de experimentação de uma ampla faixa de combinações entre as tecnologias emergentes atuais, eventualmente buscando até sinergias entre elas que, de outra forma, tornar-se-ia uma atividade bastante complexa devido ao custo e tempo requeridos para a execução de testes práticos.

Já o trabalho publicado por An merece destaque por considerar a sobreposição de efeitos entre a tecnologia de STD em 42V / 14V CC e outras, em uma análise da amortização do custo tecnológico adicional em função da economia de combustível que ela proporciona [106].

Por outro lado, destaca-se que, apesar da praticidade das simulações computacionais, a realização de testes com protótipos funcionais é importante, devendo ser executada para

validar os resultados das simulações e elevar o nível de conhecimento a respeito do comportamento dos novos componentes necessários para os STD em 42V / 14V CC, tais como o AMPI.

Um dos primeiros trabalhos publicados com o objetivo de analisar os resultados práticos da economia de combustível proporcionada através da implementação de um STD em 42V / 14V CC nos veículos automotores, foi conduzido por Tamai em 2001, motivado por aspectos relacionados ao controle ambiental, provenientes da Europa e Japão [107], [108]. Neste trabalho, considerou-se a instalação de um AMPI tipo indução e de um inversor em um veículo de teste, em adição a implementação das funções "start-stop" e freio regenerativo. Durante a operação do freio regenerativo, a eletrônica de controle do AMPI transforma parte da energia, que seria dissipada durante a frenagem, em energia elétrica, através da aplicação de um torque reativo máximo no alternador, fazendo com que este gere sua potência máxima, carregando as baterias do veículo. Como resultado Tamai observou uma melhora no consumo de combustível da ordem de 7%, de acordo com o ciclo composto da "Environmental Protection Agency" (EPA), em comparação com o mesmo veículo sem o STD em 42V / 14V CC.

Destaca-se, ainda, a publicação de vários outros trabalhos responsáveis por introduzirem novos aspectos às considerações sobre a introdução de STD em 42V / 14V CC como, por exemplo, o uso de fios de secção transversal retangular no enrolamento dos AMPI, técnicas para refrigeração da sua eletrônica de controle e resultados de avaliações de partida em temperaturas extremamente baixas [109], [110].

Novos resultados de avaliações de consumo de combustível, em protótipos funcionais, foram publicados em trabalhos como o de Gao, em 2002 [111]. Neste trabalho, considerou-se a aplicação do STD em 42V / 14V CC, com as funções "start-stop" e freio regenerativo, em um veículo de teste que foi submetido à avaliação de rodagem

segundo o procedimento FTP 75, que estabelece um percurso padrão com ciclos de paradas e partidas [112]. Como resultado, Gao observou uma redução no consumo de combustível da ordem de 30%.

Nesta mesma época, a Toyota lançava no mercado japonês o Toyota Crown Royal Sallon, o primeiro veículo do mundo a oferecer, como opcional, um pacote de redução de consumo de combustível formado exclusivamente pelo STD em 42V / 14V CC [113]-[115]. O sistema implementado pela Toyota é formado por um AMPI, duas baterias, um inversor e um conversor CC-CC e incorpora as funções “start-stop” e freio regenerativo. Algumas soluções adotadas pela Toyota são bastante interessantes e merecem ser mencionadas como, por exemplo, a localização de todos os módulos eletrônicos de controle do STD em 42V / 14V CC em um pacote único, refrigerado pela água de resfriamento do motor, e a existência de uma embreagem magnética que desacopla o motor do circuito da correia de acessórios, de modo que o AMPI possa acionar seus componentes, como o compressor do sistema condicionador de ar, quando o motor se encontrar desligado por ação do sistema “start-stop”. As avaliações realizadas durante a fase de projeto do veículo indicaram uma redução no consumo de combustível da ordem de 15%, de acordo com o ciclo padrão japonês. Observa-se, ainda, que apesar do sistema elétrico em 42V CC não ser o objetivo inicial da Toyota para o veículo em questão, o projeto executado, além de se mostrar fundamental por permitir alcançar as metas definidas para o consumo de combustível, mostrou-se flexível o suficiente para ser adaptado em outros veículos, sem profundas modificações em seu projeto original [113], [115].

Por outro lado, Spillane, em 2003, publicou um interessante trabalho, onde verificou que grande parte da energia elétrica obtida através da regeneração da energia de frenagem, era perdida, pois as baterias do tipo chumbo-ácido não são capazes de

absorver uma grande quantidade de energia elétrica em um reduzido espaço de tempo [116]. Neste trabalho, ressalta-se que, a eventual aplicação de ultracapacitores pode, ser uma solução para a absorção da energia regenerada da frenagem, permitindo, inclusive, sua utilização para a partida do veículo, o que significa que as baterias poderiam deixar de executar esta função, aumentando, desta forma, sua vida útil.

Já com relação aos aspectos de IEM, Piazza publicou um dos mais importantes trabalhos, tendo em vista avaliar o comportamento do STD em 42V / 14V CC, uma vez que novos sistemas eletro-eletrônicos mais complexos e sensíveis serão mais freqüentemente aplicados [117]. Neste trabalho, destaca-se que, apesar da ausência de normas que estabeleçam os limites de emissões eletromagnéticas para o sistema elétrico em 42V CC, os conversores CC-CC e os distúrbios transientes causados pelo acionamento de cargas de elevado consumo elétrico constituem as principais preocupações relacionadas a IEM nos veículos automotores. Entretanto, de acordo com os testes realizados, o acionamento de cargas em 42 volts produz picos de corrente e tensão ligeiramente superiores aos encontrados em sistemas elétricos em 14V CC, sendo que seu tempo de subida e descida são maiores, o que indica que, em termos de conteúdo harmônico, os sistemas elétricos em 42V CC possuem melhor desempenho. No caso de uso de semicondutores para o acionamento de cargas em 42 volts, Piazza observou que os picos de tensão e corrente, assim como o conteúdo harmônico, reduzem-se ainda mais, face às características de acionamento de tais dispositivos [117]. Observa-se, por fim, que apesar da possibilidade do sistema elétrico em 14V CC ser aperfeiçoado de modo a receber novos e exigentes dispositivos elétricos, as principais montadoras da indústria automobilística incentivam o desenvolvimento de projetos de STD em 42V / 14V CC, de forma a serem implementados em produção, assim que se tornem necessários [119]-[122].



### **2.3.6 A Expectativa Atual de Implementação do Sistema Elétrico em 42V CC**

O ano de 1996, pode ser destacado devido ao grande entusiasmo proporcionado pelas discussões realizadas nos principais fóruns internacionais, quando a expectativa para a implementação do STD em 42V / 14V CC era considerada imediata [123]. Entretanto, a publicação de trabalhos que analisaram em maior profundidade os impactos da implementação do STD em 42V / 14V CC nos veículos automotores, resultou na consideração de novos aspectos à discussão internacional, que, por fim, foram responsáveis, por postergar em alguns anos, a implementação de tal sistema [123]-[127].

A ausência de especificações para a certificação de grande parte dos componentes elétricos automotivos, destinados a operarem no STD em 42V / 14V CC, em conjunto com o elevado custo relacionado à criação de ferramentas e dispositivos para a fabricação de amostras para testes, são alguns dos aspectos responsáveis pelo atraso na introdução de sistemas de tensão elevada [81], [123]-[126].

Outro aspecto que merece destaque está relacionado à crise macroeconômica mundial, em especial a dos EUA, notadamente um dos países que mais incentivam o desenvolvimento de novas tecnologias [127]. Nestas condições, a indústria automobilística, de forma abrangente, viu-se obrigada a rever seus produtos e projetos de modo a valorizar, prioritariamente, aquelas funções do veículo que realmente agregam valor ao consumidor, ao invés de simplesmente adicioná-las ao mesmo. Um dos veículos recém-lançados que mais causaram polêmica devido à dificuldade de acessar e controlar suas mais de 700 funções, muitas delas consideradas questionáveis foi o BMW série 7 [124]. Ressalta-se, que a BMW utilizou, neste projeto, conceitos

ergonômicos e de interface homem-máquina, em um nível nunca antes observado no projeto de um veículo de passeio.

Como resultado da conjunção destes fatores, a indústria automobilística vive um impasse causado pela ausência de um projeto de veículo com o STD em 42V / 14V CC, cuja escala seria suficiente para incentivar seus fornecedores a investirem no desenvolvimento de novos componentes, e à real necessidade de tal sistema, uma vez que o sistema elétrico em 14V CC atual tem apresentado evoluções satisfatórias no sentido de adequar a geração de energia com a demanda requerida pelos novos dispositivos elétricos instalados [81], [123], [125]-[127]. Assim, devido à ausência de componentes para a realização de testes, grande parte das montadoras não são capazes de quantificar os reais benefícios da implementação do STD em 42V / 14V CC nos veículos, no que diz respeito a eventuais reduções no consumo de combustível e nos índices de emissão de poluentes.

Por outro lado, destaca-se que grande parte das montadoras ainda acreditam que o sistema elétrico em 42V CC será introduzido em um período de dois a quatro anos e que, apesar do custo adicional, os consumidores irão demonstrar boa aceitação devido tanto ao maior nível de conscientização ambiental, decorrente da crescente preocupação mundial relacionada a este tema, quanto aos benefícios que tal sistema proporcionará como, por exemplo, a redução no consumo de combustível [126]. Uma das razões que levam as montadoras a acreditarem na introdução do sistema elétrico em 42V CC se traduz da observação das necessidades dos principais mercados consumidores de veículos: Os consumidores dos EUA desejam funções que lhes sejam úteis, os consumidores Europeus desejam menor consumo de combustível e os Japoneses desejam a funcionalidade do sistema “start-stop” [126].

Desta forma, observa-se que as principais montadoras do mercado automotivo conduzem estudos para a implementação do STD em 42V / 14V CC, em veículos de baixo volume, sem que exista um compromisso de início de produção [39], [126], [127]. Especula-se que a PSA Peugeot Citroën, em um veículo de passageiros, e a GM e a FORD, em veículos utilitários esportivos, introduzam o STD em 42V / 14V CC em 2005. Já a Daimler-Chrysler e a Volvo planejam introduzir o sistema em seus veículos a partir do ano de 2005. Como exceção, destaca-se a Toyota, que lançou em 2001 o primeiro veículo equipado com o STD em 42V / 14V CC, Toyota Crown Royal Sallon, disponível somente para o mercado Japonês.

### **2.3.7 Inter-Relações entre Algumas Tecnologias Emergentes Aplicáveis aos Sistemas Embarcados e o Sistema Elétrico em 42V CC**

A indústria automobilística, de forma abrangente, vem sendo constantemente desafiada, ao longo dos últimos anos, a produzir veículos de acordo com aspectos normativos, ambientais e econômicos cada vez mais severos. Nota-se, entretanto, que a busca pela redução nos índices de emissão de poluentes e por motores mais eficientes, resultando em um menor consumo de combustível, além de ser motivada pelo atendimento a requisitos normativos, passou a ser motivada, também, pela obtenção de uma vantagem competitiva perante os concorrentes [128], [129]. Uma das tecnologias desenvolvidas com este objetivo, e que faz uso de novos sistemas de propulsão, formados ou auxiliados por motores elétricos e um grande número de baterias, é conhecida pelos veículos chamados de elétricos ou híbridos, sendo as empilhadeiras industriais um exemplo amplamente utilizado nos dias atuais [128]-[130].

Apesar dos veículos de propulsão elétrica já existirem no mercado, sendo o GM EV1 um dos exemplares mais conhecidos e antigos, os veículos híbridos, geralmente

equipados com MCI de características reduzidas e motores elétricos que as complementam, são mais comumente encontrados [129]. A vantagem associada ao maior número de veículos híbridos no mercado, em comparação aos veículos de propulsão puramente elétrica, está relacionada com a maior autonomia destes veículos, além de uma maior infraestrutura instalada para re-abastecimento [130].

Por outro lado, o aperfeiçoamento da tecnologia das células de combustível automotivas, permitirá, aos veículos de propulsão elétrica, desenvolver uma maior autonomia, uma vez que parte da energia elétrica consumida será gerada por este dispositivo [131]-[135]. Destaca-se, ainda, a eventual eliminação de parte das baterias instaladas, além do alternador, por meio da utilização desta tecnologia [134]. [135].

Considerando-se uma escala cronológica, com base no estágio de desenvolvimento tecnológico atual, estima-se que os veículos equipados com dispositivos de tração elétrica, seguidos por veículos equipados com o STD em 42V / 14V CC e com células de combustível estarão disponíveis comercialmente, nesta seqüência, ao longo das próximas décadas [134], [135]. Observa-se, no entanto, que, no futuro, quando todas estas tecnologias tornarem-se economicamente viáveis, elas se inter-relacionarão, de modo a permitir a otimização dos dispositivos e características existentes entre as mesmas [136].

Com relação aos veículos híbridos ou elétricos, por exemplo, esta sinergia é discutida em uma série de trabalhos que analisam a possibilidade da utilização do sistema elétrico em 42V CC para propulsão do veículo, em substituição ao sistema elétrico em 300V utilizado atualmente [137]-[140]. Estes trabalhos destacam, ainda, aspectos relacionados às vantagens da redução da tensão de operação do sistema, devido à eliminação de dispositivos de isolamento, além de considerações quanto aos impactos positivos da avaliação de tal sistema em ciclos urbanos padrão, tais como o FTP 75.

Já com relação à aplicação de células de combustível nos veículos, ressalta-se que grande parte dos trabalhos publicados objetivam comparar as vantagens e desvantagens da aplicação das diversas tecnologias existentes para tais dispositivos, sendo a membrana de permuta de prótons (MPP) e a óxido sólido as mais conhecidas [131]-[135]. Dentre estes, destaca-se o trabalho publicado por Rajashekara por analisar detalhadamente os aspectos relacionados à temperatura, tempo de espera para ativação e uso de reformadores para as células de combustível do tipo MPP e óxido sólido [134].

A partir do ano 2000, a inter-relação entre as tecnologias de células de combustível, veículos de propulsão elétrica e STD em 42V / 14V CC resultou na publicação de alguns trabalhos que exploram, de forma mais detalhada, as vantagens de sua aplicação conjunta [141], [142]. Dentre eles, destaca-se o trabalho que relata o desenvolvimento, por parte da General Motors, do protótipo “Hy-Wire”, um dos primeiros veículos a combinar as tecnologias de células de combustível, “x-by-wire”, tração elétrica e o sistema elétrico em 42V CC, em um conceito que, para os engenheiros que o desenvolveram, reflete o que seria um veículo caso ele fosse concebido nos dias atuais [142].

#### **2.4 Compêndio das Principais Características do STD em 42V / 14V CC**

A tabela abaixo apresenta um compêndio, em ordem cronológica, das características técnicas introduzidas pelos principais trabalhos relacionados com a evolução das configurações do sistema de geração, armazenamento e distribuição de energia em veículos automotores.

**Tab. 2.3 – Principais Fatos Correlatos ao Desenvolvimento de STD em 42V / 14V****CC e Referências Bibliográficas**

Década	Fato Ocorrido	Referência
1900	Desenvolvimento de velas de ignição e dínamos, operando em um sistema elétrico em 6V CC;	[1]
1910	Desenvolvimento de reguladores de tensão eletromecânicos;	[1]-[4]
	1912 - desenvolvimento dos primeiros motores de partida e geradores elétricos CC integrados;	[1]-[4]
	Primeiros veículos equipados com lâmpadas incandescentes;	[1]-[4]
1920	Desmembramento das funções de partida e geração de energia em dois dispositivos independentes;	[1]-[4]
	Primeiros veículos equipados com rádios;	[1]-[4]
	Desenvolvimento de reguladores de tensão de terceira escova;	[1]-[4]
1940	Primeiros veículos equipados com limpadores de pára-brisa elétricos;	[5]-[7]
1950	1955 - transição do sistema elétrico em 6V CC para o sistema elétrico em 14V CC;	[1]-[8]
1960	Desenvolvimento de alternadores tipo Lundell equipados com reguladores de tensão eletrônicos;	[1]-[4]
	Intensificação das análises de IEM nos veículos automotores;	[10]
	Primeiras baterias livre de manutenção;	[1]-[4]
	Primeiros veículos equipados com condicionadores de ar;	[8]
1970	Primeiras análises de elevação da tensão do sistema elétrico veicular com o objetivo de redução de peso;	[9]
1980	Desenvolvimento de sistemas eletrônicos de gerenciamento do MCI;	[1]-[4]
	1984 - edição da norma IEC-479-1 que estabelece os efeitos da circulação de corrente elétrica no corpo humano;	[11]
	Início da proliferação de equipamentos eletro-eletrônicos nos veículos, com a introdução de sistemas como, por exemplo, ABS e "airbag";	[1]-[4], [8], [16]

Década	Fato Ocorrido	Referência
1980	1987 - edição da norma IEC-479-2 que estabelece os aspectos específicos do efeito da circulação de corrente elétrica no corpo humano, tais como os valores limites para a ocorrência de fibrilação ventricular;	[12]
	1989 - primeiras proposições para a aplicação do AMPI;	[16]
1990	Primeiras análises da elevação da tensão do sistema elétrico veicular, motivado pelo crescimento do conteúdo eletro-eletrônico;	[13]-[21]
	Proposta de utilização de STD nos veículos, formado por dois barramentos de tensão independentes;	[13]-[21]
	1991 - primeiras propostas de arquiteturas para sistemas de tensão elevada;	[13]-[21]
	1991 - primeiros estudos relacionados aos impactos da utilização de sistemas de tensão elevada nas lâmpadas, chicotes elétricos, conversores CC-CC, baterias, fusíveis, conectores, interruptores, relés e alternadores, incluindo sua consequência na eficiência e operação destes componentes;	[13]-[21]
	1992 - edição da norma SAE J2232 que estabelece os limites de tensão nominal de operação de barramentos em CC e CA a partir dos quais recomenda-se o uso de dispositivos de isolamento;	[18]
	Início das discussões sobre a necessidade de uma especificação para o barramento de tensão elevada;	[13]-[21]
	1994 - criação do grupo de trabalho "MIT/Industry Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems" com o objetivo de analisar a necessidade de elevação da tensão do sistema elétrico automotivo;	[19]-[21]
	1994 - início da utilização de uma ferramenta de desenvolvimento de sistemas de tensão elevada automotivos, chamada MAESTrO;	[17]
	1995 - o grupo de trabalho liderado pelo MIT define o valor de 42V CC para o eventual sistema elétrico veicular no futuro;	[19]-[21], [23], [24]
	Propostas de arquiteturas em CC para o STD em 42V / 14V;	[23]-[24]
1996 - criação do grupo de trabalho "Forum Bordnetz" com o objetivo de disseminar o trabalho do MIT para a comunidade europeia;	[19], [20], [23], [24]	

Década	Fato Ocorrido	Referência
1990	1996 - primeiras proposições para aplicação de sistemas “start-stop” em veículos equipados com o sistema elétrico em 42V;	[36]
	Definição dos principais equipamentos elétricos que estarão, eventualmente, disponíveis nos veículos a partir de 2010;	[23]-[25]
	Propostas de arquiteturas em CA para sistemas automotivos de tensão elevada, incluindo análises de complexidade dos sistemas eletrônicos e de IEM;	[23], [24], [28], [54], [61], [93]-[95]
	1998 - análise da associação do sistema elétrico em 42V CC com sistemas de comunicação multiplexados com o objetivo de maximizar uma eventual redução de bitola dos cabos elétricos;	[53], [54]
	1998 - primeiros estudos relacionados aos impactos da utilização do sistema elétrico em 42V CC nos semicondutores, incluindo sua consequência na área e no custo destes componentes;	[34], [53], [54], [60]
	1998 - primeiros estudos relacionados à utilização do STD em 42V / 14V CC em veículos híbridos ou elétricos;	[137], [139]
	1999 - o grupo de trabalho “Forum Bordnetz” publica uma versão preliminar da especificação do barramento de tensão em 42 volts CC;	[22]
2000	1999 - introdução de aspectos relacionados à previsão de “jump start” nas discussões sobre as arquiteturas para STD em 42V / 14V CC;	[96], [99]
	Primeiras investigações no sentido de aumentar a potência de saída dos alternadores tipo Lundell em sistemas 14V CC;	[28]-[32], [34]
	2000 - criação do grupo de trabalho “SAE Advisory Committee”, com o objetivo de analisar o sistema elétrico em 42V CC;	[75]
	2000 - estudos relacionados à limitação do efeito “load dump” nos alternadores desenvolvidos para o sistema elétrico em 42V CC;	[22], [33], [37], [38]
	Proliferação de propostas de eletrificação de sistemas mecânicos ou hidráulicos devido ao menor custo dos semicondutores em sistemas elétricos em 42V CC;	[64]
	2000 - análises do impacto da utilização do sistema elétrico em 42V CC nas lâmpadas;	[49]-[51]



Década	Fato Ocorrido	Referência
2000	2000 - primeiros resultados de avaliações de semicondutores 42V quanto aos aspectos de IEM;	[56], [64]-[68]
	2000 - primeira proposta de um conversor CC-CC para interconexão entre os barramentos de tensão em 42V e 14V CC;	[69]
	Propostas de arquiteturas para o STD em 42V / 14V CC, incorporando o conceito de multiplexagem de sinais;	[102]-[104]
	Avaliações de fusíveis 14V em sistemas elétricos em 42V CC indicam a necessidade de desenvolvimento de dispositivos específicos para 42V, utilizando novos materiais ou um sistema de controle eletrônico;	[56], [57], [64], [78]-[81]
	Avaliações em relés, interruptores e conectores 14V em sistemas 42V indicam a necessidade de desenvolvimento de novos dispositivos específicos para 42V, utilizando novas tecnologias;	[83]-[89]
	Propostas de utilização de novas tecnologias de condutores em substituição aos chicotes elétricos atuais;	[57]-[59]
	2001 - primeiros resultados de avaliações de alternadores 42V quanto aos aspectos de IEM;	[47]
	2001 - primeiros estudos relacionados aos impactos da utilização do sistema elétrico em 42V CC nos motores elétricos pequenos;	[47], [48], [50], [51]
	2001 - proposta de utilização de ímãs em relés, interruptores e conectores para reduzir os efeitos dos arcos voltaicos;	[89]
	Disponibilização de novas ferramentas de desenvolvimento do STD em 42V / 14V CC que fazem uso de simuladores como SIMULINK;	[105]-[106]
	Primeiros resultados de avaliações de veículos com o STD em 42V / 14V CC, incluindo as funções "start-stop" e freio regenerativo, quanto a consumo de combustível;	[107]-[117]
	Lançamento do Toyota Crown Royal Sallon, o primeiro veículo de série do mundo equipado com o STD em 42V / 14V CC;	[113]-[115]
	Propostas de utilização do AMPI, de modo auxiliar, para a propulsão de um veículo;	[39]
	Avaliações relacionadas ao tipo de máquina elétrica que melhor se adapta para a função do AMPI;	[39]-[43]

Década	Fato Ocorrido	Referência
2000	Propostas de utilização da modulação do barramento de tensão em 42V CC em PWM para alimentação de equipamentos elétricos 14V, incluindo análises das IEM geradas por este tipo de modulação;	[47], [49]-[51]
	Novos testes em fusíveis aplicáveis a sistemas elétricos em 42V CC indicam a complexidade em evitar falhas entre os barramentos de tensão;	[55], [57], [81]
	Desenvolvimento de semicondutores específicos para o sistema elétrico automotivo em 42V CC;	[56], [64]-[68]
	Primeiras propostas de utilização de sistemas de gerenciamento de cargas para evitar descarga das baterias do sistema;	[39], [62], [77], [90]-[92]
	2002 - primeiros resultados de avaliações do sistema de iluminação quanto aos aspectos de IEM;	[51]
	2002 - primeiras avaliações do sistema elétrico em 42V CC com baterias de polímero de lítio e níquel metal hidreto;	[74]
	Proposta de utilização de contatos múltiplos, de maior área e distância, além de novos materiais para evitar arcos voltaicos em relés;	[83]-[87]
	Novas propostas de arquiteturas para STD em 42V / 14V CC;	[63], [64], [81], [97]-[100]
	2002 - novas propostas para melhoria de eficiência do AMPI, considerando a utilização de fios de secção transversal retangular e avançados sistemas de refrigeração para sua eletrônica de controle;	[109], [110]
	2002 - primeiros resultados de avaliações do STD em 42V / 14V CC quanto aos aspectos de IEM;	[117]
	2002 - GM revela o protótipo Hy-Wire, o primeiro veículo a incorporar as tecnologias célula de combustível, "x-by-wire", tração elétrica e sistemas elétricos em 42V CC;	[141]-[142]
	Ausência de especificação para os componentes do STD em 42V / 14V CC, aliada ao elevado custo de construção de protótipos e a crise norte-americana, leva ao atraso na implementação deste sistema;	[123]-[127]

Década	Fato Ocorrido	Referência
2000	Apesar do sistema elétrico em 14V CC ainda ser amplamente utilizado e melhorado, as montadoras e fornecedores mantêm projetos de STD em 42V / 14V CC em desenvolvimento para iniciarem produção, em veículos de baixo volume, assim que necessário;	[119]-[122]
	Definição do tipo construtivo dos terminais das baterias para o sistema elétrico em 42V CC;	[75]
	2003 - proposta de utilização de ultracapacitores, em conjunto com o sistema de freios regenerativos, para maximizar a absorção da energia elétrica gerada;	[116]
	2003 - novas tecnologias para alternadores Lundell 14V que permitem a obtenção de uma potência de saída maior que 3,0kW;	[35]
	2003 - proposta de conversor CC-CC sem componentes magnéticos;	[71]

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Considerações Gerais**

Este item descreve a metodologia utilizada neste trabalho, visando avaliar as diversas arquiteturas propostas, atualmente, para o sistema elétrico automotivo, entre estas os sistemas elétricos com barramento de distribuição de tensão elevada.

Primeiramente, serão abordados os aspectos relacionados aos critérios que conduziram a seleção de índices de mérito, utilizados para a avaliação das principais arquiteturas elétricas consideradas na literatura. Em seguida, os índices de mérito selecionados serão definidos, de forma a possibilitar a identificação de sua aplicabilidade. Finalmente, segue-se uma descrição do método a ser empregado na avaliação das alternativas de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo, no qual os índices de mérito serão os fatores a serem considerados para a obtenção dos resultados.

#### **3.2 Critérios e Definições dos Índices de Mérito**

##### **3.2.1 Introdução**

Observa-se que, um dos principais aspectos considerados na definição dos índices de mérito foi a evolução histórica da tecnologia dos sistemas elétricos automotivos. Desta forma, ressalta-se que os índices de mérito selecionados podem representar tanto variáveis técnicas quantitativas quanto qualitativas. Assim, faz-se necessária a utilização de métodos que contemplem estas características.

Dentre os métodos existentes na literatura, destaca-se o método do consenso ou método da agregação aditiva. Este método tem como característica básica a aplicação de índices de mérito qualitativos na análise das diversas alternativas em estudo [143]-[148].

Propõem-se, portanto, analisar as diversas arquiteturas elétricas consideradas na literatura, através deste método.

Os critérios gerais utilizados na definição dos índices de mérito, bem como uma breve descrição do método da agregação aditiva, serão apresentados nos próximos itens deste capítulo.

### 3.2.2 Critérios Gerais

Os critérios utilizados para a proposição dos índices de mérito encontram-se mencionados anteriormente, além de poderem ser encontrados, de forma abrangente, na literatura existente. Desta forma, os índices de mérito incluirão os principais fatores atualmente exigidos pelos consumidores, além dos principais aspectos técnicos e econômicos.

Em adição aos critérios explicitamente mencionados na literatura, serão considerados outros, fundamentados na experiência profissional de membros da indústria automotiva. Estes critérios terão como objetivo incluir, na avaliação, os índices de mérito relacionados aos requisitos da indústria como, por exemplo, a capacidade de inovação, a necessidade de reagir rapidamente a mudanças e a possibilidade de utilizar novos equipamentos elétricos nos veículos.

A definição dos índices de mérito baseou-se, também, na conformidade com algumas propriedades primordiais aos mesmos, tais como [143], [148]:

1. *Essencial*: O índice de mérito deve levar em conta os aspectos que sejam de fundamental importância para a avaliação;
2. *Controlável*: O índice de mérito deve representar um aspecto que seja influenciado, apenas, pelas alternativas em questão;

3. *Mensurável*: O índice de mérito permite especificar, com a menor ambigüidade possível, o desempenho das alternativas, segundo os aspectos considerados fundamentais para a avaliação;
4. *Operacional*: O índice de mérito possibilita coletar as informações requeridas sobre o desempenho das alternativas, dentro do tempo disponível e com um esforço viável;
5. *Não-redundante*: O conjunto do índice de mérito não deve levar em conta o mesmo aspecto mais de uma vez;
6. *Conciso*: O número de aspectos considerados pelo conjunto de índice de mérito deve ser o mínimo necessário para modelar de forma adequada a avaliação proposta;
7. *Compreensível*: O índice de mérito deve ter seu significado claro.

### **3.2.3 Definições dos Índices de Mérito**

A Tab. 3.1 mostra, de forma sintetizada, os índices de mérito propostos, agrupados de acordo com a área de interesse da indústria automotiva.

Tab. 3.1 – Proposição dos Índices de Mérito

Área de Interesse	Índice de Mérito
Mercado	Custo agregado
	Consumo de combustível
	“Payback” ou retorno do investimento
Aspectos Estratégicos de Mercado	Expansibilidade
	Prazo para a expansão
	Custo associado à expansão
	Oportunismo
	Modismo
Qualidade	Confiabilidade
Serviços Pós-Vendas	Complexidade
	Detecção de falhas
	Intercambiabilidade
	Mão-de-obra especializada
	Tecnologia atual
Investimentos	Inovação tecnológica
	Aceitação do mercado
Cultura / Costume	Interface humana
	Peso
Engenharia de Projetos e Desenvolvimento	Complexidade da arquitetura
	Adequação à evolução tecnológica
	Requisitos de CEM
	Redução na emissão de poluentes
Regulamentação	

Área de Interesse	Índice de Mérito
Manufatura / Logística	Estoque
	Reposição
	Novos equipamentos
	Tempo padrão
	Recursos
Segurança Humana	Choques elétricos
	Aspectos de IEM

Uma vez introduzidos os índices de mérito propostos, segue uma breve descrição de cada índice, com o objetivo de defini-lo com relação aos aspectos que permitirão sua diferenciação para a avaliação das arquiteturas elétricas:

- 1) Custo agregado: Refere-se ao custo adicional total decorrente da eventual adoção da arquitetura elétrica em avaliação, considerando-se todos os requisitos para seu correto funcionamento. Este índice de mérito permitirá diferenciar as diversas arquiteturas em avaliação perante o requisito de acréscimo de custo decorrente dos equipamentos elétricos adicionais, sendo melhor avaliada a arquitetura que apresentar o menor acréscimo de custo.
- 2) Consumo de combustível: Refere-se à influência que a arquitetura elétrica em avaliação exerce no consumo de combustível de um veículo, levando-se em consideração suas potenciais funcionalidades como, por exemplo, o sistema “start-stop”. Este índice de mérito tem como objetivo diferenciar as diversas arquiteturas elétricas face ao consumo de combustível resultante de sua eventual adoção, buscando-se uma relação vantajosa ao mercado.



3) “Payback” ou retorno do investimento: Refere-se ao período de tempo de uso de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação, que é necessário para que o retorno financeiro obtido com a redução no consumo de combustível, seja equivalente ao custo adicional pago pelo mesmo. Ressalta-se que outros eventuais ganhos associados ao menor desgaste de correias, filtros ou até mesmo trocas de óleo, não foram considerados por serem insignificantes perante a redução no consumo de combustível. Este índice de mérito baseia-se na relação dos efeitos dos dois índices propostos anteriormente, buscando ressaltar a arquitetura elétrica que apresenta a melhor solução de compromisso entre o custo adicional e a redução no consumo de combustível.

4) Expansibilidade: Refere-se à capacidade de expandir o sistema elétrico de um veículo no sentido de introduzir novos equipamentos elétricos, mantendo-se inalterada a tecnologia de geração de energia proposta na arquitetura em avaliação. Este índice de mérito permitirá diferenciar as arquiteturas elétricas que estiverem mais bem preparadas para se adaptar ao aumento de demanda, exigido pela eventual introdução de novos dispositivos elétricos nos veículos.

5) Prazo para a expansão: Refere-se ao período de tempo requerido para que o projeto do sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura em avaliação, seja modificado para receber determinado equipamento elétrico. Este índice de mérito tem como objetivo ressaltar a flexibilidade das diversas arquiteturas elétricas com relação à eventual introdução de novos dispositivos elétricos, sendo desejável a obtenção de prazos reduzidos.

6) Custo associado à expansão: Refere-se ao custo necessário para que o sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura em avaliação, seja adaptado para receber determinado equipamento elétrico. Este índice de mérito permitirá,

em conjunto com os dois anteriores, avaliar a viabilidade técnica e financeira das diversas arquiteturas elétricas, sob o ponto de vista da instalação de novos dispositivos elétricos. Ressalta-se que, para este índice de mérito, serão melhor avaliadas as arquiteturas que apresentam valores reduzidos para o parâmetro avaliado.

7) Oportunismo: Refere-se à habilidade de antever ocasiões oportunas para que o sistema elétrico de um veículo utilize a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito relaciona-se com o estágio atual de desenvolvimento tecnológico dos fornecedores da indústria automobilística. As montadoras poderão, desta forma, avaliar dentre as diversas arquiteturas elétricas aquela que melhor satisfaz suas necessidades, adotando, oportunamente, as tecnologias já desenvolvidas pelos seus fornecedores.

8) Modismo: Refere-se à eventual adoção da arquitetura elétrica em avaliação utilizando critérios focados no acompanhamento das decisões do mercado como, por exemplo, dos concorrentes. Este índice de mérito permitirá identificar a arquitetura mais utilizada para o sistema elétrico automotivo, considerando o desafio proporcionado pela grande proliferação de novos equipamentos elétricos nos veículos.

9) Confiabilidade: Refere-se à capacidade do sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação, executar a função para a qual foi projetado, quando solicitado, por um período de tempo pré-determinado, sob condições ambientais específicas [149]. Este índice de mérito permitirá diferenciar as diversas arquiteturas elétricas em avaliação perante sua probabilidade de falha, sendo melhor avaliadas aquelas que apresentarem valores reduzidos para este parâmetro.

10) Complexidade: Refere-se ao nível de dificuldade existente no processo de realização de reparos no sistema elétrico de um veículo equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito tem como objetivo ressaltar o impacto que a complexidade das diversas arquiteturas elétricas em avaliação exerce sobre as atividades de reparos nas concessionárias. Para este índice buscam-se as arquiteturas que possuam a menor complexidade possível, do ponto de vista da necessidade de reparos.

11) Detecção de falhas: Refere-se à necessidade de utilização de novos equipamentos dedicados para a análise de falhas no sistema elétrico de um veículo equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito procura destacar, dentre as diversas arquiteturas elétricas, aquelas que requerem a menor quantidade de dispositivos específicos, utilizados para o diagnóstico de falhas no sistema elétrico de um veículo.

12) Intercambiabilidade: Refere-se à possibilidade de utilização de equipamentos elétricos já desenvolvidos para os veículos atuais, no sistema elétrico de um veículo equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito tem como objetivo diferenciar as arquiteturas elétricas que consideram a possibilidade de utilização de toda a rede de auxílio instalada, além dos equipamentos elétricos comercializados como acessórios, em conjunto com sistemas que, eventualmente, utilizam um barramento de tensão elevada.

13) Mão-de-obra especializada: Refere-se à necessidade de utilização de mão-de-obra especializada para a execução de reparos no sistema elétrico de um veículo equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. A utilização de mão-de-obra especializada exerce influência direta no custo do serviço para o cliente final. Este índice de mérito permitirá diferenciar as arquiteturas elétricas que

apresentam menor custo para a execução de reparos e, portanto, não requerem, ou requerem pouco uso de mão-de-obra especializada.

14) Tecnologia atual: Refere-se à utilização de tecnologia considerada desenvolvida para o sistema elétrico de um veículo equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito permitirá diferenciar, dentre as diversas arquiteturas elétricas em avaliação, aquelas que fazem uso de tecnologias já desenvolvidas, e de uso comum, até mesmo na indústria automobilística, para a definição da arquitetura elétrica de um veículo. Para este índice, busca-se a utilização de tecnologias já desenvolvidas, como um meio de reduzir o prazo necessário para a implementação da arquitetura elétrica em avaliação.

15) Inovação tecnológica: Refere-se à constante necessidade da indústria automobilística em renovar-se, buscando introduzir novas funcionalidades em seus produtos. Este índice de mérito tem como objetivo identificar a arquitetura elétrica que permite a introdução de novas funções em um veículo qualquer, independentemente do estágio de desenvolvimento da tecnologia necessária para sua aplicação. Para este índice de mérito é desejável a introdução do maior número possível de funções ou recursos tecnológicos, considerando a arquitetura elétrica em avaliação.

16) Aceitação do mercado: Refere-se à reação do mercado durante o processo de adaptação ao sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. A reação do mercado pode ser positiva ou negativa, dependendo da quantidade de funções ou recursos tecnológicos disponíveis na arquitetura elétrica, além de aspectos relacionados à própria cultura ou costume do mercado onde se está avaliando o produto. Este índice de mérito procura diferenciar a

arquitetura elétrica que tem maior chance de ser aceita em qualquer mercado consumidor, levando-se em consideração a incorporação de todas as suas funções tecnológicas inovadoras.

17) Interface humana: Refere-se à consideração, durante fase de projeto, dos principais aspectos relacionados ao conceito de interface homem-máquina, exigidos para a execução das novas funções implementadas no sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito tem como objetivo diferenciar a arquitetura elétrica que requer o menor esforço do cliente para o acionamento ou verificação do estado de determinada função.

18) Peso: Refere-se ao peso adicional total relacionado aos equipamentos elétricos necessários para o correto funcionamento do sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura em avaliação. O peso do veículo, bem como o seu sistema elétrico, têm sido sistematicamente examinados pelas principais montadoras, com o objetivo de melhorar o consumo de combustível. Desta forma, este índice de mérito permitirá diferenciar as arquiteturas elétricas mediante a necessidade de adição de peso ao veículo, sendo melhor avaliadas aquelas que apresentarem valores reduzidos para este parâmetro.

19) Complexidade da arquitetura: Refere-se ao nível de dificuldade relacionado ao projeto e desenvolvimento do sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito permitirá avaliar a quantidade de recursos necessários para o projeto das diversas arquiteturas elétricas selecionadas, tendo como objetivo destacar aquelas que requerem a menor quantidade de recursos e, conseqüentemente, a menor complexidade, para serem desenvolvidas.

20) Adequação à evolução tecnológica: Refere-se à afinidade apresentada pelo sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação, com outras tecnologias emergentes, que se encontram atualmente em desenvolvimento pelas principais montadoras do setor automotivo. Este índice de mérito tem como objetivo destacar as arquiteturas elétricas que podem se adequar, com relação à evolução tecnológica, permitindo a incorporação de novas tecnologias como, por exemplo, veículos elétricos ou células de combustível. Para este índice, buscam-se as arquiteturas que possuem a maior correlação com as tecnologias em desenvolvimento nos dias atuais.

21) Requisitos de CEM: Refere-se ao estudo do sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação, quanto ao atendimento de critérios de projeto relacionados a CEM como, por exemplo, níveis de imunidade e de emissão conduzidas e radiadas. Este índice de mérito procura destacar, dentre as diversas arquiteturas elétricas em avaliação, aquelas que apresentam as melhores soluções para os requisitos de CEM, tendo em vista minimizar os efeitos da IEM durante o uso do veículo.

22) Redução na emissão de poluentes: Refere-se à possibilidade de reduzir a emissão de poluentes de um veículo através da utilização de um sistema elétrico formado pela arquitetura elétrica em avaliação. A emissão de poluentes pode ser reduzida através da introdução de novos equipamentos elétricos e funções ao veículo que, atualmente, não são considerados devido ao seu elevado consumo de energia elétrica. Para este índice de mérito buscam-se as arquiteturas elétricas que permitam uma maior redução nas emissões de poluentes, através da implementação de novos equipamentos elétricos ou funções ao veículo.

23) Estoque: Refere-se aos aspectos relacionados ao acréscimo de complexidade logística para o controle do estoque, manuseio e alocação na linha de produção dos novos componentes requeridos para o sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito procura destacar, dentre as diversas arquiteturas elétricas em avaliação, aquelas que adicionam a menor complexidade logística, através da necessidade de um menor número de componentes novos.

24) Reposição: Refere-se ao processo logístico de reposição de peças para a realização de serviços em concessionárias. Este índice de mérito leva em consideração o prazo e a complexidade para a obtenção de peças de reposição em concessionárias, com destaque para a quantidade de componentes exclusivos do sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. Para este índice, buscam-se as arquiteturas que requerem o menor número de componentes exclusivos, beneficiando a rapidez com que o cliente é atendido nas concessionárias.

25) Novos equipamentos: Refere-se à necessidade de utilização de novos equipamentos dedicados para a manufatura de veículos, cujo sistema elétrico é disposto conforme a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito permitirá diferenciar, dentre as diversas arquiteturas elétricas em avaliação, aquelas que requerem a utilização da menor quantidade de dispositivos para orientar o processo produtivo de um veículo.

26) Tempo padrão: Refere-se ao período de tempo requerido para a fabricação completa de um veículo, englobando desde o processo de funilaria, até os ajustes finais como, por exemplo, os testes dinâmicos. O tempo padrão é uma variável importante para a indústria automobilística, pois fornece condições de obter,

através do custo da mão-de-obra utilizada, uma parte do custo relacionado com o processo produtivo de um veículo. Este índice de mérito tem como objetivo distinguir a arquitetura elétrica que causa o menor impacto no tempo padrão requerido para a fabricação de um veículo. Desta forma, serão melhor avaliadas as arquiteturas elétricas que exijam valores reduzidos para este parâmetro.

27) Recursos: Refere-se aos recursos adicionais requeridos para a fabricação de um veículo, cujo sistema elétrico é representado pela arquitetura elétrica em avaliação. Em adição ao índice de mérito anterior, que considera o acréscimo de custo relacionado ao tempo de fabricação de um veículo, este índice de mérito propõe a consideração dos demais fatores que englobam os recursos utilizados na indústria automobilística, tais como aumento de mão-de-obra direta e novas unidades produtivas. Para este índice, da mesma forma, serão melhor avaliadas as arquiteturas que requerem a menor quantidade de recursos adicionais.

28) Choques elétricos: Refere-se aos aspectos relacionados com a segurança humana contra a ocorrência de choques elétricos, causados pelo contato físico com o sistema elétrico de um veículo equipado com a arquitetura elétrica em avaliação. De acordo com a literatura disponível, considera-se necessária a aplicação de dispositivos de isolamento contra choques elétricos em sistemas elétricos que possuam tensões acima do limite de 50 volts rms ou 65 volts, para sistemas CA e CC, respectivamente [11]-[14]. Este índice de mérito tem como objetivo diferenciar, dentre as diversas arquiteturas elétricas em avaliação, aquelas que apresentam o menor risco para a segurança humana relacionados a choques elétricos. Convém ressaltar que, os sistemas elétricos que fazem uso de tensões elevadas, apesar de eventualmente utilizarem eficientes sistemas de isolamento elétrica, são intrinsecamente considerados menos seguros, do ponto de



vista de choques elétricos, do que os sistemas elétricos que utilizam tensões abaixo dos limites anteriormente mencionados.

29) Aspectos de IEM: Muito embora os aspectos relacionados a CEM já tenham sido abordados anteriormente, este índice de mérito refere-se àqueles relacionados a IEM, seja ela irradiada ou conduzida, que podem, eventualmente, causar a inoperância de sistemas de segurança de um veículo, cujo sistema elétrico é disposto conforme a arquitetura elétrica em avaliação. Este índice de mérito procura destacar as arquiteturas elétricas que apresentem soluções consistentes para evitar a ocorrência de IEM, principalmente aquelas que podem resultar em falhas nos sistemas de segurança dos veículos.

Como ferramenta de avaliação, propõe-se a utilização do método de agregação aditiva ou “trade-off method”, que permitirá simular a aplicação dos índices de mérito apresentados, bem como realizar um estudo que indique a tendência de arquitetura elétrica a ser eventualmente adotada para o sistema elétrico automotivo. Assim, algumas das arquiteturas elétricas mais freqüentemente mencionadas na literatura, serão apresentadas no próximo capítulo, com o objetivo de serem avaliadas conforme este método.

Ressalta-se, ainda, que, o método de análise proposto não pode ser considerado a palavra final sobre o tema em estudo. O método proposto tem como objetivo apresentar uma ferramenta que propicie uma abordagem sistemática sobre as diversas propostas para o sistema elétrico automotivo, com base nos principais aspectos considerados na literatura, englobando-os em uma análise consistente e orientativa.

No próximo item será abordada uma breve descrição do método de agregação aditiva.

### **3.3 Aspectos Teóricos**

#### **3.3.1 Introdução**

As metodologias de apoio à decisão que empregam diversos índices de mérito como critérios, principalmente quando aplicadas para a análise de problemas de grande complexidade, exigem uma profunda reflexão, por parte dos decisores, levando-os a adotarem uma das abordagens disponíveis para a aplicação de tais métodos [143].

Considerando-se que não existem soluções definitivas sobre o tema deste trabalho e que, naturalmente, diferentes indivíduos possuem diferentes estruturas de valor para cada índice de mérito, podendo afetar o resultado da decisão a ser tomada, a metodologia adotada deve ser flexível o suficiente para considerar tais aspectos, permitindo uma avaliação dinâmica das alternativas [143], [147], [148].

A abordagem adotada neste capítulo estabelecerá, a seguir, a definição de uma função de valor para cada índice de mérito, que permitirá traduzir, em termos numéricos, a atratividade de cada índice. Tal abordagem, conhecida como critério único de síntese, sugere, ainda, a utilização das funções de valor na avaliação das alternativas, representadas pelas diversas arquiteturas para o sistema elétrico automotivo.

Assim, o método de agregação aditiva, que segue a abordagem de critério único de síntese, foi selecionado e será apresentado nos próximos itens deste capítulo.

#### **3.3.2 Método de Agregação Aditiva**

O método de agregação aditiva, diferente das demais metodologias de apoio à decisão existentes como, por exemplo, o “lexicographic method” ou o “ELECTRE method”, que sugerem um processo de eliminação seqüencial das alternativas perante seu

desempenho nos índices de mérito mais importantes, permite uma avaliação de todas elas, simultaneamente, através da somatória do valor que cada índice de mérito representa em cada alternativa [148].

O desempenho global de uma alternativa, portanto, é calculado através da somatória do desempenho representado por cada índice de mérito, ou seja, através de uma fórmula de agregação aditiva, dada por:

$$V(a) = w_1 \cdot v_1(a) + w_2 \cdot v_2(a) + w_3 \cdot v_3(a) + \dots + w_n \cdot v_n(a) \quad (3.1)$$

ou, de forma genérica:

$$V(a) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i(a) \quad (3.2)$$

- onde:
- $V(a)$  : Desempenho global da alternativa  $a$ .
  - $v_1(a), v_2(a), \dots, v_n(a)$  : Desempenho local da alternativa  $a$  nos índices de mérito 1, 2, ...,  $n$ .
  - $w_1, w_2, \dots, w_n$  : Taxa de substituição dos índices de mérito 1, 2, ...,  $n$ .
  - $n$  : Número de índices de mérito do modelo.

A equação 3.2 fornece a soma ponderada dos desempenhos locais obtidos por uma determinada alternativa nos diversos índices de mérito, sendo que a ponderação é feita pelas taxas de substituição de cada índice de mérito, a serem definidas nos próximos itens deste capítulo.

A fórmula de agregação pretende transformar uma atratividade local (medida nos índices de mérito) em uma atratividade global, somando o desempenho de uma alternativa, nos diversos índices de mérito, em um desempenho único [148]. A fórmula de agregação aditiva é requerida principalmente em modelos multicritério, onde se avaliam diversas alternativas perante vários índices de mérito, pois raramente ocorre de

uma alternativa ser melhor que as demais em todos os critérios ou índices de mérito do modelo. Desta forma, as alternativas podem ser diretamente comparadas mediante a classificação de seus desempenhos globais.

Nos próximos itens serão apresentados os meios de obtenção dos desempenhos locais de cada alternativa (função de valor), bem como suas correspondentes taxas de substituição.

### **3.3.2.1 Função de Valor**

Uma função de valor pode ser definida como uma ferramenta utilizada para auxiliar a articulação de preferências, de forma numérica, permitindo avaliar alternativas segundo um determinado ponto de vista [143].

A definição de uma função de valor inicia-se após o estabelecimento de um critério, através do qual se torne possível mensurar o desempenho, ou nível de impacto, de cada alternativa em cada índice de mérito. Tal critério, responsável por diferenciar desempenhos simplesmente aceitáveis daqueles considerados bons, será chamado de descritor [148]. Destaca-se que os descritores podem ser quantitativos ou qualitativos, podendo assumir resultados como, por exemplo, um desempenho bom, em uma avaliação satisfatória, ou neutro, em uma avaliação não satisfatória, mas ainda aceitável. Dentre os diversos métodos de obtenção das funções de valor existentes na literatura, o método da pontuação direta foi adotado neste trabalho devido a sua simplicidade, rapidez e ausência de transformações matemáticas que possam afetar os resultados a serem obtidos [148]. Basicamente, este método propõe a associação dos valores zero e um para os níveis de impacto neutro e bom de cada índice de mérito, respectivamente. Em seguida, a atratividade dos demais níveis de impacto são mensuradas de forma

relativa aos previamente definidos. Destaca-se, assim, a possibilidade de existência de funções de valor que apresentem valores inferiores a zero ou superiores a um, uma vez que determinado índice de mérito pode apresentar níveis de impacto cuja atratividade é considerada ruim ou excelente, respectivamente [148].

De modo a ilustrar os conceitos até aqui apresentados, tome-se o exemplo de aplicação proposto por Shimizu, onde determinada empresa analisa três alternativas para a compra de um imóvel, com base em três objetivos distintos: Ganho líquido; Vantagem competitiva, dada pela distância do imóvel ao centro comercial, e Área total disponível [147]. A Tab. 3.1 mostra, de forma resumida, os dados disponíveis para a análise, obtidos através de pesquisa de campo para o índice de mérito ganho líquido, e medições para os demais índices de mérito.

**Tab. 3.2 – Exemplo de Aplicação da Metodologia para uma Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Ganho líquido	\$ 470 mil	\$ 500 mil	\$ 420 mil
Vantagem competitiva	150 m	250 m	500 m
Área disponível	600 m <sup>2</sup>	400 m <sup>2</sup>	1500 m <sup>2</sup>

Fonte:[147]

O critério de mensuração do desempenho das alternativas perante um dos índices de mérito, por exemplo, o ganho líquido, pode ser definido através do estabelecimento dos valores zero, para a alternativa menos atrativa, e um, para a alternativa mais atrativa. Assim, ao se adotar esta definição para todos os índices de mérito contidos na Tab. 3.2, obtém-se a Tab. 3.3.

**Tab. 3.3 – Função de Valor das Alternativas para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Alternativa 1 ( $v_i$ )	Alternativa 2 ( $v_i$ )	Alternativa 3 ( $v_i$ )
Ganho líquido	a ser determinado	1	0
Vantagem competitiva	1	a ser determinado	0
Área disponível	a ser determinado	0	1

Fonte:[147]

A determinação de uma função de valor para cada índice de mérito permitirá a obtenção dos desempenhos intermediários de cada alternativa. Caso decida-se por uma relação estritamente linear, por exemplo, a alternativa 1 receberia um desempenho de 0,7 no índice de mérito ganho líquido, e de 0,3 no índice de mérito área disponível. Da mesma forma, a alternativa 2 receberia um desempenho de 0,6 no índice de mérito vantagem competitiva.

Nota-se, que o processo de construção das funções de valor apresenta certo grau de imprecisão. Isto ocorre devido à dificuldade em expressar, numericamente, as preferências entre os descritores. Por outro lado, ressalta-se que tais imprecisões não têm relação com o método de obtenção de uma função de valor, mas, sim, com a própria natureza humana, que naturalmente não utiliza escalas numéricas para fazer julgamentos [148].

### 3.3.2.2 Taxa de Substituição

Tendo definido os descritores para cada índice de mérito, torna-se possível avaliar localmente o desempenho de cada alternativa. Destaca-se, no entanto, que para se obter

o desempenho global de cada alternativa, de acordo com a função de agregação aditiva (equação 3.2), é necessário definir um conjunto de parâmetros associados aos índices de mérito: suas taxas de substituição.

As taxas de substituição, também conhecidas na literatura existente como “trade-offs” ou pesos, expressam a perda de desempenho que uma alternativa deve sofrer em um índice de mérito para compensar o ganho de desempenho em outro índice de mérito [147]. Assim, de outra forma, as taxas de substituição podem ser definidas como parâmetros que agregam, de forma compensatória, desempenhos locais, em um desempenho global.

As taxas de substituição são necessárias, pois, ao se analisar as alternativas de um modelo multicritério, raramente ocorre de uma delas ser melhor que as demais em todos os critérios. De modo geral, uma alternativa que apresente grande benefício possui um elevado custo relacionado à sua implementação [148].

Dentre os diversos métodos para determinação das taxas de substituição disponíveis na literatura, o método “swing weights” foi selecionado devido à simplicidade e rapidez do procedimento [148]. Basicamente, o método “swing weights” inicia-se a partir de uma alternativa fictícia, que apresente desempenho neutro em todos os índices de mérito do modelo. Escolhe-se, então, um dos índices de mérito onde o desempenho da alternativa fictícia é promovido para um nível de impacto superior, no valor de cem pontos. Nos índices de mérito remanescentes, o mesmo procedimento é feito, em ordem de preferência decrescente, onde as magnitudes de todas as promoções são medidas em relação à primeira promoção. Estes valores devem, então, ser normalizados de modo a sua somatória ser igual a um, fornecendo, assim, as taxas de substituição.

De volta ao exemplo de aplicação proposto por Shimizu, os analistas da empresa em questão devem, então, selecionar um dos índices de mérito para representar o objetivo

mais importante a ser considerado na compra do imóvel [147]. Este índice de mérito será pontuado com uma taxa de substituição relativa no valor de cem pontos.

Assumindo-se que o índice de mérito ganho líquido tenha sido escolhido como o objetivo mais importante, a pontuação dos demais índices de mérito deverá ser realizada em termos percentuais decrescentes. Assim, de modo ilustrativo, decidiu-se que a taxa de substituição relativa para o índice de mérito área disponível receberia o valor de oitenta pontos, ou seja, o índice de mérito área disponível representaria 80% da atratividade do índice de mérito ganho líquido. Da mesma forma, decidiu-se que a taxa de substituição para o índice de mérito distância ao centro receberia o valor de cinquenta pontos. A Tab. 3.4 mostra, de forma resumida, os valores das taxas de substituição relativas.

**Tab. 3.4 – Taxas de Substituição Relativas para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição Relativa
Ganho líquido	100
Vantagem competitiva	50
Área disponível	80
Total	230

Fonte:[147]

Normalizando-se as taxas de substituição relativas mostradas na Tab. 3.4, obtidas através do método “swing weighs”, obtém-se as taxas de substituição para cada índice de mérito, como mostra a Tab. 3.5.



Nota-se, novamente, que o processo de determinação das taxas de substituição apresenta certo grau de imprecisão. Isto ocorre devido ao grande nível de abstração necessário, além da artificialidade, para o ser humano, da noção de uma compensação mensurável entre os índices de mérito [148].

**Tab. 3.5 – Taxas de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição	
	Relativa	Normalizada ( $w_i$ )
Ganho líquido	100	0,43
Vantagem competitiva	50	0,22
Área disponível	80	0,35
Total	230	1,00

Fonte:[147]

Uma descrição detalhada do método “swing weights” pode ser encontrada em [148].

### 3.3.3 Avaliação das Alternativas

Para avaliar as alternativas segundo o modelo construído, é preciso determinar o desempenho de cada alternativa em cada um dos índices de mérito, de acordo com seu descritor. Uma vez obtidos os desempenhos locais de todas as alternativas, aplica-se a equação 3.2 para, enfim, obter seus respectivos desempenhos globais, admitindo-se que as taxas de substituição já estejam disponíveis. A alternativa que apresentar o maior desempenho global pode ser considerada a alternativa mais atrativa.

Ressalta-se, ainda, a existência de um método gráfico de avaliação do desempenho das alternativas, realizado através de seus desempenhos locais, que podem ser diretamente

comparados, de modo a permitir uma análise de seus pontos fortes e fracos. Este gráfico é conhecido na literatura como “*perfil de impacto*” e é construído relacionando-se nas abscissas os índices de mérito e nas ordenadas, o desempenho das alternativas multiplicado pela sua respectiva taxa de substituição [148].

No exemplo de aplicação proposto por Shimizu, pode-se utilizar diretamente a fórmula de agregação aditiva para a obtenção dos resultados mostrados na Tab. 3.6 [147].

**Tab. 3.6 – Desempenhos Globais para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição ( $w_i$ )	Alternativa 1 ( $v_i$ )	Alternativa 2 ( $v_i$ )	Alternativa 3 ( $v_i$ )
Ganho líquido	0,43	0,70	1,00	0
Vantagem competitiva	0,22	1,00	0,60	0
Área disponível	0,35	0,30	0	1,00
V(a)		0,626	0,562	0,350

Fonte:[147]

De acordo com os dados da Tab. 3.6, o modelo construído para orientar a decisão de compra de um imóvel indica que a alternativa 1 representa a escolha mais atrativa.

Já através do método gráfico, pode-se traçar o “*perfil de impacto*” para cada alternativa, onde os pontos fortes e fracos destas podem ser diretamente comparados e, caso necessário, aperfeiçoados. A Fig. 3.1 ilustra o “*perfil de impacto*” para o exemplo de decisão de compra de um imóvel.

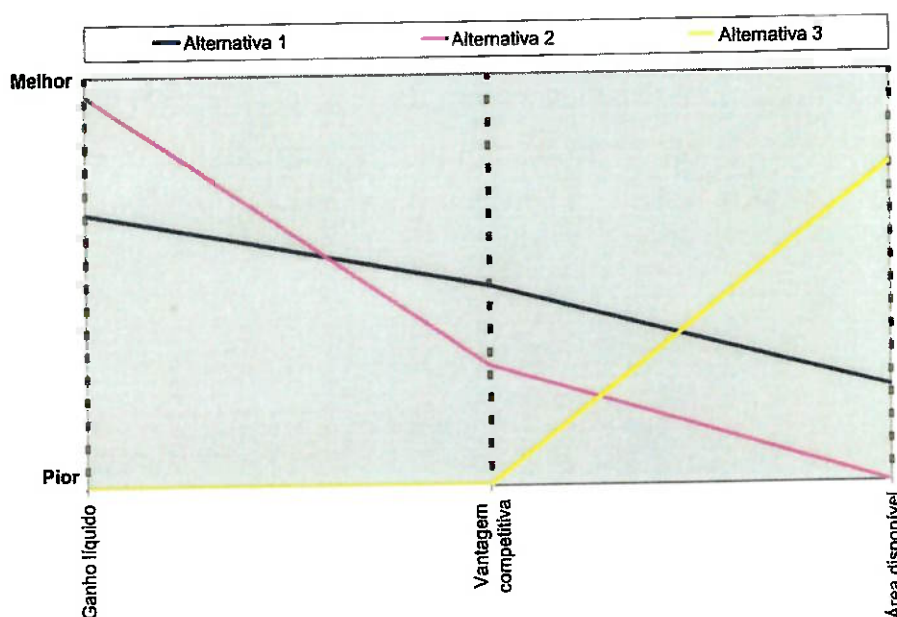


Fig. 3.1 – “Perfil de impacto” para a decisão de compra de um imóvel

O “*perfil de impacto*” representa uma análise preliminar interessante, pois pode identificar uma alternativa dominante, ou seja, uma alternativa melhor do que as demais em um índice de mérito e que, ao mesmo tempo, não é pior do que as outras nos demais índices de mérito. Além disso, o “*perfil de impacto*” possibilita, também, a oportunidade de aperfeiçoar as alternativas identificadas através de uma análise de seus pontos fortes e fracos.

Uma alternativa dominante também pode ser identificada através de uma análise de custo *versus* benefício. Assim, uma alternativa é considerada dominada quando apresenta um mesmo benefício que outra e um custo maior, ou quando apresenta um mesmo custo que outra, mas um benefício menor [148].

A análise de custo *versus* benefício é feita separando-se os índices de mérito em dois grandes grupos: um deles representa todos os índices de mérito que implicam em custo, enquanto o outro representa os índices de mérito que refletem algum tipo de benefício.

de mérito, que refletem custos e benefícios, devem ser obtidos através da divisão entre a somatória do produto entre os desempenhos locais e as taxas de substituição originais e a somatória das taxas de substituição dos índices de mérito de cada agrupamento, conforme ilustra a equação abaixo:

$$v_{custos.beneficios}(a) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i(a)}{\sum_{i=1}^n w_{i,custos.beneficios}} \quad (3.3)$$

O resultado da análise de custo *versus* benefício é obtido traçando-se um gráfico onde as abscissas representam o desempenho local das alternativas em termos dos custos, e as ordenadas representam o desempenho local das alternativas em termos dos benefícios. A aplicação desta análise, no exemplo proposto por Shimizu para a compra de um imóvel, resulta, como exemplo, na divisão dos índices de mérito da forma mostrada na tabela abaixo [147], [148].

**Tab. 3.7 – Agrupamento de Custo e Benefício para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Agrupamento de Custo		Agrupamento de Benefício	
Índice de Mérito	Taxa de Substituição	Índice de Mérito	Taxa de Substituição
Ganho líquido	0,43	Vantagem competitiva	0,22
		Área disponível	0,35
Total	0,43		0,57

Fonte:[147], [148]

Uma vez encontradas as novas taxas de substituição para os agrupamentos de índices de mérito custo e benefício, torna-se possível calcular o novo desempenho local agrupado

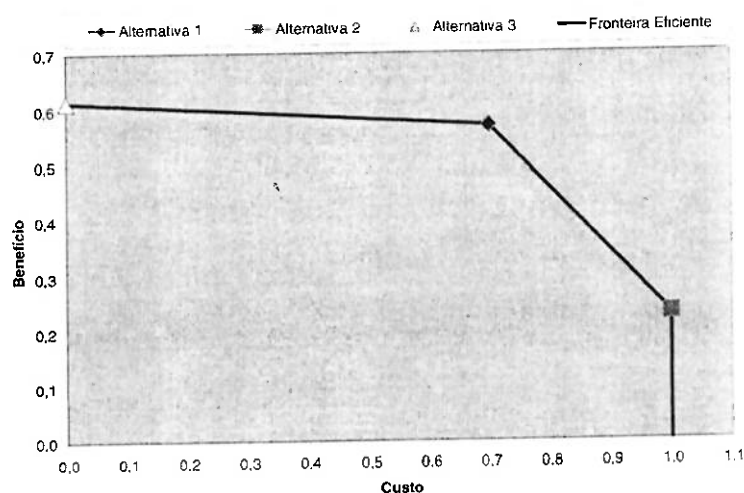
de cada alternativa, dividindo-se o produto entre seu desempenho local e sua taxa de substituição originais pela nova taxa de substituição agrupada. A Tab. 3.8 mostra o resultado destes cálculos.

**Tab. 3.8 – Análise Custo *versus* Benefício para a Decisão de Compra de um Imóvel**

	Agrupamento de Custo		Agrupamento de Benefício	
	Desempenho local original	Desempenho local agrupado	Desempenho local original	Desempenho local agrupado
Alternativa 1	0,301	0,70	0,325	0,570
Alternativa 2	0,43	1,00	0,132	0,232
Alternativa 3	0	0	0,350	0,614

Fonte:[147], [148]

O resultado da análise de custo *versus* benefício para a decisão de compra de um imóvel pode, agora, ser obtido através da construção de um gráfico relacionando-se os desempenhos locais do agrupamento de custo e os desempenhos locais do agrupamento de benefícios. A Fig. 3.2 ilustra o resultado desta análise.



**Fig. 3.2 – Análise custo *versus* benefício para a decisão de compra de um imóvel**

No gráfico originado através da análise de custo *versus* benefício pode-se identificar, também, uma área delimitada pela fronteira eficiente, onde estão localizadas todas as alternativas dominadas. Desta forma, enquanto as alternativas localizadas nesta fronteira são as que oferecem uma melhor relação custo-benefício, a região delimitada por ela indica as alternativas dominadas em termos de custos e benefícios.

Uma descrição detalhada do processo de elaboração do “*perfil de impacto*” e da análise de custo *versus* benefício pode ser encontrada em [148].

### 3.3.4 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade indica a robustez das respostas do modelo frente a alterações nos parâmetros do mesmo [143]. Ela permite avaliar se uma pequena variação, por exemplo, da taxa de substituição ou do desempenho local de uma alternativa, irá causar uma grande variação na avaliação das alternativas [148].

A análise de sensibilidade é necessária devido às diversas imprecisões que são acumuladas durante o processo de execução do método de agregação positiva, sendo as taxas de substituição um dos parâmetros que mais podem apresentar variações, influenciando seu resultado final. Assim, o objetivo desta análise será avaliar a estabilidade do modelo perante variações, da ordem de  $\pm 10\%$ , nas taxas de substituição. Destaca-se a existência de dois métodos de execução da análise de sensibilidade: um de forma numérica e outro de forma gráfica, sendo que este último apresenta, ainda, variantes propostas por Ensslin e Shimizu [143], [145], [147], [148].

A análise de sensibilidade por meio numérico, em função das taxas de substituição, pode ser feita variando-se este parâmetro de determinado índice de mérito, e recalculando-se as demais taxas de substituição, de modo a manter as proporções entre

elas, assim como sua somatória unitária [148]. De acordo com Ensslin, as taxas de substituição recalculadas ( $w'_i$ ), que representam as imprecisões do modelo em agregar, de forma compensatória, desempenhos locais em desempenhos globais, podem ser obtidas utilizando-se a seguinte relação [148]:

$$w'_i = w_i \cdot \left[ \frac{(1 - w'_s)}{(1 - w_s)} \right] \quad (3.4)$$

onde:  $w'_i$  : Taxa de substituição recalculada para o índice de mérito  $i$ .

$w_i$  : Taxa de substituição original do índice de mérito  $i$ .

$w'_s$  : Taxa de substituição definida para o índice de mérito selecionado.

$w_s$  : Taxa de substituição original do índice de mérito selecionado.

O modelo poderá ser considerado robusto, caso o resultado final não se modifique significativamente, em decorrência da variação das taxas de substituição.

Já a análise de sensibilidade por meio gráfico, além de possuir a vantagem de ser visual, facilitando a análise de seu resultado, requer uma menor quantidade de cálculos, principalmente para modelos com grande quantidade de índices de mérito. Basicamente, uma das variantes existentes, proposta por Ensslin, sugere que se tracem retas, representando o desempenho global das alternativas, em função da variação da taxa de substituição de um dos índices de mérito do modelo [148]. As retas são, então, definidas por dois de seus pontos, sendo um deles formado pela taxa de substituição original do índice de mérito definido para esta análise, e o outro com seu valor alterado para um, caso particular onde o desempenho global das alternativas se iguala aos seus respectivos desempenhos locais no índice de mérito definido para a análise. Com as coordenadas dos pontos definidas, traça-se um gráfico onde as abscissas representam o valor da taxa

de substituição do índice de mérito selecionado e as ordenadas representam o desempenho global das alternativas.

Considerando-se que todas as alternativas podem ser representadas no mesmo gráfico, a variante da análise de sensibilidade proposta por Ensslin é útil, pois indica, em uma única figura, de modo objetivo, a variação do desempenho global da alternativa mais atrativa perante uma variação da taxa de substituição do índice de mérito selecionado.

Aplicando-se o método numérico da análise de sensibilidade, proposto por Ensslin, no exemplo de decisão de compra de um imóvel, obtém-se os resultados mostrados na Tab. 3.9. com base na utilização da equação 3.4 para uma variação de  $\pm 10\%$  na taxa de substituição do índice de mérito ganho líquido.

**Tab. 3.9 – Variação das Taxas de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição		
	Original	+ 10 %	- 10 %
Ganho líquido	0,43	0,473	0,387
Vantagem competitiva	0,22	0,203	0,237
Área disponível	0,35	0,324	0,376
Total	1,00	1,00	1,00

Fonte:[147], [148]

Os novos valores das taxas de substituição representam a variação de tolerância do processo de modelamento da decisão de compra de um imóvel e, como consequência, afetam diretamente o desempenho global das alternativas em avaliação. A Tab. 3.10 e a Tab. 3.11 mostram os novos valores de desempenho global das alternativas, quando as



taxas de substituição de seus índices de mérito apresentam uma variação de +10% e -10%, respectivamente.

Observa-se que, apesar da variação do valor das taxas de substituição, o resultado do modelo de decisão de compra de um imóvel permanece inalterado, o que indica sua robustez.

**Tab. 3.10 – Desempenhos Globais com Variação de +10% na Taxa de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição ( $w_i$ )	Alternativa 1 ( $v_i$ )	Alternativa 2 ( $v_i$ )	Alternativa 3 ( $v_i$ )
Ganho líquido	0,473	0,70	1,00	0
Vantagem competitiva	0,203	1,00	0,60	0
Área disponível	0,324	0,30	0	1,00
V(a)		0,631	0,595	0,324

Fonte:[147], [148]

**Tab. 3.11 – Desempenhos Globais com Variação de -10% na Taxa de Substituição para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição ( $w_i$ )	Alternativa 1 ( $v_i$ )	Alternativa 2 ( $v_i$ )	Alternativa 3 ( $v_i$ )
Ganho líquido	0,387	0,70	1,00	0
Vantagem competitiva	0,237	1,00	0,60	0
Área disponível	0,376	0,30	0	1,00
V(a)		0,621	0,529	0,376

Fonte:[147]

Já com relação à aplicação da análise de sensibilidade através do método gráfico no exemplo de decisão de compra de um imóvel, obtém-se a Tab. 3.12, seguindo-se o procedimento proposto por Ensslin.

**Tab. 3.12 – Análise de Sensibilidade (Ensslin) para a Decisão de Compra de um Imóvel – Método Gráfico**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
V(a) (com taxa de substituição original)	0,626	0,526	0,350
V(a) (com taxa de substituição do índice ganho líquido igual a um)	0,700	1,00	0

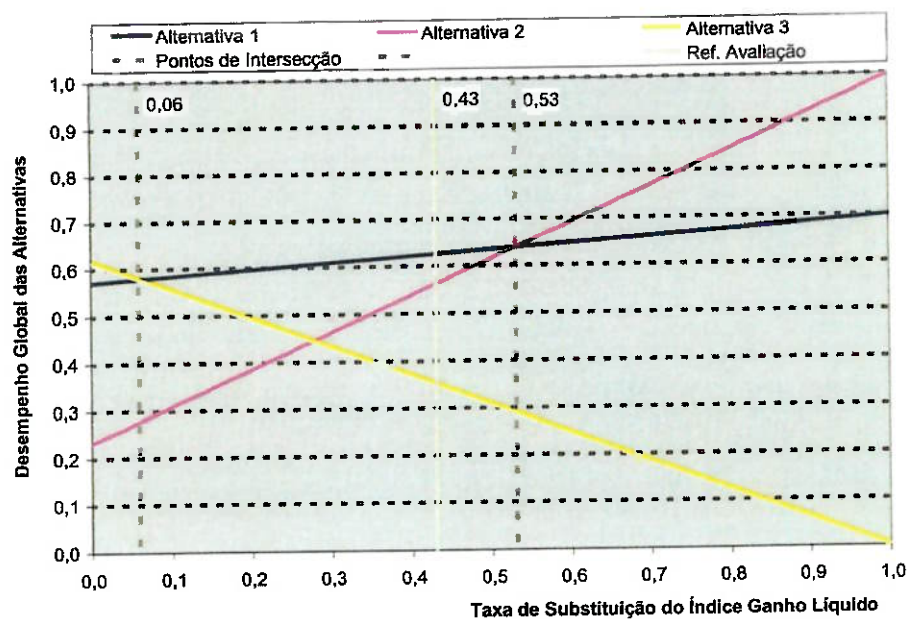
Fonte:[147], [148]

Como resultado, o método proposto por Ensslin para a análise de sensibilidade sugere a construção de um gráfico relacionado-se os desempenhos globais das alternativas com a taxa de substituição do índice de mérito selecionado para a análise, no caso, ganho líquido. A Fig. 3.3 ilustra o resultado desta análise.

Observa-se que, no exemplo de decisão de compra de um imóvel, o resultado do modelo seria modificado caso a taxa de substituição do índice de mérito ganho líquido fosse superior a 0,53 ou inferior a 0,06, quando as alternativas 2 e 3 seriam apontadas como mais atrativas, respectivamente.

Finalmente, a variante da análise de sensibilidade sugerida por Shimizu, apesar de exigir a realização de uma maior quantidade de cálculos, resulta em um gráfico muito semelhante ao processo apontado por Ensslin [147]. Basicamente, esta proposta sugere

que as retas que representam o desempenho global das alternativas sejam definidas por dois de seus pontos, sendo um deles formado pelo valor da taxa de substituição do índice de mérito selecionado alterado para um, e o outro com seu valor alterado para zero. Nesta última condição, torna-se necessário recalcular as taxas de substituição de todos os índices de mérito, mantendo-se as proporções entre elas, assim como sua somatória unitária. De posse dos valores das taxas de substituição recalculados, pode-se encontrar os novos desempenhos globais das alternativas, definindo-se as coordenadas dos pontos requeridos. Em seguida, traça-se um gráfico onde as ordenadas representam o valor da taxa de substituição do índice de mérito selecionado para a análise e as abscissas representam o valor da somatória das demais taxas de substituição.



**Fig. 3.3** – Análise de sensibilidade (Ensslin) para a decisão de compra de um imóvel –

Método gráfico

Da mesma forma como a variante anterior, a proposta de Shimizu, também, permite que se verifique a variação da alternativa mais atrativa, perante uma variação da taxa de

De volta ao exemplo de decisão de compra de um imóvel, ao aplicar-se a variante da análise de sensibilidade proposta por Shimizu, obtém-se os resultados mostrados na Tab. 3.13 e na Tab. 3.14, considerando-se o valor da taxa de substituição do índice de mérito selecionado para a análise igual a um e zero, respectivamente.

**Tab. 3.13 – Desempenhos Globais com Taxa de Substituição do Índice de Mérito**  
**Ganho Líquido Igual a um para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	0	1,00			
Ganho líquido	100	1,00	0,700	1,00	0
Vantagem Competitiva	0	0	1,00	0,600	0
Área disponível	0	0	0,300	0	1,00
V(a)			0,700	1,00	0

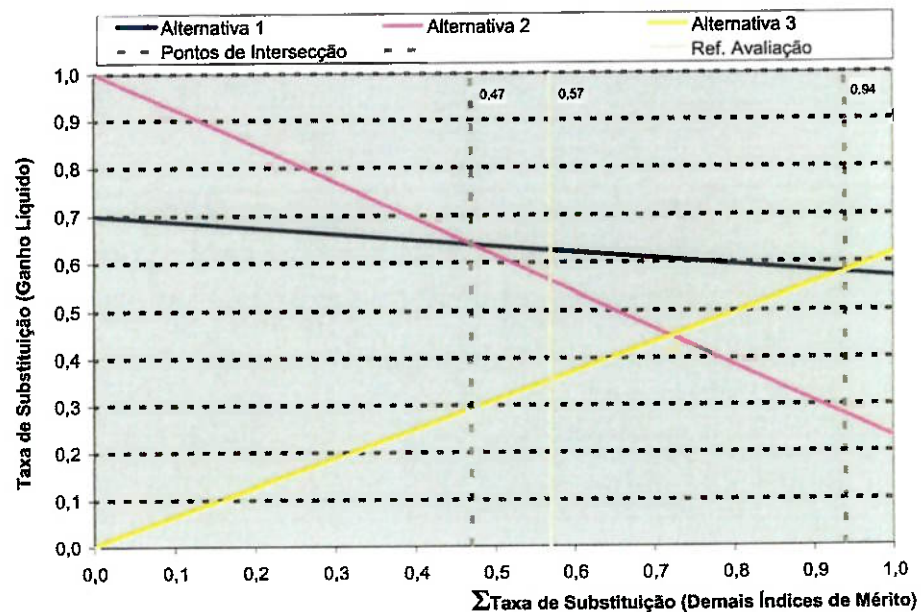
Fonte: [147], [148]

**Tab. 3.14 – Desempenhos Globais com Taxa de Substituição do Índice de Mérito**  
**Ganho Líquido Igual a zero para a Decisão de Compra de um Imóvel**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	0	1,00			
Ganho líquido	0	0	0,700	1,00	0
Vantagem Competitiva	50	0,385	1,00	0,600	0
Área disponível	80	0,615	0,300	0	1,00
V(a)			0,569	0,231	0,615

Fonte: [147], [148]

O resultado da variante da análise de sensibilidade proposto por Shimizu pode ser obtido relacionando-se, nas ordenadas, o valor da taxa de substituição do índice de mérito selecionado para a análise, e nas abscissas, a somatória dos valores das demais taxas de substituição. A Fig. 3.4 ilustra o resultado desta análise para o exemplo de decisão de compra de um imóvel.



**Fig. 3.4** – Análise de sensibilidade (Shimizu) para a decisão de compra de um imóvel – Método gráfico

Observa-se, por fim, que o resultado da análise de sensibilidade indica a robustez do modelo, desde que a atratividade das alternativas não seja afetada significativamente perante uma pequena variação das taxas de substituição [147], [148].

Ressalta-se, ainda, que a análise de sensibilidade não representa o final do processo de decisão, sendo tal análise somente mais uma oportunidade de ampliar o conhecimento sobre o modelo construído.

## **4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DAS ARQUITETURAS PARA O SISTEMA ELÉTRICO AUTOMOTIVO**

### **4.1 Considerações Gerais**

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação do método de agregação aditiva na avaliação de diversas arquiteturas para o sistema elétrico automotivo. Este capítulo apresenta, também, uma breve discussão sobre os resultados obtidos.

Inicialmente, as principais arquiteturas elétricas consideradas na literatura disponível serão introduzidas e caracterizadas tecnicamente. Em seguida, o método de agregação aditiva será aplicado na avaliação das arquiteturas elétricas definidas, possibilitando a identificação da arquitetura mais atrativa, de acordo com os parâmetros do modelo de análise construído. Finalmente, os resultados obtidos serão analisados, com base nas informações disponíveis na literatura e na experiência prática dos autores.

### **4.2 Características Técnicas das Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo**







As arquiteturas elétricas automotivas selecionadas para a análise proposta encontram-se disponíveis, de forma abrangente, na literatura existente. Desta forma, as principais recomendações realizadas pelos mais importantes fóruns automotivos internacionais como, por exemplo, o “MIT/Industry Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems”, liderado pelo MIT, e o “42 Volt Advisory Committee”, liderado pela SAE, serão consideradas através da consideração de suas próprias sugestões de arquiteturas elétricas neste estudo.

Nota-se, que a evolução histórica dos estudos relacionados ao sistema elétrico automotivo contribuiu, de modo decisivo, para o aperfeiçoamento das propostas de

arquiteturas elétricas, conduzindo tanto a uma modularização dos componentes elétricos envolvidos, quanto ao aumento de sua confiabilidade devido à consideração de técnicas de segurança.

Nos próximos itens, serão apresentadas as arquiteturas elétricas selecionadas para a análise, utilizando-se as simbologias descritas na Tab. 4.1, onde serão destacadas sua origem e suas principais características técnicas.

**Tab. 4.1 – Descrição da Simbologia Adotada na Representação Gráfica das Arquiteturas Elétricas**

Símbolo	Descrição
	Motor de partida
	Alternador
	Conversor CC-CC
	Bateria
	Dispositivos elétricos
	Alternador e motor de partida integrados

#### 4.2.1 Arquitetura 1

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.1 representa uma das primeiras propostas publicadas na literatura a considerar um barramento de tensão elevada, em adição ao barramento de tensão padrão em 14 volts CC.

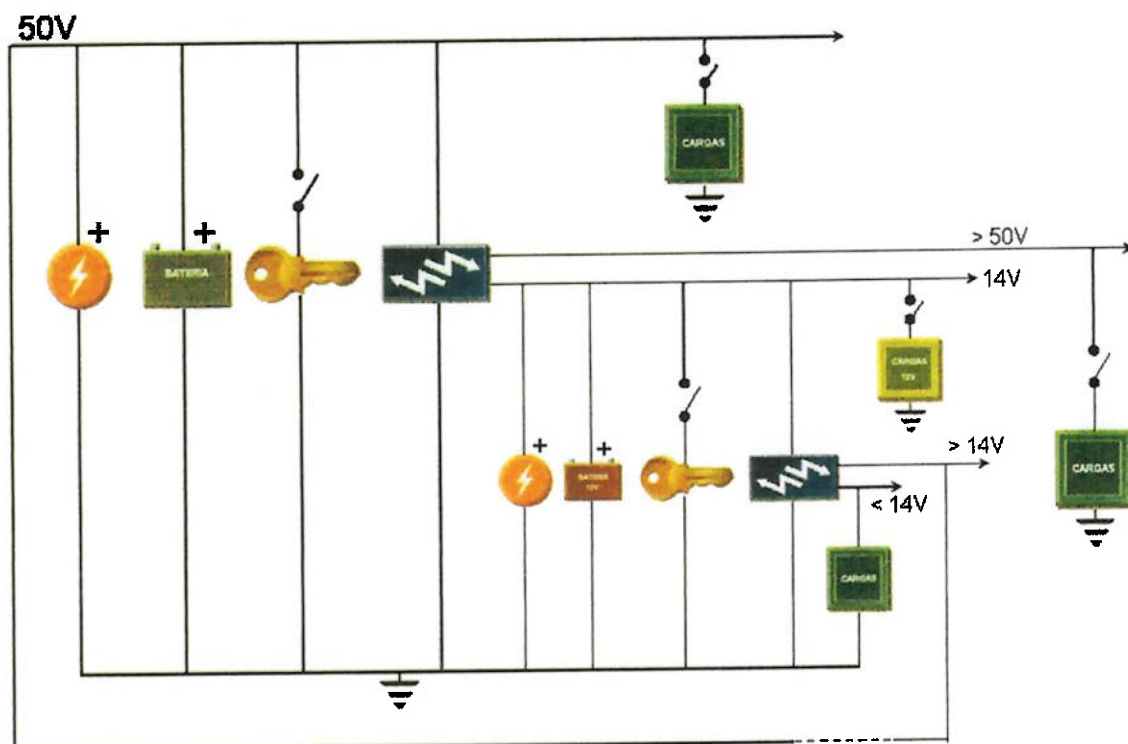


Fig. 4.1 – Arquitetura elétrica proposta por Hellman [13]

A arquitetura elétrica ilustrada acima foi primeiramente proposta por Hellmann, em 1991, buscando tornar a implementação de sistemas de tensão elevada gradual e, desta forma, mais viável tecnicamente [13].

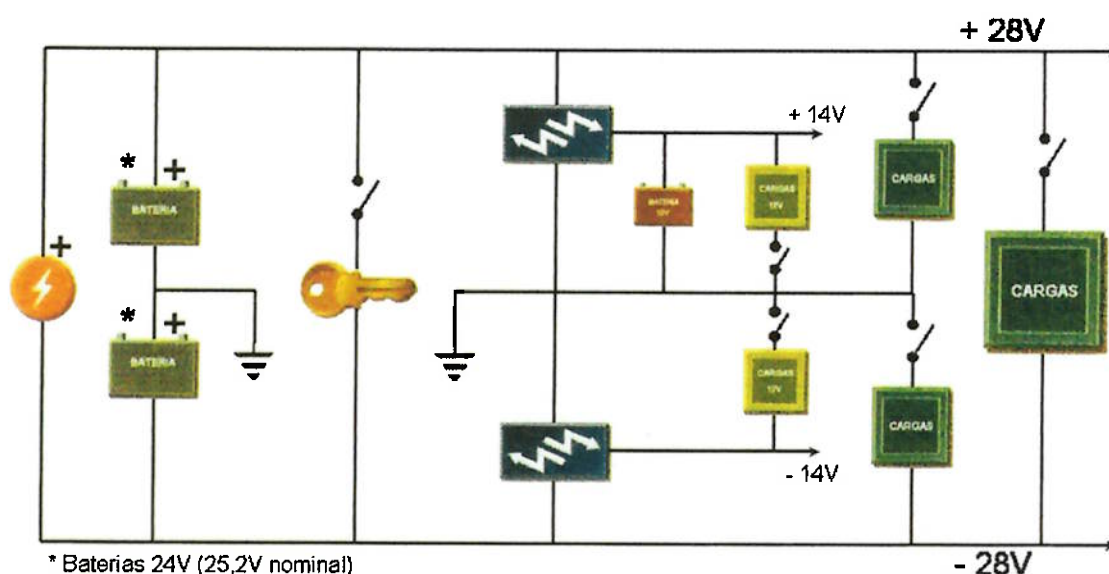
Uma das principais características técnicas desta arquitetura refere-se à existência de dois conversores CC-CC, responsáveis por permitir o estabelecimento de diversos barramentos de tensão, cada um destinado a fornecer energia para determinado grupo de dispositivos elétricos. Desta forma, os barramentos de tensão elevada são destinados à alimentação de motores elétricos, em geral, enquanto os barramentos de tensão reduzida e o barramento de tensão em 14 volts CC são utilizados para a conexão de equipamentos eletrônicos e lâmpadas e motores elétricos pequenos, entre outros dispositivos elétricos, respectivamente.



Destaca-se, ainda, a redundância como uma característica técnica marcante nesta arquitetura elétrica. Dentre os principais componentes elétricos utilizados em redundância na arquitetura ilustrada pela Fig. 4.1, destacam-se o alternador, a bateria e o conversor CC-CC devido ao elevado custo associado a estes componentes. Apesar da redundância ser benéfica por um lado, pois aumenta a confiabilidade total do sistema, ela é prejudicial por outro lado, pois aumenta o seu custo total.

#### 4.2.2 Arquitetura 2

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.2 foi proposta por Hellmann, em 1991, de forma simultânea à arquitetura mencionada anteriormente [13]. Nota-se, da mesma forma como em sua proposta anterior, a existência de diversos barramentos de tensão, incluindo estágios de tensões elevadas, intermediárias e o atual padrão em 14 volts CC. Ressalta-se, entretanto, neste caso, o método de obtenção do barramento de tensão elevada, realizada através de uma fonte simétrica formada por duas baterias conectadas em série.



A arquitetura elétrica acima ilustrada foi posteriormente referenciada por outros autores como, por exemplo, Miller, em 1996, considerando alguns aspectos relacionados à complexidade do controle da carga das baterias conectadas ao barramento de tensão elevada [93].

Destaca-se, ainda, a redundância como uma característica técnica novamente presente nesta proposta, porém em menor intensidade, uma vez que, somente a bateria e o conversor CC-CC são utilizados em mais de uma aplicação.

#### 4.2.3 Alternativa 3

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.3 foi primeiramente proposta por Becker, em 1992, e, posteriormente, analisada por Dwyer, em 1996 [44], [45]. Esta arquitetura elétrica destaca-se pela sua simplicidade e por ser a primeira a considerar a utilização do barramento de tensão em 42 volts CC, além de alternadores com duplo enrolamento no estator.

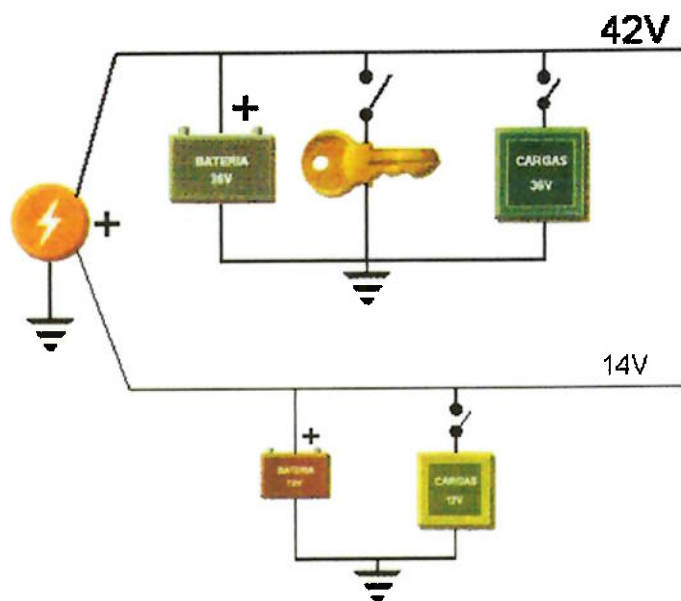


Fig. 4.3 – Arquitetura elétrica proposta por Becker e Dwyer [44], [45]

Os alternadores com duplo enrolamento no estator, capazes de gerar energia elétrica diretamente compatível com os barramentos aos quais está conectado, foram analisados, em detalhes, por outros autores como, por exemplo, Naidu, em 2001, e Armioli, em 2002, que consideram este componente como um potencial substituto aos conversores CC-CC [41], [46].

A redundância ainda pode ser destacada como uma característica técnica desta arquitetura elétrica, devido à existência de uma bateria específica para cada barramento de tensão.

#### 4.2.4 Arquitetura 4

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.4 pode ser identificada como uma variante da arquitetura elétrica anterior, com base na substituição do alternador com duplo enrolamento no estator por dois alternadores, cada um conectado, de forma independente, em cada barramento de tensão disponível.

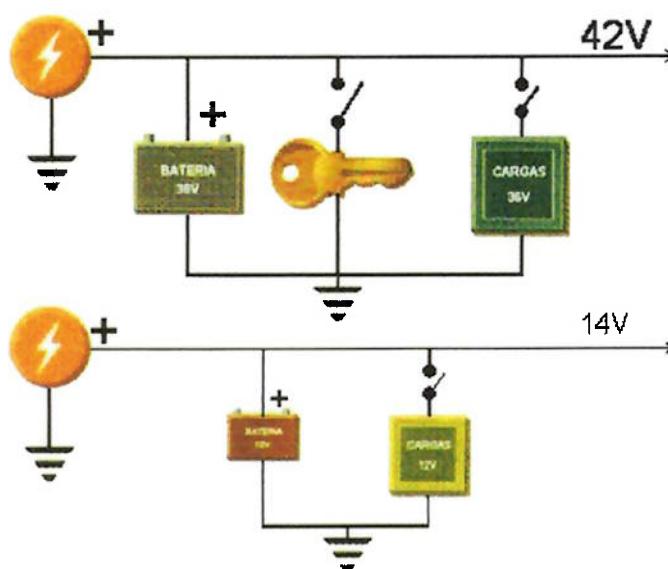


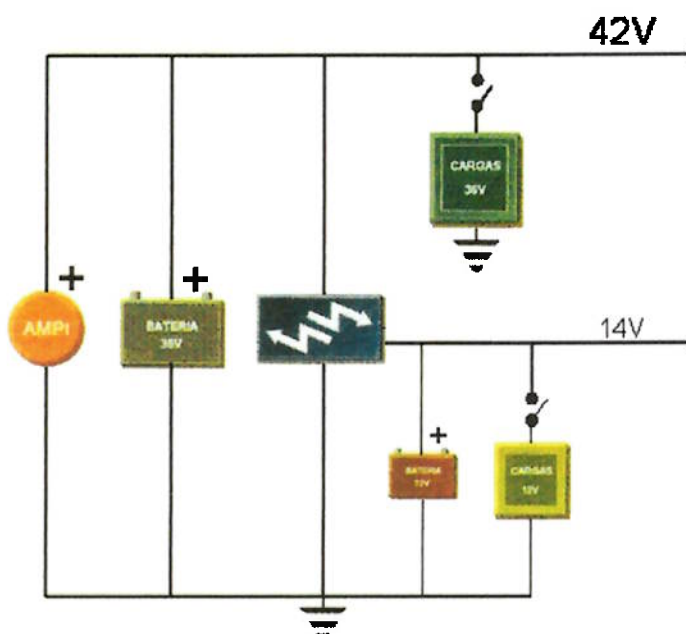
Fig. 4.4 – Arquitetura elétrica proposta por Miller, Huang e Nicastrì [53], [54], [100]

A arquitetura elétrica acima ilustrada foi proposta inicialmente por Miller, em 1998, sendo referenciada por outros autores como, por exemplo, Huang e Nicastrì, em anos subsequentes [53], [54], [100].

A redundância ainda está presente nesta arquitetura elétrica, de modo mais marcante do que na variante anterior, pois além da bateria, o alternador também é considerado em mais de uma aplicação.

#### 4.2.5 Arquitetura 5

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.5 foi concebida inicialmente por Miller, em 1998, sendo posteriormente adotada por diversos autores, entre eles, Huang, Nicastrì e Silva, como uma das arquiteturas elétricas mais atrativas até então propostas [43], [53], [54], [100].



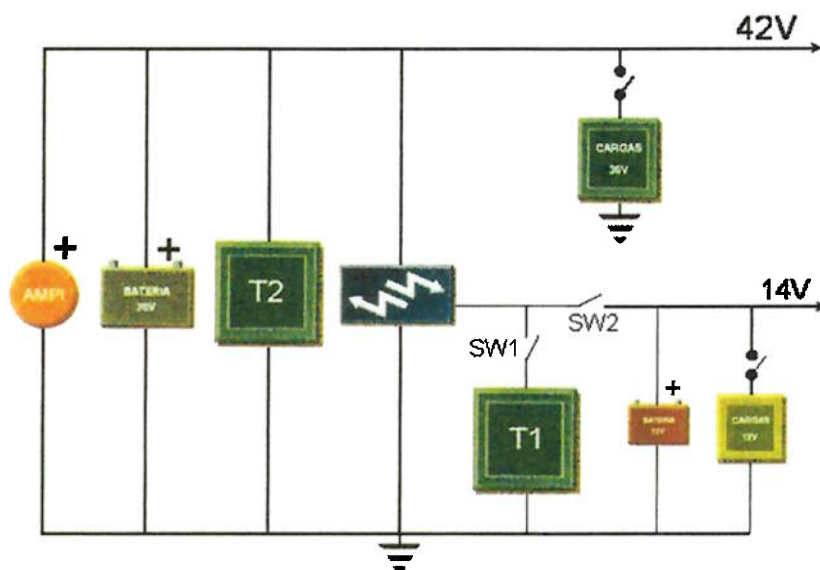
**Fig. 4.5** – Arquitetura elétrica proposta por Miller, Huang, Nicastrì e Silva [43], [53], [54], [100]

Apesar de possuir determinado grau de redundância, uma vez que existem duas baterias consideradas na arquitetura elétrica acima ilustrada, a utilização de um AMPI pode ser destacada como a característica técnica mais importante desta proposta. Observa-se que, ao se considerar este componente, elimina-se o alternador e o motor de partida, cujas funções são incorporadas ao AMPI.

Nesta construção, nota-se, ainda, a existência de dois barramentos de tensão, obtidos através de um conversor CC-CC. Ressalta-se, por fim que, devido à utilização de uma bateria conectada ao barramento de tensão em 14 volts CC, o conversor CC-CC, pode ser projetado para atender a demanda de corrente elétrica média deste barramento, sendo a bateria responsável por suprir as demandas de pico.

#### 4.2.6 Arquitetura 6

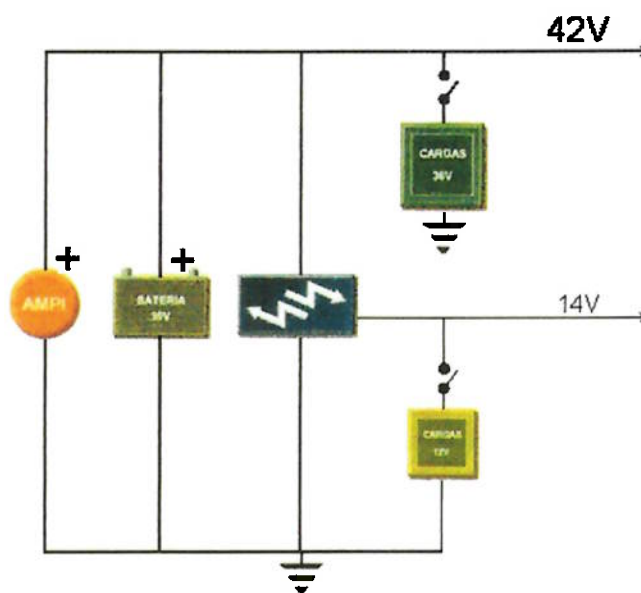
A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.6 foi proposta por Nicastri, em 1999, para permitir a execução de partidas com baterias auxiliares entre veículos equipados com o barramento de tensão elevada e com o barramento atual em 14 volts CC [99], [100].



Os blocos identificados por T1 e T2 representam terminais específicos para partidas auxiliares, posicionados em locais estratégicos dentro do veículo. De acordo com Nicastri, o terminal T1 deve ser utilizado para partidas com baterias auxiliares entre veículos que possuem diferentes barramentos de tensão. Desta forma, o conversor CC-CC poderá conectar diretamente os barramentos de tensão dos veículos, conduzindo energia para aquele que não a possui em quantidade suficiente para partir o MCI [100]. Nota-se que, a arquitetura elétrica acima ilustrada difere da arquitetura elétrica anterior somente por meio da adição dos terminais de partida com bateria auxiliar, T1 e T2, sendo que as demais características técnicas podem ser consideradas equivalentes.

#### 4.2.7 Arquitetura 7

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.7 foi inicialmente proposta por Kassakian, em 2000, sendo estudada por outros autores como, por exemplo, Daniels e Altes, em anos subsequentes [62], [64], [81], [98].

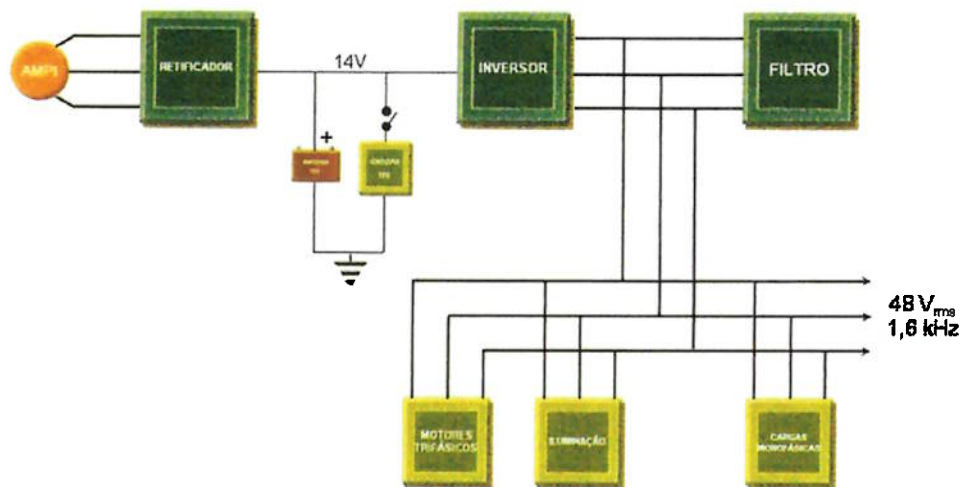


A principal característica técnica da arquitetura elétrica acima ilustrada é a eliminação da redundância, obtida através da eliminação da bateria conectada ao barramento de tensão em 14 volts CC. Com relação às demais características técnicas, esta arquitetura elétrica é muito semelhante àquela ilustrada pela Fig. 4.5, onde também se considera a utilização de dois barramentos de tensão e de um AMPI, eliminando-se, assim, o alternador e o motor de partida.

Por outro lado, observa-se que, devido à eliminação da bateria conectada ao barramento de tensão em 14 volts CC, o projeto do conversor CC-CC deve passar a ser executado pelo valor de pico da corrente elétrica consumida neste barramento.

#### 4.2.8 Arquitetura 8

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.8 foi proposta por Masrur, em 1998, com base em estudos realizados por outros autores alguns anos antes como, por exemplo, Afridi, em 1994, e Miller, em 1996, entre outros [18], [93]-[95].



**Fig. 4.8** – Arquitetura elétrica proposta por Masrur, Afridi e Miller [18], [93]-[95]

Além das características técnicas existentes nas arquiteturas já mencionadas como, por exemplo, a utilização do AMPI e de dois barramentos de tensão, a arquitetura elétrica, acima ilustrada, possui uma característica técnica inovadora: o barramento de tensão elevada em CA. De acordo com Masrur, o barramento de tensão elevada em CA pode beneficiar o projeto do sistema elétrico de um veículo em termos de custo, simplicidade e confiabilidade, assim como observado em alguns estudos realizados para aplicações aeroespaciais.

#### 4.2.9 Arquitetura 9

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.9 foi proposta por Emadi, em 2000, com base em uma associação entre os veículos movidos à MCI e aqueles movidos a motores elétricos, resultando em veículos híbridos [128], [138]. Destaca-se a existência de um barramento de tensão no valor de 300V CC, que poderia ser utilizado para acionar os motores elétricos responsáveis pela tração do veículo.

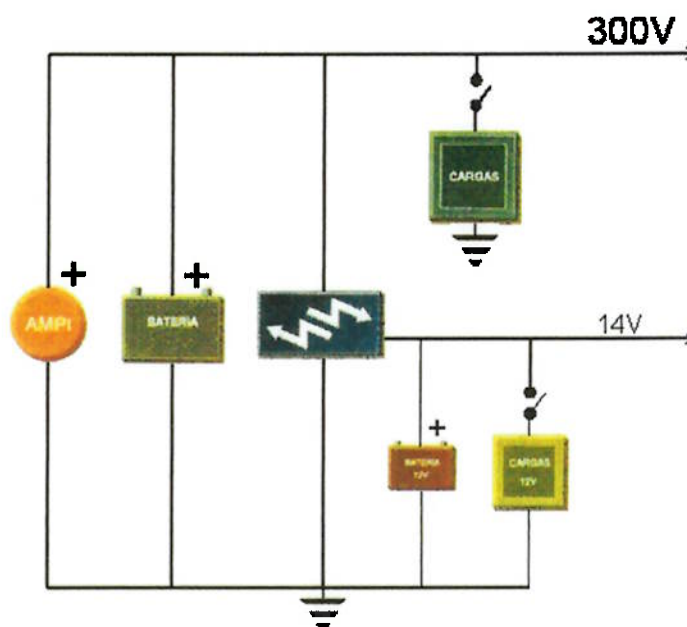


Fig. 4.9 – Arquitetura elétrica proposta por Emadi [128] [138]



A arquitetura elétrica, acima ilustrada, agrega os mais importantes aspectos relacionados com as principais tecnologias emergentes, aplicáveis ao sistema elétrico automotivo, entre elas, os veículos elétricos e os veículos com barramento de tensão elevada.

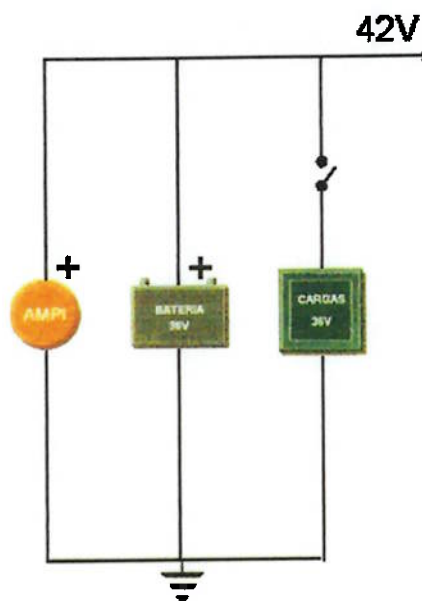
Uma das principais características técnicas desta arquitetura elétrica é o seu barramento de tensão em 300V CC. O estabelecimento deste valor de tensão decorre da necessidade de redução do valor da corrente elétrica de acionamento dos motores utilizados para a tração do veículo. Porém, como consequência, além de se tornar necessária a utilização de uma série de baterias conectadas em série, para se obter o valor da tensão do barramento, todo o barramento deve ser protegido contra o contato humano sob o risco de severos danos à saúde [11], [12].

Observa-se, por fim, que a redundância volta a estar presente nesta proposta, devido à consideração de uma bateria no barramento de tensão em 14 volts CC.

#### **4.2.10 Arquitetura 10**

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.10 foi proposta por Nicastrì, em 2000, com o objetivo de introduzir um sistema simplificado de distribuição de potência veicular, considerando a utilização de um único barramento de tensão [100].

A proposta de Nicastrì distingue-se das demais, visto que, grande parte das arquiteturas elétricas, existentes na literatura, concentram-se em sistemas que possuam dois barramentos de tensão, sendo um deles o atual barramento de tensão em 14 volts CC. De forma abrangente, a razão para a existência de dois barramentos de tensão, seria tornar a implementação de sistemas de tensão elevada gradual e, deste modo, viável tecnicamente[13].



**Fig. 4.10** – Arquitetura elétrica proposta por Nicastrì [100]

A principal característica técnica da arquitetura elétrica acima ilustrada é a existência de um único barramento de distribuição de tensão no valor de 42 volts CC, o que obriga a adequação de todos os dispositivos elétricos à esta nova tensão nominal.

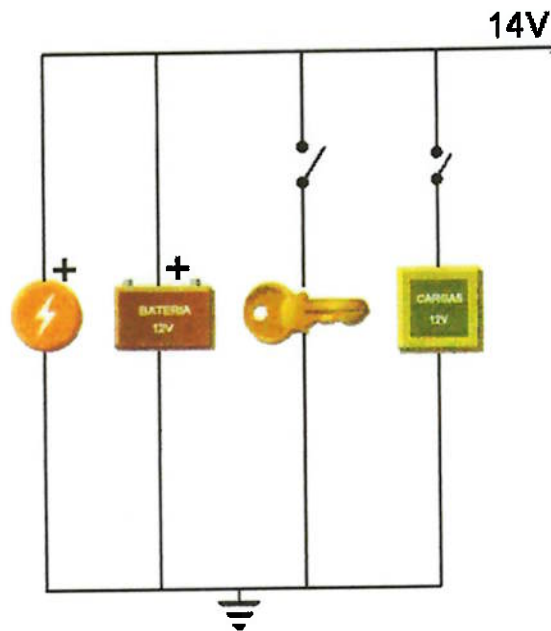
#### 4.2.11 Arquitetura 11

A arquitetura elétrica ilustrada pela Fig. 4.11 representa o sistema elétrico da maior parte dos veículos atualmente em produção, formado por um único barramento de distribuição de tensão em 14 volts CC.

Uma das principais características técnicas da arquitetura elétrica abaixo ilustrada é a sua ampla e contínua utilização, desde meados dos anos 50, o que permitiu a obtenção de ganhos de escala, além dos ganhos provenientes da maturidade do projeto como, por exemplo, elevada confiabilidade.

A consideração desta arquitetura elétrica na avaliação proposta objetiva fornecer os

perante uma referência conhecida. Assim, todas as arquiteturas elétricas poderão ser avaliadas pelos índices de mérito em termos absolutos, através de seus descritores, e, também, em termos relativos, através da referência fornecida pelo desempenho da arquitetura elétrica representada pela Fig. 4.11.



**Fig. 4.11** – Arquitetura elétrica de grande parte dos veículos atuais

### 4.3 Avaliação das Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo

Como resultado da aplicação do método de agregação aditiva para a avaliação das arquiteturas elétricas anteriormente definidas, foi necessário estabelecer uma relação de atratividade entre as mesmas, com base nos parâmetros do modelo de análise construído. Os resultados apresentados a seguir representam uma síntese do conjunto de cálculos executados.

#### 4.3.1 Definição das Funções de Valor para os Índices de Mérito

A seguir serão mostrados os descritores e suas respectivas funções de valor, utilizados no modelo construído para a avaliação das arquiteturas anteriormente descritas para o sistema elétrico automotivo.

Com base no método da pontuação direta e na experiência profissional de membros da indústria automobilística, o valor um foi associado aos descritores cujo nível de impacto foi considerado bom. Da mesma forma, associou-se o valor zero aos descritores cujo nível de impacto foi considerado não satisfatório. Para os demais níveis de impacto dos descritores adotou-se, neste trabalho, uma escala linear com dois pontos intermediários, o que levou a consideração de quatro níveis de impacto para cada índice de mérito, podendo chegar a cinco nos casos daqueles índices de mérito que possuam um descritor cujo desempenho é considerado excelente.

**Tab. 4.2 – Função de Valor para o Índice de Mérito Custo Agregado**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
$N_5$	Custo inferior ao sistema elétrico em 14V CC	1,33
$N_4$	Custo equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
$N_3$	Custo superior até 50% do sistema elétrico em 14V CC	0,66
$N_2$	Custo superior até 100% do sistema elétrico em 14V CC	0,33
$N_1$	Custo superior a 100% do sistema elétrico em 14V CC	0

**Tab. 4.3 – Função de Valor para o Índice de Mérito Consumo de Combustível**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Consumo inferior a 80% do sistema elétrico em 14V CC sem auxílio de equipamentos adicionais	1,33
N <sub>4</sub>	Consumo inferior a 80% do sistema elétrico em 14V CC com auxílio de equipamentos adicionais	1,00
N <sub>3</sub>	Consumo inferior até 80% do sistema elétrico em 14V CC	0,66
N <sub>2</sub>	Consumo equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	0,33
N <sub>1</sub>	Consumo superior até 20% do sistema elétrico em 14V CC	0

**Tab. 4.4 – Função de Valor para o Índice de Mérito “Payback”**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	“Payback” de um ano	1,00
N <sub>3</sub>	“Payback” de dois anos	0,66
N <sub>2</sub>	“Payback” de três anos	0,33
N <sub>1</sub>	“Payback” maior do que três anos	0

**Tab. 4.5 – Função de Valor para o Índice de Mérito Expansibilidade**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Facilmente expansível	1,33
N <sub>4</sub>	Requer pequenas alterações no sistema instalado	1,00
N <sub>3</sub>	Requer alterações moderadas no sistema instalado	0,66
N <sub>2</sub>	Requer profundas alterações no sistema instalado	0,33
N <sub>1</sub>	Requer desenvolvimento de nova tecnologia	0

**Tab. 4.6 – Função de Valor para o Índice de Mérito Prazo para Expansão**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Prazo menor do que um ano	1,33
N <sub>4</sub>	Prazo de um ano	1,00
N <sub>3</sub>	Prazo de dois anos	0,66
N <sub>2</sub>	Prazo de três anos	0,33
N <sub>1</sub>	Prazo maior do que três anos	0

**Tab. 4.7 – Função de Valor para o Índice de Mérito Custo Associado à Expansão**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Expansão com custo e investimento nulos	1,33
N <sub>4</sub>	Expansão com pequeno investimento e sem custo	1,00
N <sub>3</sub>	Expansão com pequeno investimento e custo reduzido	0,66
N <sub>2</sub>	Expansão com investimento e custo moderados	0,33
N <sub>1</sub>	Expansão com investimento e custo significativos	0

**Tab. 4.8 – Função de Valor para o Índice de Mérito Oportunismo**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Arquitetura emprega tecnologia e componentes desenvolvidos	1,33
N <sub>4</sub>	Arquitetura emprega tecnologia desenvolvida	1,00
N <sub>3</sub>	Arquitetura emprega tecnologia e componentes conhecidos	0,66
N <sub>2</sub>	Arquitetura emprega tecnologia conhecida	0,33
N <sub>1</sub>	Arquitetura requer desenvolvimento tecnológico	0

**Tab. 4.9 – Função de Valor para o Índice de Mérito Modismo**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Arquitetura amplamente adotada no mercado automotivo	1,33
N <sub>4</sub>	Arquitetura adotada por montadoras de vanguarda	1,00
N <sub>3</sub>	Arquitetura defendida por fóruns internacionais	0,66
N <sub>2</sub>	Arquitetura proposta em estudos iniciais	0,33
N <sub>1</sub>	Arquitetura inédita	0

**Tab. 4.10 – Função de Valor para o Índice de Mérito Confiabilidade**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Faz uso de componentes conhecidos, com redundância e dispositivos de proteção	1,33
N <sub>4</sub>	Faz uso de componentes conhecidos, com redundância	1,00
N <sub>3</sub>	Faz uso de componentes conhecidos, sem redundância	0,66
N <sub>2</sub>	Faz uso de componentes novos, com redundância	0,33
N <sub>1</sub>	Faz uso de componentes novos, sem redundância	0

**Tab. 4.11 – Função de Valor para o Índice de Mérito Complexidade**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Equivalente à apresentada pelo sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Emprega nova tecnologia com conceitos conhecidos	0,66
N <sub>2</sub>	Emprega grande número de sub-sistemas	0,33
N <sub>1</sub>	Emprega nova tecnologia e grande número de sub-sistemas	0

**Tab. 4.12 – Função de Valor para o Índice de Mérito Detecção de Falhas**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Emprega componentes auto-diaagnosticáveis	1,33
N <sub>4</sub>	Equivalente à apresentada pelo sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Mesmos equipamentos com poucos sub-sistemas adicionais	0,66
N <sub>2</sub>	Mesmos equipamentos com muitos sub-sistemas adicionais	0,33
N <sub>1</sub>	Requer novos equipamentos para a detecção de falhas	0

**Tab. 4.13 – Função de Valor para o Índice de Mérito Intercambiabilidade**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Permite utilizar os dispositivos e a rede de auxílio existentes	1,33
N <sub>4</sub>	Permite a utilização dos dispositivos elétricos existentes	1,00
N <sub>3</sub>	Requer pequenas adaptações nos dispositivos elétricos existentes	0,66
N <sub>2</sub>	Requer grandes adaptações nos dispositivos elétricos existentes	0,33
N <sub>1</sub>	Requer o desenvolvimento de novos dispositivos elétricos	0

**Tab. 4.14 – Função de Valor para o Índice de Mérito Mão-de-Obra Especializada**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Não requer mão-de-obra especializada	1,00
N <sub>3</sub>	Requer mão-de-obra especializada em poucos sistemas	0,66
N <sub>2</sub>	Requer mão-de-obra especializada em muitos sistemas	0,33
N <sub>1</sub>	Requer mão-de-obra especializada em todos os sistemas	0



**Tab. 4.15 – Função de Valor para o Índice de Mérito Tecnologia Atual**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Emprega tecnologia desenvolvida, com peças disponíveis	1,33
N <sub>4</sub>	Emprega tecnologia desenvolvida	1,00
N <sub>3</sub>	Emprega tecnologia em fase final de desenvolvimento	0,66
N <sub>2</sub>	Emprega tecnologia em fase inicial de desenvolvimento	0,33
N <sub>1</sub>	Requer desenvolvimento de nova tecnologia	0

**Tab. 4.16 – Função de Valor para o Índice de Mérito Inovação Tecnológica**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Permite a introdução de novas funcionalidades, sem custo	1,33
N <sub>4</sub>	Permite a introdução de novas funcionalidades	1,00
N <sub>3</sub>	Permite a introdução de novas funcionalidades, com restrições	0,66
N <sub>2</sub>	Permite a introdução de novas funcionalidades, com complexidade elevada	0,33
N <sub>1</sub>	Não permite a introdução de novas funcionalidades	0

**Tab. 4.17 – Função de Valor para o Índice de Mérito Aceitação do Mercado**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Funções e recursos adicionais são imperceptíveis	1,33
N <sub>4</sub>	Funções e recursos adicionais não incomodam os usuários	1,00
N <sub>3</sub>	Funções e recursos adicionais podem incomodar os usuários	0,66
N <sub>2</sub>	Requer atenção do usuário devido aos recursos instalados	0,33
N <sub>1</sub>	Funções e recursos adicionais incomodam os usuários	0

**Tab. 4.18 – Função de Valor para o Índice de Mérito Interface Humana**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Funções acionadas automaticamente com realimentação visual	1,00
N <sub>3</sub>	Funções acionadas automaticamente sem perda de atenção	0,66
N <sub>2</sub>	Funções acionadas manualmente sem perda de atenção	0,33
N <sub>1</sub>	Funções acionadas manualmente com perda de atenção	0

**Tab. 4.19 – Função de Valor para o Índice de Mérito Peso**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Peso inferior ao sistema elétrico em 14V CC	1,33
N <sub>4</sub>	Peso equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Peso superior até 50% do sistema elétrico em 14V CC	0,66
N <sub>2</sub>	Peso superior até 100% do sistema elétrico em 14V CC	0,33
N <sub>1</sub>	Peso superior a 100% do sistema elétrico em 14V CC	0

**Tab. 4.20 – Função de Valor para o Índice de Mérito Complexidade da Arquitetura**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Requer pouca quantidade de recursos com tecnologia atual	0,66
N <sub>2</sub>	Requer grande quantidade de recursos com tecnologia atual	0,33
N <sub>1</sub>	Requer grande quantidade de recursos e nova tecnologia	0

**Tab. 4.21 – Função de Valor para o Índice de Mérito Adequação à Evolução****Tecnológica**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Possui sinergia com tecnologias emergentes	1,00
N <sub>3</sub>	Possui sinergia com pequena adaptação	0,66
N <sub>2</sub>	Possui sinergia com grande adaptação	0,33
N <sub>1</sub>	Não possui sinergia com tecnologias emergentes	0

**Tab. 4.22 – Função de Valor para o Índice de Mérito Requisitos de CEM**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Nível de IEM equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Atende aos requisitos com adição de dispositivos supressores	0,66
N <sub>2</sub>	Atende parcialmente aos requisitos de CEM	0,33
N <sub>1</sub>	Nível de IEM incompatível com os requisitos de CEM	0

**Tab. 4.23 – Função de Valor para o Índice de Mérito Redução na Emissão de****Poluentes**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Emissões inferiores a 80% do sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Emissões inferiores até 80% do sistema elétrico em 14V CC	0,66
N <sub>2</sub>	Emissões equivalentes ao sistema elétrico em 14V CC	0,33
N <sub>1</sub>	Emissões superiores ao sistema elétrico em 14V CC	0

**Tab. 4.24 – Função de Valor para o Índice de Mérito Estoque**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Requer menor quantidade de peças em estoque	1,33
N <sub>4</sub>	Equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Proliferação de componentes, sendo muitos de uso comum entre o sistema elétrico em 14V CC e o proposto	0,66
N <sub>2</sub>	Proliferação de componentes, sendo poucos de uso comum entre o sistema elétrico em 14V CC e o proposto	0,33
N <sub>1</sub>	Proliferação de componentes, sendo todos de uso específico na arquitetura proposta	0

**Tab. 4.25 – Função de Valor para o Índice de Mérito Reposição**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Arquitetura possui poucos componentes, muitos deles comunizados	1,00
N <sub>3</sub>	Arquitetura possui poucos componentes, poucos comunizados	0,66
N <sub>2</sub>	Arquitetura possui muitos componentes, poucos comunizados	0,33
N <sub>1</sub>	Arquitetura possui componentes exclusivos	0

**Tab. 4.26 – Função de Valor para o Índice de Mérito Novos Equipamentos**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Não requer o uso de novos equipamentos	1,00
N <sub>3</sub>	Requer o uso de novos dispositivos de controle	0,66
N <sub>2</sub>	Requer o uso de novos equipamentos de custo elevado	0,33
N <sub>1</sub>	Requer o uso de novos equipamentos e mão-de-obra especializada	0

**Tab. 4.27 – Função de Valor para o Índice de Mérito Tempo Padrão**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Inferior ao do sistema elétrico em 14V CC	1,33
N <sub>4</sub>	Equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Superior até 25% ao sistema elétrico em 14V CC	0,66
N <sub>2</sub>	Superior até 50% ao sistema elétrico em 14V CC	0,33
N <sub>1</sub>	Superior a 100% do sistema elétrico em 14V CC	0

**Tab. 4.28 – Função de Valor para o Índice de Mérito Recursos**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>5</sub>	Requer menor quantidade de recursos para fabricação	1,33
N <sub>4</sub>	Equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Requer mais postos de inspeção de montagem	0,66
N <sub>2</sub>	Requer maior qualidade da mão-de-obra direta	0,33
N <sub>1</sub>	Requer maior quantidade de mão-de-obra direta	0

**Tab. 4.29 – Função de Valor para o Índice de Mérito Choques Elétricos**

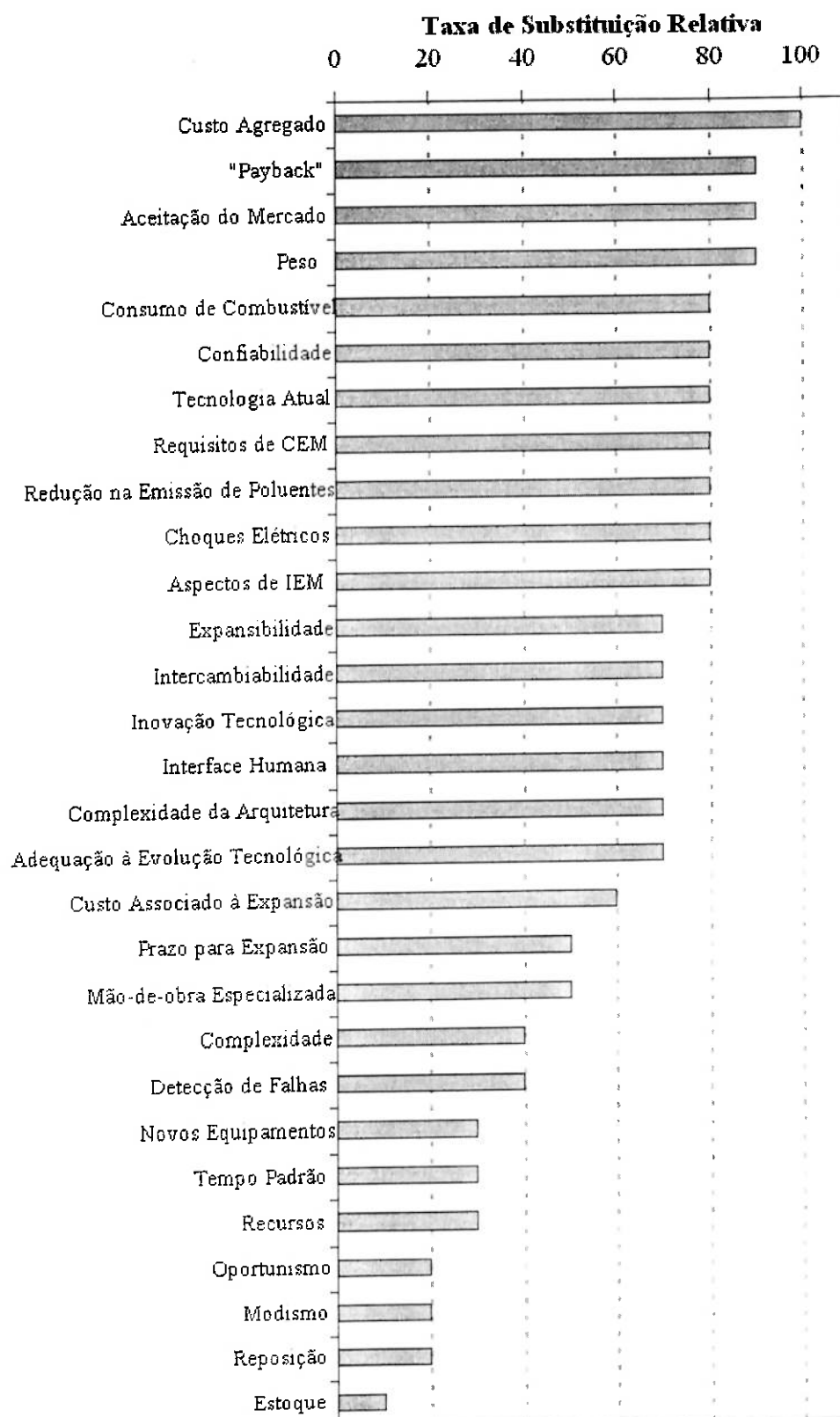
Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Não requer dispositivos de proteção contra choques elétricos	1,00
N <sub>3</sub>	Requer dispositivos de proteção apenas nos circuitos de tensão elevada mais expostos	0,66
N <sub>2</sub>	Requer dispositivos de proteção em grande parte dos circuitos	0,33
N <sub>1</sub>	Requer dispositivos de proteção em todos os circuitos	0

**Tab. 4.30 – Função de Valor para o Índice de Mérito Aspectos de IEM**

Nível de Impacto	Descritor	Função de Valor ( $v_i$ )
N <sub>4</sub>	Equivalente ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
N <sub>3</sub>	Pode apresentar falha de reduzida severidade em frequências específicas	0,66
N <sub>2</sub>	Pode apresentar falha de elevada severidade em frequências específicas	0,33
N <sub>1</sub>	Os dispositivos de controle ou supressores aplicados não eliminam as falhas causadas por IEM	0

#### 4.3.2 Definição das Taxas de Substituição para os Índices de Mérito

As taxas de substituição para cada índice de mérito do modelo foram obtidas através do método “swing weights”, com base na experiência profissional de membros da indústria automobilística, resultando nos valores ilustrados pela Fig. 4.12 e pela Tab. 4.31. Observa-se que, este resultado expressa a opinião de um determinado universo de pessoas que fazem parte da indústria automobilística, incluindo todas as incertezas que são inerentes ao processo de determinação das taxas de substituição. Ao se considerar um universo diferente de pessoas da indústria automobilística, as taxas de substituição relativas estarão sujeitas a variações, que podem resultar em uma eventual variação dos resultados obtidos através do modelo proposto. Por esta razão, Shimizu propõe, que as taxas de substituição obtidas desta forma, sejam consideradas como um dos possíveis cenários para a realização do estudo proposto [147].



**Fig. 4.12** – Taxa de substituição relativa para os índices de mérito

**Tab. 4.31 – Taxas de Substituição para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição	
	Relativa	Normalizada ( $w_i$ )
Custo Agregado	100	0,057
“Payback”	90	0,051
Aceitação do Mercado	90	0,051
Peso	90	0,051
Consumo de Combustível	80	0,046
Confiabilidade	80	0,046
Tecnologia atual	80	0,046
Requisitos de CEM	80	0,046
Redução na Emissão de Poluentes	80	0,046
Choques Elétricos	80	0,046
Aspectos de IEM	80	0,046
Expansibilidade	70	0,040
Intercambiabilidade	70	0,040
Inovação Tecnológica	70	0,040
Interface Humana	70	0,040
Complexidade da Arquitetura	70	0,040
Adequação à Evolução Tecnológica	70	0,040
Custo Associado à Expansão	60	0,034
Prazo para Expansão	50	0,029
Mão-de-obra Especializada	50	0,029
Complexidade	40	0,023
Detecção de Falhas	40	0,023



Índice de Mérito	Taxa de Substituição	
	Relativa	Normalizada ( $w_i$ )
Novos Equipamentos	30	0,017
Tempo Padrão	30	0,017
Recursos	30	0,017
Oportunismo	20	0,011
Modismo	20	0,011
Reposição	20	0,011
Estoque	10	0,006
Total	1750	1,00

#### 4.3.3 Avaliação das Arquiteturas Elétricas para o Sistema Elétrico Automotivo

Uma vez obtidas as funções de valor e as taxas de substituição normalizadas para cada índice de mérito, torna-se necessário avaliar, localmente, as diversas arquiteturas elétricas em estudo para que seja possível a aplicação da fórmula da agregação aditiva, ilustrada pela equação 3.2, com o objetivo de obter seu desempenho global.

A Tab. 4.32 relaciona as taxas de substituição de cada índice de mérito com o desempenho local de cada uma das arquiteturas elétricas selecionadas para o estudo. Esta tabela mostra, também, o desempenho global das diversas arquiteturas elétricas, obtido através da aplicação da equação 3.2.

A Fig. 4.13, por outro lado, ilustra, de forma gráfica, o resultado da aplicação da fórmula da agregação aditiva, permitindo uma comparação direta do desempenho global de cada uma das arquiteturas em estudo.

Tab 4.32 – Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas para o Sistema Elétrico Autônomo

Índice de Mérito	Taxa de Arquitetura Arquitetura Arquitetura Arquitetura Arquitetura Arquitetura Arquitetura Arquitetura Arquitetura Arquitetura										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Substituição Normalizada (w)	(w)	(w)	(w)	(w)	(w)	(w)	(w)	(w)	(w)	(w)	(w)
Custo Agregado	0,150	0,300	0,500	0,400	0,600	0,500	0,700	0,200	0,330	0,330	1,000
Consumo de Componentes	0,300	0,300	0,400	0,400	1,000	1,000	1,000	0,900	1,330	1,000	0,330
"Payback"	0,100	0,200	0,400	0,300	0,550	0,450	0,600	0,350	0,330	0,350	0,660
Expandibilidade	1,330	1,000	0,700	1,000	1,330	1,330	1,330	0,660	0,660	1,330	0,660
Prazo para Expansão	1,100	0,500	1,000	1,000	1,330	1,330	1,330	0,900	1,000	1,330	0,660
Custo Associado à Expansão	1,200	0,660	1,000	1,000	1,300	1,300	1,300	0,330	1,000	1,300	0,660
Opportunismo	0,600	0,600	0,400	1,000	0,600	0,600	0,600	0,200	1,000	0,660	1,330
Mobismo	0,330	0,400	0,500	0,500	0,750	0,600	0,750	0,400	1,000	0,660	1,330
Confiabilidade	1,000	0,500	0,330	1,000	0,660	0,800	0,600	0,000	0,660	0,600	1,330
Completividade	0,330	0,300	0,660	0,900	0,300	0,660	0,800	0,100	0,660	0,850	1,330
Deteção de Falhas	0,330	0,000	0,660	0,800	0,660	0,500	0,700	0,000	0,000	0,330	1,000
Interconvertibilidade	0,400	0,600	0,600	0,500	0,500	0,500	0,500	0,200	1,000	0,330	1,330
Modularidade Estruturada	0,660	0,300	1,000	0,300	0,660	0,500	0,660	0,100	0,330	0,500	1,000
Tecnologia Geral	1,000	0,300	1,000	1,330	1,000	0,900	1,000	0,700	1,330	0,800	1,330
Inovação Tecnológica	0,660	0,500	0,660	0,900	1,000	1,000	1,000	0,500	1,000	0,900	1,000
Adaptação do Mercado	0,700	0,660	0,900	1,000	0,900	0,800	0,900	0,500	0,700	0,700	1,000
Adaptação da Indústria	0,660	0,500	0,660	0,700	1,000	0,700	0,900	0,500	1,000	1,000	0,660
Interface Humana	0,000	0,200	0,800	0,700	1,000	0,900	1,200	0,800	0,660	0,660	1,000
Peso	0,300	0,330	0,300	0,300	0,330	0,300	0,300	0,100	0,250	0,500	1,000
Completividade da Arquitetura	0,300	0,000	0,660	1,000	0,700	0,600	0,700	0,250	0,500	1,000	1,000
Adequação à Evolução Tecnológica	0,660	0,600	0,700	0,700	0,700	0,600	0,700	0,400	1,000	1,000	0,200
Frequências de CEM	0,300	0,300	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000	0,500	1,000	1,000	1,000
Redução na Emissão de Poluentes	0,400	0,200	0,300	0,660	0,660	0,600	0,700	0,330	0,500	0,500	1,000
Estrutura	0,350	0,330	0,300	0,660	0,600	0,500	0,660	0,330	0,500	0,500	1,000
Equipação	0,200	0,000	0,500	0,660	0,500	0,400	0,660	0,000	0,500	0,500	1,000
Novos Equipamentos	0,300	0,200	0,700	0,660	0,500	0,400	0,660	0,000	0,500	0,660	1,000
Tempo de Vida	0,500	0,200	0,500	0,660	0,660	0,500	0,660	0,330	0,700	1,330	1,000
Frequência	0,300	0,200	0,500	0,660	0,660	0,500	0,660	0,330	0,500	0,500	1,000
Custos Elétricos	0,300	0,200	0,500	0,660	0,660	0,500	0,660	0,330	0,500	0,500	1,000
Respostas de IFM	0,300	0,200	0,500	0,660	0,660	0,500	0,660	0,330	0,500	0,500	1,000
Votar	0,500	0,400	0,600	0,900	0,900	0,800	0,900	0,501	0,700	0,828	0,879

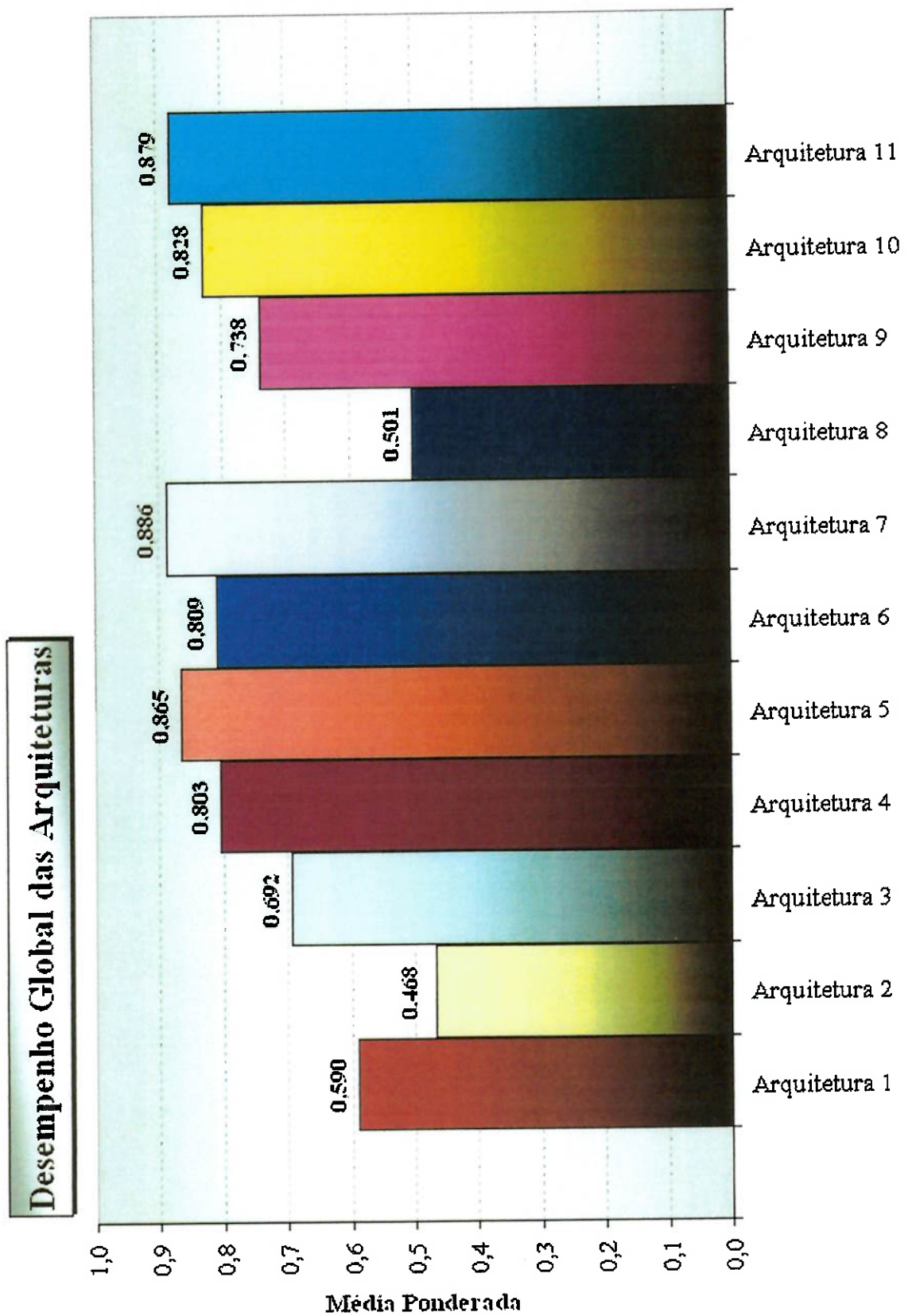


Fig. 4.13 – Desempenho global das arquiteturas elétricas para o sistema elétrico

As Fig. 4.14 e 4.15 ilustram o “*perfil de impacto*” para cada arquitetura elétrica em estudo, considerando os índices de mérito de forma isolada e agrupada, respectivamente.

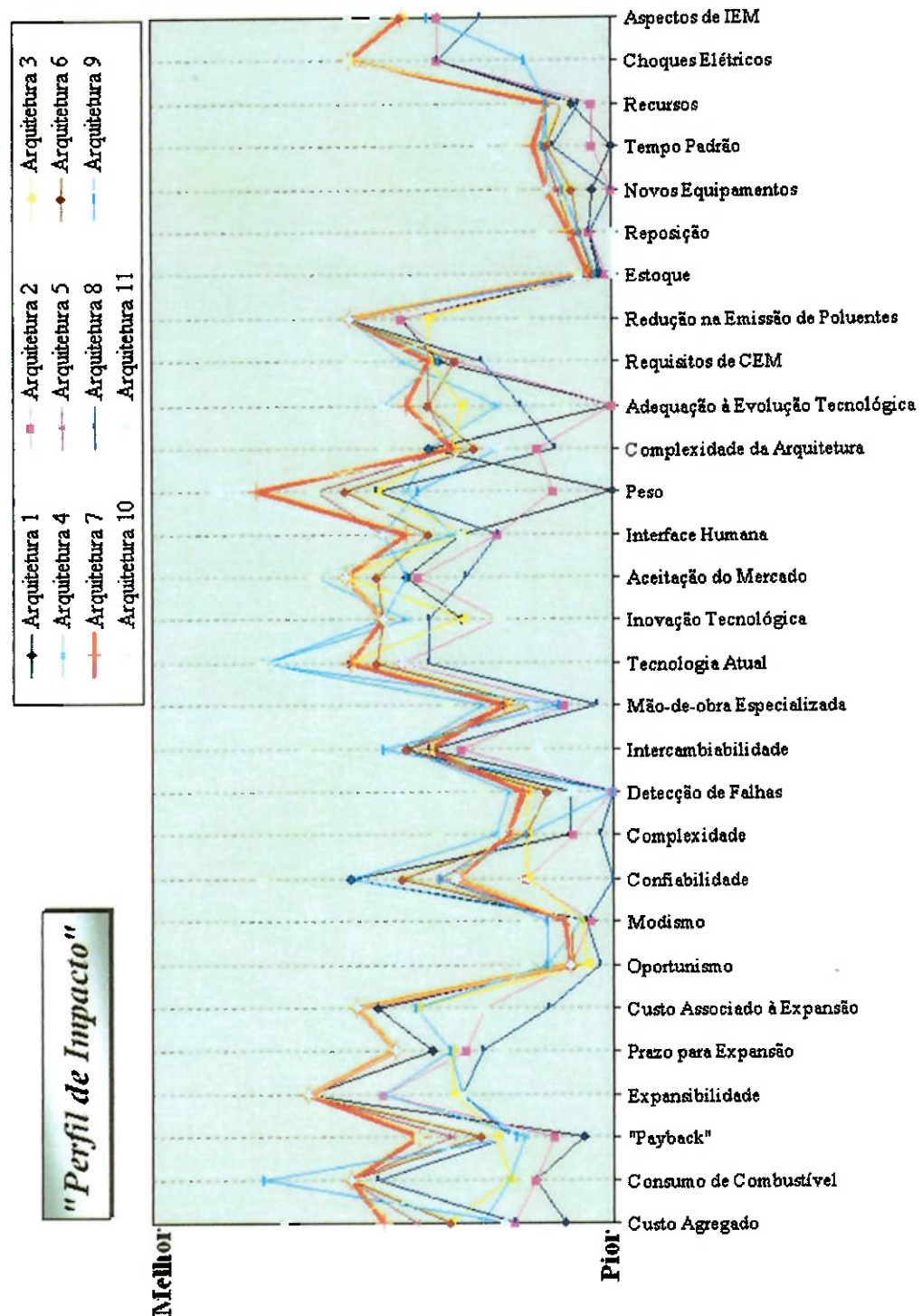


Fig. 4.14 – “*Perfil de impacto*” para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico

O “*perfil de impacto*” representado pela Fig. 4.15 também é obtido através dos dados da Tab. 4.32, sendo que, os índices de mérito, neste caso, são agrupados em áreas de interesse, de acordo com a divisão proposta pela Tab. 3.1. O “*perfil de impacto*” agrupado é obtido somando-se o produto entre o desempenho local de cada arquitetura em cada índice de mérito do agrupamento e sua correspondente taxa de substituição. A Tab. 4.33 mostra o resultados destes cálculos.

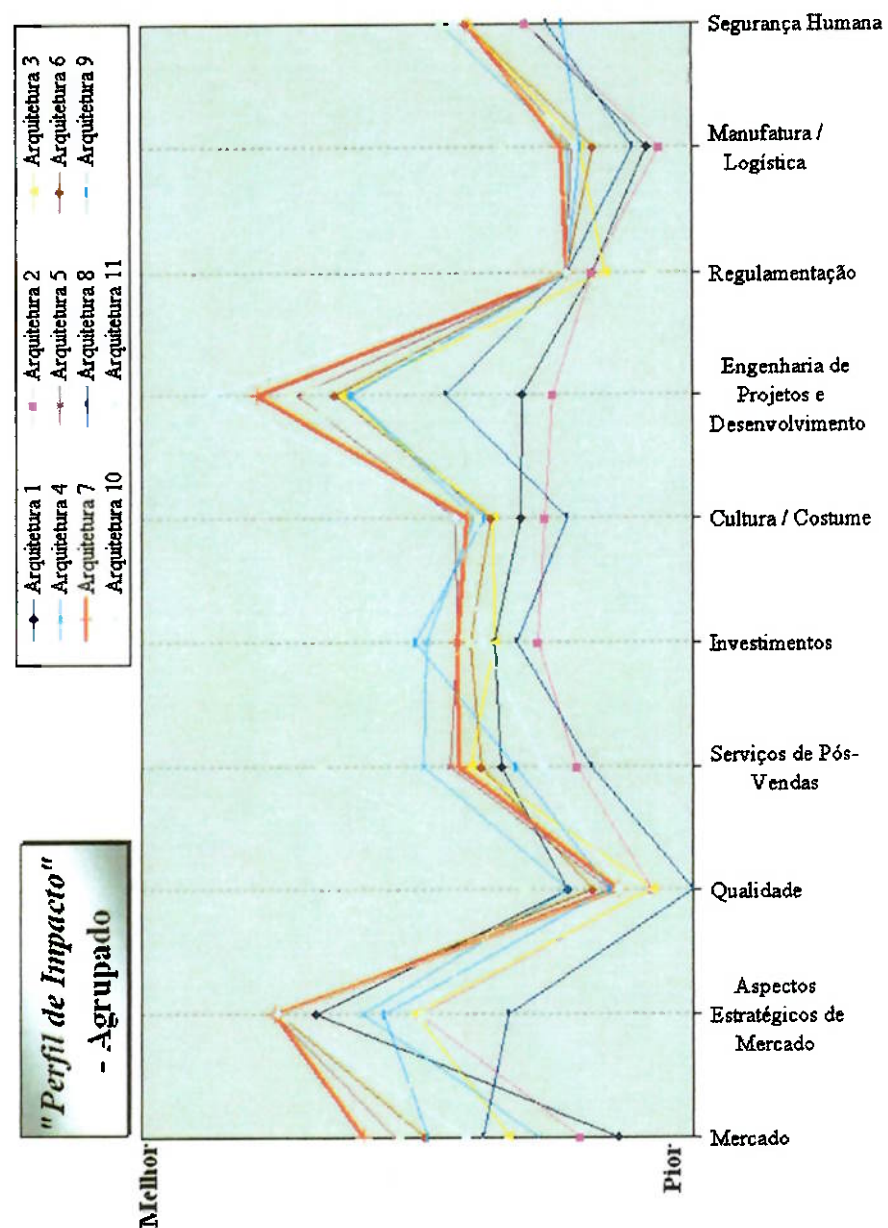


Fig. 4.15 – “*Perfil de impacto*” agrupado para a avaliação de arquiteturas para o sistema

O “*perfil de impacto*” representado pela Fig. 4.15 também é obtido através dos dados da Tab. 4.32, sendo que, os índices de mérito, neste caso, são agrupados em áreas de interesse, de acordo com a divisão proposta pela Tab. 3.1. O “*perfil de impacto*” agrupado é obtido somando-se o produto entre o desempenho local de cada arquitetura em cada índice de mérito do agrupamento e sua correspondente taxa de substituição. A Tab. 4.33 mostra o resultados destes cálculos.

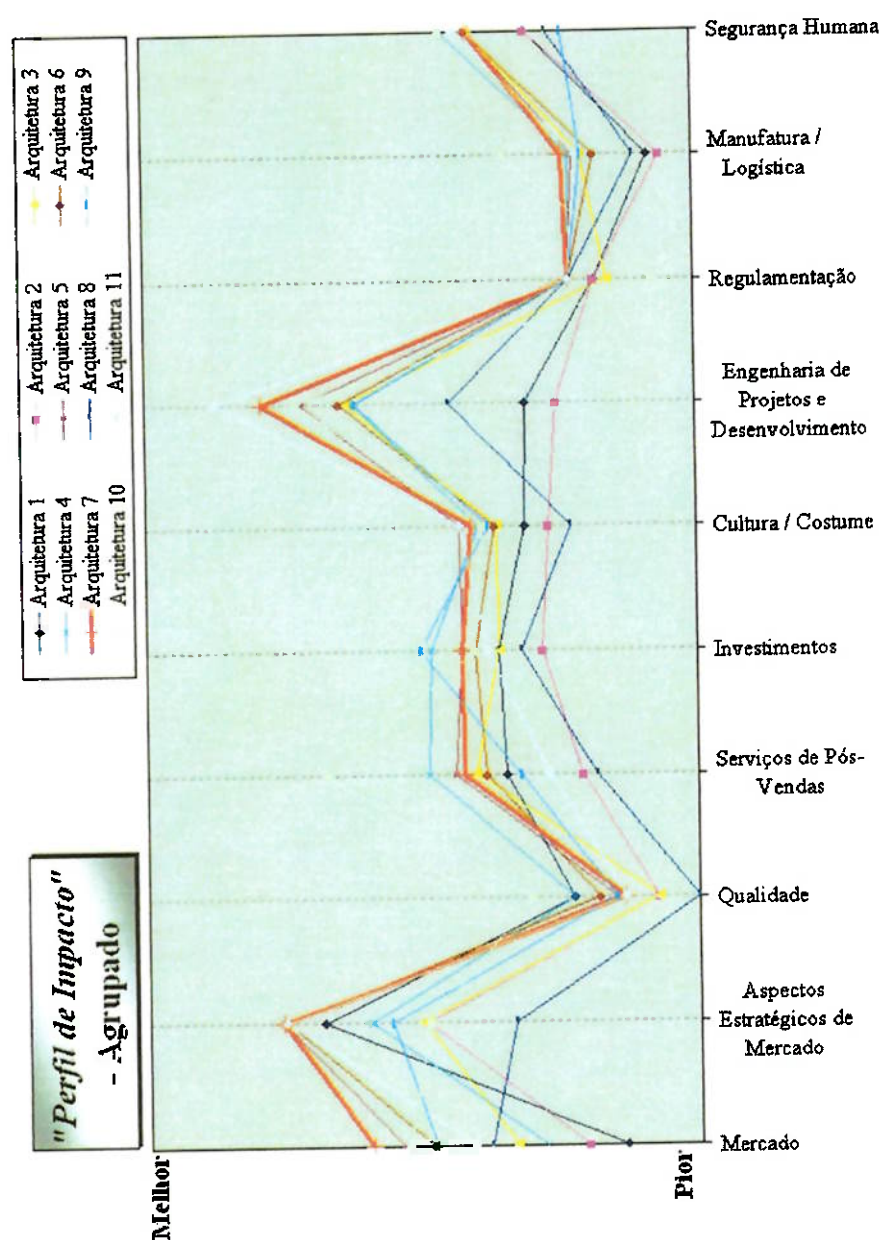


Fig. 4.15 – “*Perfil de impacto*” agrupado para a avaliação de arquiteturas para o sistema

Tab. 4.33 -- "Perfil de Impacto" das Arquiteturas nos Índices de Mérito Agrupados

Índice de Mérito	Arquitetura										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$(w_1 * v_1)$	$(w_1 * v_2)$	$(w_1 * v_3)$	$(w_1 * v_4)$	$(w_1 * v_5)$	$(w_1 * v_6)$	$(w_1 * v_7)$	$(w_1 * v_8)$	$(w_1 * v_9)$	$(w_1 * v_{10})$	$(w_1 * v_{11})$
Mercado	0,027	0,041	0,067	0,057	0,108	0,097	0,120	0,076	0,097	0,083	0,106
Aspectos Estratégicos de Mercado	0,137	0,100	0,101	0,120	0,152	0,150	0,152	0,067	0,112	0,151	0,098
Qualidade	0,046	0,015	0,015	0,046	0,030	0,037	0,027	0,000	0,030	0,027	0,061
Serviços de Pós-Vendas	0,070	0,042	0,081	0,098	0,088	0,077	0,085	0,037	0,065	0,054	0,135
Investimentos	0,072	0,057	0,072	0,097	0,086	0,081	0,086	0,064	0,101	0,077	0,081
Cultura / Costume	0,062	0,054	0,073	0,079	0,086	0,073	0,082	0,046	0,076	0,086	0,078
Engenharia de Projetos e Desenvolvimento	0,062	0,051	0,128	0,125	0,143	0,130	0,158	0,090	0,124	0,174	0,145
Regulamentação	0,037	0,037	0,032	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,015
Manufatura / Logística	0,016	0,012	0,041	0,045	0,043	0,036	0,048	0,022	0,040	0,043	0,069
Segurança Humana	0,060	0,060	0,082	0,091	0,082	0,082	0,082	0,053	0,047	0,087	0,091
V(a)	0,466	0,386	0,670	0,725	0,793	0,734	0,855	0,545	0,681	0,841	0,718

#### 4.3.4 Análise de Custo *versus* Benefício

A análise de custo *versus* benefícios tem início a partir do estabelecimento de dois agrupamentos de índices de mérito formados pela afinidade de cada índice de mérito com os parâmetros custo e benefício. A Tab. 4.33 mostra o resultado deste processo.

**Tab. 4.34 – Agrupamento de Custo e Benefício para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo**

Agrupamento de Custo		Agrupamento de Benefício	
Índice de Mérito	Taxa de Substituição	Índice de Mérito	Taxa de Substituição
Custo Agregado	0,057	“Payback”	0,051
Consumo de Combustível	0,046	Modismo	0,011
Expansibilidade	0,040	Confiabilidade	0,046
Prazo para Expansão	0,029	Intercambiabilidade	0,040
Custo Associado à Expansão	0,034	Inovação Tecnológica	0,040
Oportunismo	0,011	Interface Humana	0,040
Complexidade	0,023		
Detecção de Falhas	0,023		
Mão-de-obra Especializada	0,029		
Tecnologia Atual	0,046		
Aceitação do Mercado	0,051		
Peso	0,051		
Complexidade da Arquitetura	0,040		



Agrupamento de Custo		Agrupamento de Benefício	
Índice de Mérito	Taxa de Substituição	Índice de Mérito	Taxa de Substituição
Adequação à Evolução Tecnológica	0,040		
Requisitos de CEM	0,046		
Redução na Emissão de Poluentes	0,046		
Estoque	0,006		
Reposição	0,011		
Novos Equipamentos	0,017		
Tempo Padrão	0,017		
Recursos	0,017		
Choques Elétricos	0,046		
Aspectos de IEM	0,046		
Total	0,771		0,229

Em seguida, o desempenho local agrupado de cada arquitetura nos índices de mérito que refletem custos e benefícios é obtido através da aplicação da equação 3.3. O resultado destes cálculos está mostrado na tabela abaixo.

**Tab. 4.35 – Análise de Custo *versus* Benefício para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo**

	Agrupamento de Custo		Agrupamento de Benefício	
	Desempenho local original	Desempenho local agrupado	Desempenho local original	Desempenho local agrupado
Arquitetura 1	0.447	0,579	0,143	0.628

	Agrupamento de Custo		Agrupamento de Benefício	
	Desempenho local original	Desempenho local agrupado	Desempenho local original	Desempenho local agrupado
Arquitetura 2	0,372	0,483	0,096	0,418
Arquitetura 3	0,566	0,734	0,126	0,552
Arquitetura 4	0,636	0,825	0,167	0,730
Arquitetura 5	0,682	0,885	0,183	0,801
Arquitetura 6	0,634	0,821	0,175	0,767
Arquitetura 7	0,708	0,917	0,178	0,779
Arquitetura 8	0,394	0,511	0,107	0,466
Arquitetura 9	0,559	0,725	0,179	0,781
Arquitetura 10	0,681	0,883	0,146	0,640
Arquitetura 11	0,670	0,868	0,210	0,917

A Fig. 4.16 ilustra, de forma gráfica, o resultado da análise de custo *versus* benefício.

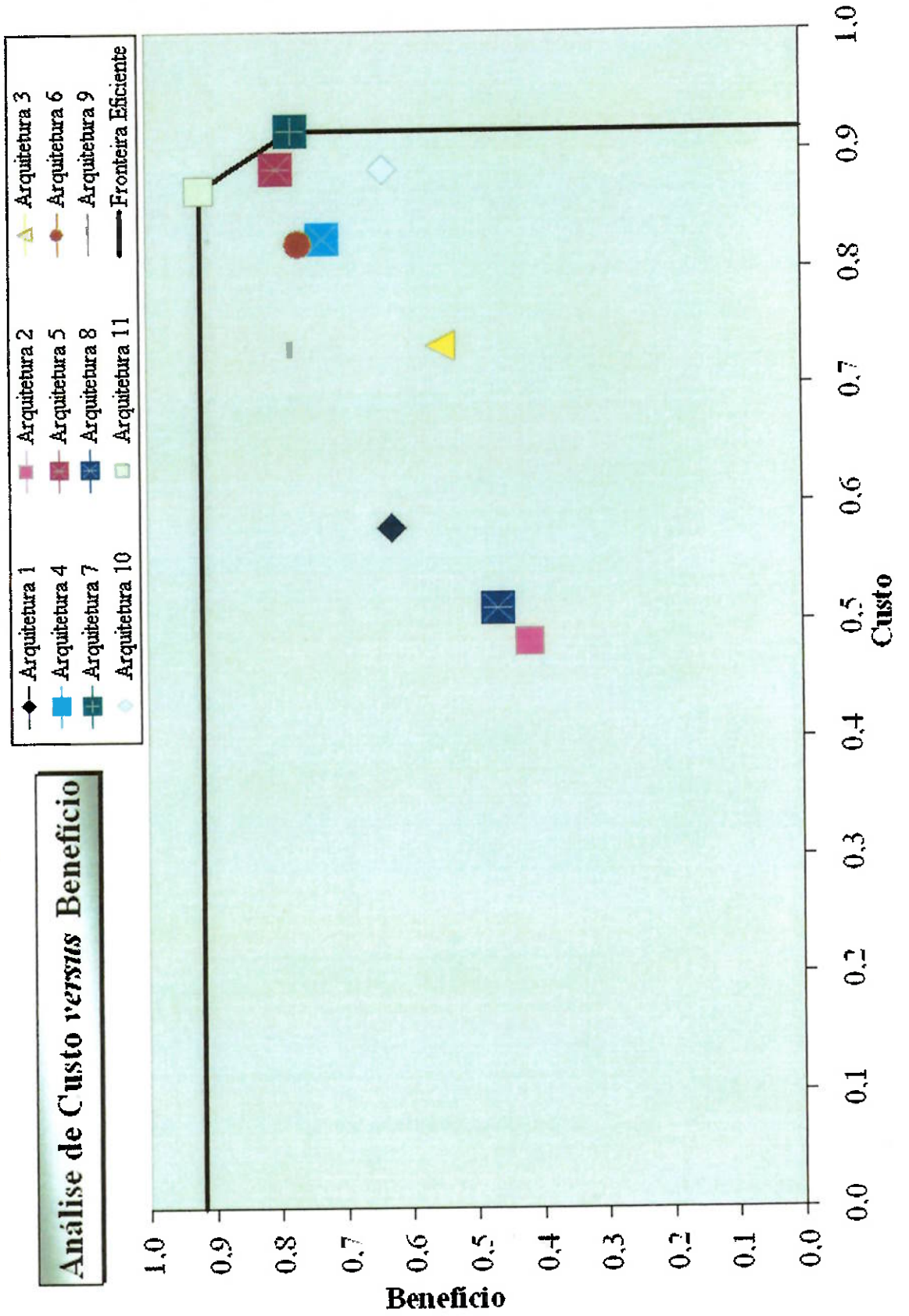


Fig. 4.16 – Análise de custo *versus* benefício para a avaliação de arquiteturas para o

### 4.3.5 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade do modelo construído tem como objetivo avaliar a variação do seu resultado perante uma variação de  $\pm 10\%$  no valor da taxa de substituição de seu índice de mérito mais significativo. Os resultados desta análise, executada através dos métodos numérico e gráfico, são mostrados a seguir.

#### 4.3.5.1 Método Numérico

O índice de mérito custo agregado é definido como o mais significativo, com base no resultado da aplicação do método “swing weights”, ilustrado pela Fig. 4.12. Assim, a taxa de substituição deste índice de mérito terá seu valor modificado em  $\pm 10\%$ , impactando no cálculo das novas taxas de substituição para os demais índices de mérito, com base na utilização da equação 3.4. A Tab. 4.36 mostra os resultados destes cálculos.

**Tab. 4.36 – Variação das Taxas de Substituição para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição		
	Original	+ 10 %	- 10 %
Custo Agregado	0,057	0,063	0,051
Consumo de Combustível	0,046	0,045	0,046
“Payback”	0,051	0,051	0,052
Expansibilidade	0,040	0,040	0,040
Prazo para Expansão	0,029	0,028	0,029
Custo Associado à Expansão	0,034	0,034	0,034
Oportunismo	0,011	0,011	0,011

Índice de Mérito	Taxa de Substituição		
	Original	+ 10 %	- 10 %
Modismo	0,011	0,011	0,011
Confiabilidade	0,046	0,045	0,046
Complexidade	0,023	0,023	0,023
Detecção de Falhas	0,023	0,023	0,023
Intercambiabilidade	0,040	0,040	0,040
Mão-de-obra Especializada	0,029	0,028	0,029
Tecnologia Atual	0,046	0,045	0,046
Inovação Tecnológica	0,040	0,040	0,040
Aceitação do Mercado	0,051	0,051	0,052
Interface Humana	0,040	0,040	0,040
Peso	0,051	0,051	0,052
Complexidade da Arquitetura	0,040	0,040	0,040
Adequação à Evolução Tecnológica	0,040	0,040	0,040
Requisitos de CEM	0,046	0,045	0,046
Redução na Emissão de Poluentes	0,046	0,045	0,046
Estoque	0,006	0,006	0,006
Reposição	0,011	0,011	0,011
Novos Equipamentos	0,017	0,017	0,017
Tempo Padrão	0,017	0,017	0,017
Recursos	0,017	0,017	0,017
Choques Elétricos	0,046	0,045	0,046
Aspectos de IEM	0,046	0,045	0,046
Total	1,00	1,00	1,00

A Tab. 4.37 e a Tab. 4.38 mostram os novos valores de desempenho global das arquiteturas, quando as taxas de substituição do índice de mérito custo agregado apresentam uma variação de +10% e -10%, respectivamente.

**Tab 4.3 - Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas com Variação de +10% na Taxa de Substituição Custo Agregado**

Índice de Mérito	Taxa de Substituição Normalizada (w)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Custo Agregado	0,063	0,300	0,500	0,400	0,600	0,500	0,700	0,300	0,330	0,330	0,330	1,000
Consumo de Combustível	0,045	0,300	0,400	0,400	1,000	1,000	1,000	0,900	1,330	1,000	1,000	0,330
Payback*	0,051	0,100	0,200	0,300	0,350	0,450	0,660	0,350	0,330	0,330	0,330	0,660
Expandibilidade	0,040	1,330	1,000	1,000	1,330	1,330	1,330	0,660	0,660	0,660	1,330	0,660
Prazo para Expansão	0,028	1,100	1,000	1,000	1,300	1,300	1,300	0,330	1,000	1,000	1,300	0,660
Custo Associado à Expansão	0,034	1,200	0,660	1,000	1,300	1,300	1,300	0,200	1,000	1,000	0,660	1,330
Oportunismo	0,011	0,660	0,660	0,400	0,660	0,600	0,660	0,400	1,000	1,000	0,660	1,330
Modismo	0,011	0,330	0,330	0,500	0,750	0,660	0,750	0,400	1,000	1,000	0,660	1,330
Confabilidade	0,045	1,000	0,330	1,000	0,660	0,800	0,600	0,000	0,660	0,660	0,600	1,330
Complexidade	0,023	0,330	0,300	0,900	0,800	0,660	0,500	0,100	0,660	0,660	0,850	1,330
Deteção de Falhas	0,023	0,330	0,000	0,800	0,660	0,500	0,700	0,000	0,000	0,000	0,330	1,000
Intercomutabilidade	0,040	0,900	0,660	0,900	0,900	0,900	0,800	0,800	1,000	1,000	0,330	1,330
Mão-de-obra Especializada	0,028	0,660	0,300	0,660	0,660	0,500	0,660	0,100	0,660	0,330	0,500	1,000
Mão-de-obra Especializada	0,045	1,000	1,000	1,330	1,000	0,900	1,000	0,700	1,330	0,800	1,330	1,330
Tecnologia Atual	0,040	0,660	0,500	0,900	1,000	1,000	1,000	0,800	1,000	1,000	1,000	0,500
Inovação Tecnológica	0,051	0,700	0,660	0,900	0,900	0,800	0,900	0,500	0,700	0,700	0,900	1,000
Adaptação do Mercado	0,040	0,660	0,500	0,660	1,000	0,800	0,900	0,500	1,000	1,000	1,000	0,660
Interface Humana	0,040	0,660	0,500	0,700	1,000	0,800	0,900	0,500	0,700	0,500	0,900	1,000
Peso	0,040	0,660	0,500	0,700	1,000	0,800	0,900	0,500	0,700	0,500	0,900	1,000
Completude da Arquitetura	0,040	0,300	0,330	0,700	0,700	0,600	0,700	0,250	0,400	0,500	0,500	1,000
Adaptação à Evolução Tecnológica	0,040	0,000	0,000	0,500	0,800	0,800	0,900	0,400	1,000	1,000	1,000	0,200
Frequência de CEM	0,045	0,660	0,600	0,700	0,700	0,600	0,700	0,500	0,660	0,660	1,000	1,000
Redução na Emissão de Poluentes	0,045	0,800	0,800	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,330
Estrutura	0,006	0,400	0,200	0,660	0,660	0,600	0,700	0,330	0,500	0,500	0,000	1,000
Reposicionamento	0,011	0,330	0,330	0,700	0,600	0,500	0,660	0,330	0,500	0,500	0,000	1,000
Novos Equipamentos	0,017	0,200	0,000	0,500	0,550	0,400	0,660	0,000	0,500	0,500	0,660	1,000
Tempo Padrão	0,017	0,000	0,200	0,660	0,700	0,660	0,800	0,000	0,700	0,700	0,330	1,000
Ferimentos	0,017	0,400	0,200	0,500	0,660	0,500	0,660	0,330	0,660	0,660	0,500	1,000
Cheque Elétrico	0,045	0,660	0,660	1,000	1,000	1,000	1,000	0,660	0,660	0,660	1,000	1,000
Atividades de IFM	0,045	0,660	0,360	0,800	0,800	0,800	0,800	0,500	0,700	0,700	0,900	1,000
V(m)	0,587	0,467	0,691	0,801	0,864	0,807	0,885	0,500	0,735	0,825	0,880	0,880

Tab 4.38 - Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas com Variação de -10% na Taxa de Substituição Custo Agregado

Índice de Mérito	Taxa de Substituição											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	(w <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )
	(w <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )	(v <sub>i</sub> )
Custo Agregado	0,057	0,300	0,500	0,400	0,600	0,500	0,700	0,300	0,330	0,330	0,330	1,000
Consumo de Combustível	0,046	0,300	0,400	0,400	1,000	1,000	1,000	0,900	1,330	1,330	1,000	0,330
"Payback"	0,051	0,100	0,400	0,300	0,550	0,450	0,660	0,350	0,330	0,330	0,350	0,660
Expansibilidade	0,040	1,330	1,000	1,000	1,330	1,330	1,330	0,660	0,660	1,330	1,330	0,660
Prazo para Expansão	0,029	1,100	0,900	1,000	1,330	1,330	1,330	0,800	1,000	1,330	1,330	0,660
Custo Associado à Expansão	0,034	1,200	0,660	1,000	1,300	1,300	1,300	0,330	1,000	1,000	1,300	0,660
Oportunismo	0,011	0,660	0,660	1,000	0,660	0,600	0,660	0,200	1,000	1,000	0,660	1,330
Módulo	0,011	0,330	0,330	0,500	0,750	0,660	0,750	0,400	1,000	1,000	0,660	1,330
Confiabilidade	0,046	1,000	0,330	1,000	0,660	0,800	0,600	0,000	0,660	0,600	0,600	1,330
Complexidade	0,023	0,330	0,300	0,900	0,800	0,660	0,800	0,100	0,660	0,660	0,850	1,330
Deteção de Falhas	0,023	0,330	0,000	0,800	0,660	0,500	0,700	0,000	0,000	0,000	0,330	1,000
Intercambiabilidade	0,040	0,900	0,660	0,900	0,900	0,900	0,800	0,800	0,800	1,000	0,330	1,330
Mão-de-obra Especializada	0,029	0,660	0,300	0,300	0,660	0,500	0,660	0,100	0,330	0,330	0,500	1,000
Tecnologia Atual	0,046	1,000	0,800	1,330	1,000	0,900	1,000	0,700	1,000	1,000	0,800	1,330
Inovação Tecnológica	0,040	0,660	0,500	0,900	1,000	1,000	1,000	0,800	0,800	1,000	1,000	0,500
Aceitação do Mercado	0,051	0,700	0,660	1,000	0,900	0,800	0,900	0,500	0,500	0,700	1,000	1,000
Interface Humana	0,040	0,660	0,500	0,700	1,000	0,800	0,900	0,500	0,500	0,700	0,900	1,000
Peso	0,051	0,000	0,200	0,800	0,700	0,900	1,200	0,800	1,000	1,000	1,000	0,660
Completeness da Arquitetura	0,040	0,300	0,330	0,700	0,800	0,600	0,700	0,250	0,500	0,500	0,500	1,000
Adequação à Evolução Tecnológica	0,040	0,000	0,000	0,660	0,500	0,800	0,900	0,400	1,000	1,000	1,000	0,200
Requisitos de CEM	0,046	0,660	0,600	0,700	0,800	0,700	0,700	0,500	0,660	0,660	1,000	0,330
Redução na Emissão de Poluentes	0,046	0,800	0,800	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Estoque	0,006	0,400	0,200	0,660	0,660	0,600	0,700	0,330	0,330	0,500	0,000	1,000
Reposição	0,011	0,330	0,330	0,700	0,660	0,500	0,660	0,330	0,330	0,500	0,000	1,000
Novos Equipamentos	0,017	0,200	0,000	0,500	0,550	0,400	0,560	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000
Tempo Falha	0,017	0,000	0,200	0,700	0,660	0,660	0,800	0,600	0,700	0,700	1,330	1,000
Recursos	0,017	0,400	0,200	0,500	0,660	0,660	0,660	0,330	0,330	0,660	0,500	1,000
Chques Elétricos	0,046	0,660	0,660	1,000	1,000	1,000	1,000	0,660	0,660	0,330	1,000	1,000
Aspectos de IEM	0,046	0,660	0,660	1,000	1,000	1,000	1,000	0,500	0,500	0,700	0,900	1,000
V(a)	0,593	0,469	0,694	0,806	0,867	0,811	0,887	0,502	0,740	0,831	0,831	0,878

A Tab. 4.39, de forma numérica, e a Fig. 4.17, de forma gráfica, ilustram o resultado da análise de sensibilidade, quando executada através do método numérico, comparando os desempenhos globais das arquiteturas em avaliação, considerando-se as taxas de substituição originais e uma variação de  $\pm 10\%$  na taxa de substituição do índice de mérito custo agregado.

**Tab. 4.39 – Análise de Sensibilidade para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo – Método Numérico**

	V(a) (com taxa de substituição original)	Colocação da Arquitetura	V(a) (com + 10% de variação na taxa de substituição do índice de mérito custo agregado)	Colocação da Arquitetura	V(a) (com - 10% de variação na taxa de substituição do índice de mérito custo agregado)	Colocação da Arquitetura
Arquitetura 1	0,590	9	0,587	9	0,593	9
Arquitetura 2	0,468	11	0,467	11	0,469	11
Arquitetura 3	0,692	8	0,691	8	0,694	8
Arquitetura 4	0,803	6	0,801	6	0,806	6
Arquitetura 5	0,865	3	0,864	3	0,867	3
Arquitetura 6	0,809	5	0,807	5	0,811	5
Arquitetura 7	0,886	1	0,885	1	0,887	1
Arquitetura 8	0,501	10	0,500	10	0,502	10
Arquitetura 9	0,738	7	0,735	7	0,740	7
Arquitetura 10	0,828	4	0,825	4	0,831	4
Arquitetura 11	0,879	2	0,880	2	0,878	2



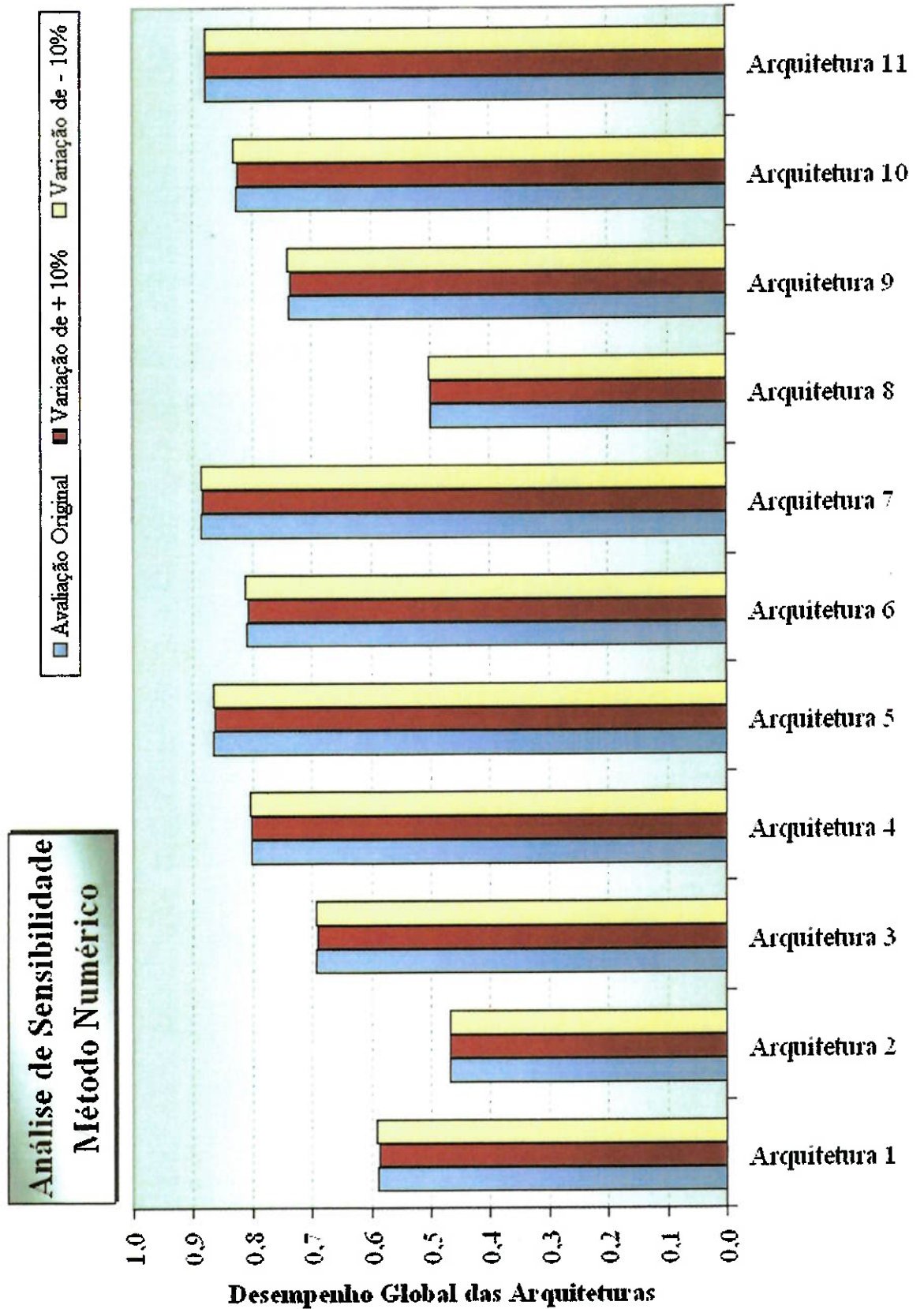


Fig. 4.17 – Análise de sensibilidade para a avaliação de arquiteturas para o sistema

### 4.3.5.2 Método Gráfico (Ensslin)

Seguindo-se o procedimento proposto por Ensslin para a execução da análise de sensibilidade através do método gráfico, descrito no capítulo destinado a metodologia, obtém-se a Tab. 4.40.

**Tab. 4.40 – Análise de Sensibilidade (Ensslin) para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo – Método Gráfico**

	V(a) (com taxa de substituição original)	V(a) (com taxa de substituição do índice custo agregado igual a um)
Arquitetura 1	0,590	0,150
Arquitetura 2	0,468	0,300
Arquitetura 3	0,692	0,500
Arquitetura 4	0,803	0,400
Arquitetura 5	0,865	0,600
Arquitetura 6	0,809	0,500
Arquitetura 7	0,886	0,700
Arquitetura 8	0,501	0,300
Arquitetura 9	0,738	0,330
Arquitetura 10	0,828	0,330
Arquitetura 11	0,879	1,00

A Fig. 4.18 ilustra o resultado da aplicação da análise de sensibilidade através do método gráfico, conforme o método proposto por Ensslin.

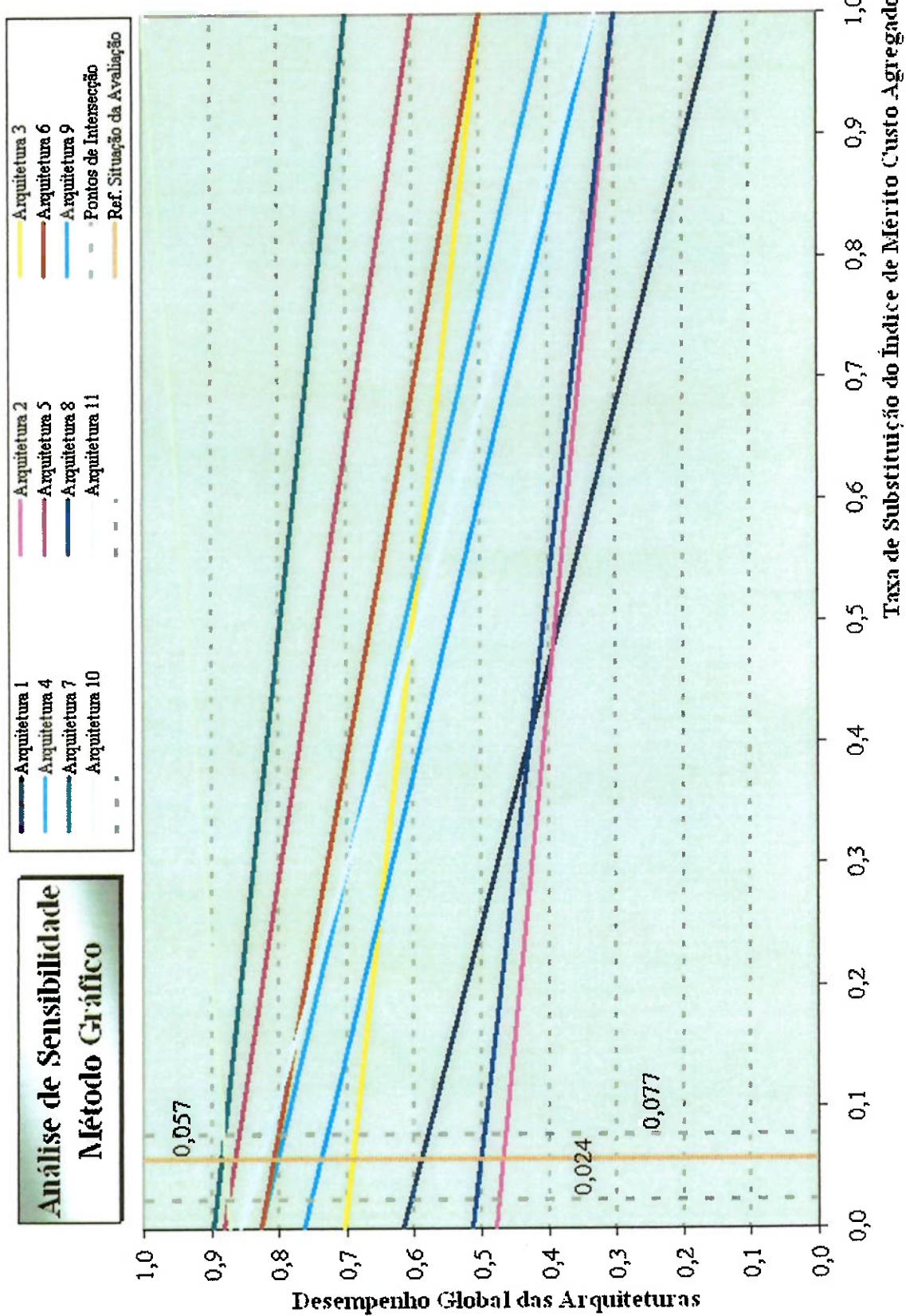


Fig. 4.18 – Análise de sensibilidade (Ensslin) para a avaliação de arquiteturas para o



Tab. 4.42 – Desempenho Global das Arquiteturas Elétricas com Taxa de Substituição do Índice de Merito Custo Agregado Igual a 0

Índice de Mérito	Taxa de Substituição Normalizada											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Custo Agregado	0,000	0,300	0,500	0,400	0,600	0,500	0,700	0,300	0,330	0,330	0,330	1,000
Consumo de Combustível	0,048	0,300	0,400	0,400	1,000	1,000	1,000	0,900	1,330	1,330	1,000	0,330
"Payback"	0,055	0,100	0,400	0,300	0,550	0,450	0,660	0,350	0,330	0,330	0,350	0,660
Expansibilidade	0,042	1,330	1,000	1,000	1,330	1,330	1,330	0,660	0,660	0,660	1,330	0,660
Prazo para Expansão	0,030	1,100	1,000	1,000	1,330	1,330	1,330	0,800	1,000	1,000	1,330	0,660
Custo Associado à Expansão	0,036	1,200	1,000	1,000	1,300	1,300	1,300	0,330	1,000	1,000	1,300	0,660
Ciprotinismo	0,012	0,660	0,400	1,000	0,660	0,600	0,660	0,200	1,000	1,000	0,660	1,330
Modismo	0,012	0,330	0,500	0,500	0,750	0,660	0,750	0,400	1,000	1,000	0,660	1,330
Confiabilidade	0,048	1,000	0,330	1,000	0,660	0,800	0,600	0,000	0,660	0,660	0,600	1,330
Complexidade	0,024	0,330	0,660	0,900	0,800	0,660	0,800	0,100	0,560	0,560	0,850	1,330
Deteção de Falhas	0,024	0,330	0,660	0,800	0,660	0,500	0,700	0,000	0,000	0,000	0,330	1,000
Intercambiabilidade	0,042	0,900	0,800	0,900	0,900	0,900	0,800	0,800	0,800	0,800	0,330	1,330
Mão-de-obra Especializada	0,030	0,660	0,300	0,800	0,660	0,500	0,800	0,100	1,000	1,000	0,330	1,330
Tecnologia Atual	0,048	1,000	1,000	1,330	1,000	0,900	1,000	0,700	1,330	1,330	0,500	1,000
Inovação Tecnológica	0,042	0,660	0,500	0,900	1,000	1,000	1,000	0,800	1,000	1,000	0,800	1,330
Adaptação do Mercado	0,055	0,700	0,660	1,000	0,900	0,800	0,900	0,500	0,700	0,700	0,900	1,000
Interface Humana	0,042	0,660	0,500	0,700	1,000	0,800	0,900	0,500	1,000	1,000	0,660	1,000
Peso	0,055	0,000	0,200	0,800	1,000	0,900	1,200	0,800	0,660	0,500	1,330	1,000
Complexidade da Arquitetura	0,042	0,800	0,700	0,800	0,700	0,600	0,700	0,250	0,500	0,500	0,500	1,000
Adequação à Evolução Tecnológica	0,042	0,000	0,660	0,500	0,800	0,800	0,900	0,400	1,000	1,000	1,000	0,200
Requisitos de CEM	0,048	0,660	0,700	0,800	0,700	0,800	0,700	0,500	0,660	0,660	1,000	1,000
Redução na Emissão de Poluentes	0,048	0,800	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,330
Estoque	0,006	0,400	0,200	0,660	0,660	0,600	0,700	0,330	0,500	0,500	0,000	1,000
Reposição	0,012	0,330	0,700	0,660	0,600	0,500	0,660	0,330	0,500	0,500	0,000	1,000
Novos Equipamentos	0,018	0,200	0,500	0,660	0,550	0,400	0,660	0,000	0,500	0,500	0,660	1,000
Tempo Padrão	0,018	0,900	0,700	0,660	0,700	0,660	0,800	0,600	0,700	0,700	1,330	1,000
Recursos	0,018	0,400	0,500	0,660	0,660	0,500	0,660	0,330	0,660	0,660	0,500	1,000
Chques Elétricos	0,048	0,660	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,660	0,330	0,330	1,000	1,000
Aspectos de IEM	0,048	0,660	0,800	1,000	0,800	0,800	0,800	0,500	0,700	0,700	0,900	1,000
Via)	0,617	0,478	0,704	0,828	0,861	0,828	0,897	0,513	0,762	0,762	0,858	0,872

A Tab. 4.40, de forma numérica, e a Fig. 4.19, de forma gráfica, ilustram o resultado da aplicação da análise de sensibilidade através do método gráfico, conforme o método proposto por Shimizu.

**Tab. 4.43 – Análise de Sensibilidade (Shimizu) para a Avaliação de Arquiteturas para o Sistema Elétrico Automotivo – Método Gráfico**

	V(a) (com taxa de substituição do índice de mérito custo agregado igual a um)	V(a) (com taxa de substituição do índice de mérito custo agregado igual a zero)
Arquitetura 1	0,150	0,617
Arquitetura 2	0,300	0,478
Arquitetura 3	0,500	0,704
Arquitetura 4	0,400	0,828
Arquitetura 5	0,600	0,881
Arquitetura 6	0,500	0,828
Arquitetura 7	0,700	0,897
Arquitetura 8	0,300	0,513
Arquitetura 9	0,330	0,762
Arquitetura 10	0,330	0,858
Arquitetura 11	1,00	0,872

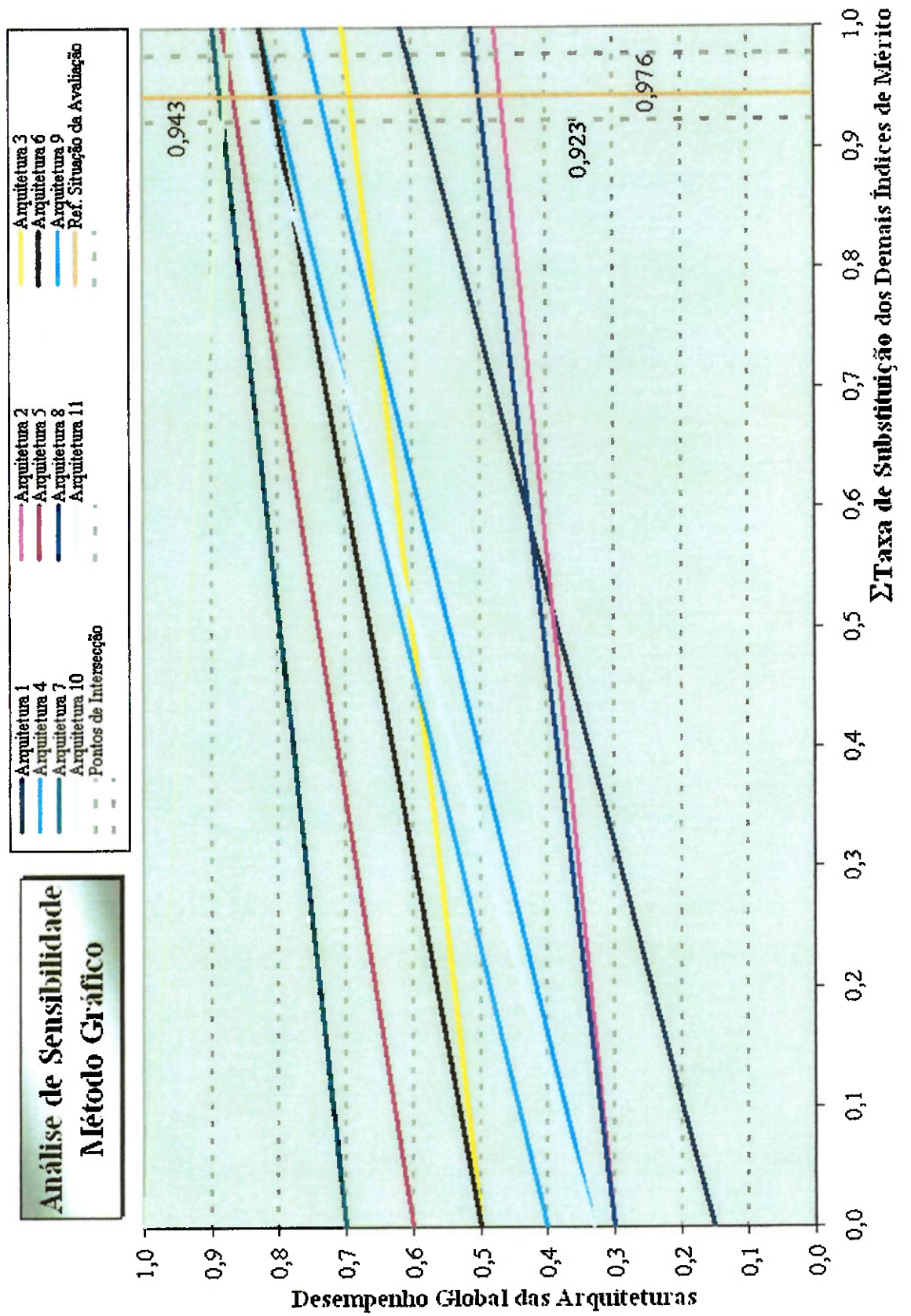


Fig. 4.19 – Análise de sensibilidade (Shimizu) para a avaliação de arquiteturas para o

#### 4.4 Discussão dos Resultados

Neste item será apresentada uma discussão dos resultados apresentados anteriormente, resultantes da aplicação do método da agregação aditiva na avaliação de diversas arquiteturas para o sistema elétrico automotivo.

Primeiramente, menciona-se que os resultados obtidos, para cada arquitetura elétrica avaliada, serão discutidos na ordem decrescente de classificação de acordo com o método de agregação aditiva. Menciona-se, ainda, que seus pontos fortes e fracos serão ressaltados, analisando-se seu desempenho local com base nos índices de mérito do modelo construído. Em seguida, a análise de custo *versus* benefício será discutida. Por fim, será apresentada uma discussão sobre os resultados da análise de sensibilidade, através de uma breve avaliação dos resultados do modelo adotado face a variações de seus parâmetros, tais como, as taxas de substituição.

##### 4.4.1 Discussão dos Resultados do Método de Agregação Aditiva

A adoção do método de agregação aditiva, e dos índices de mérito previamente definidos, indica que a arquitetura 7, ilustrada pela Fig. 4.7, representa a alternativa mais atrativa para o sistema elétrico automotivo. Ressalta-se que os parâmetros, ou índices de mérito e taxas de substituição, do modelo de avaliação construído são aqueles descritos na Tab. 4.32.

Conforme descrição anterior, a arquitetura 7 é composta por um duplo barramento de tensão (14 volts CC e 42 volts CC), conectados entre si através de um conversor CC-CC. Esta arquitetura utiliza somente uma bateria, evitando a existência de componentes em redundância, sendo que a mesma se encontra conectada ao barramento de tensão em 42 volts CC.



Ressalta-se que esta configuração tem merecido destaque entre as alternativas de arquiteturas elétricas propostas nos principais fóruns de discussões internacionais. Nota-se que uma das mais significativas vantagens oferecida por esta configuração de sistema elétrico, está relacionada com a disponibilidade de energia elétrica, principalmente no caso do AMPI ser conectado entre o motor e a transmissão do veículo. Observa-se que de acordo com seu desempenho local nos índices de mérito consumo de combustível, emissão de poluentes e “payback”, mostrados na Tab. 4.32, tal arquitetura permite, ainda, que se apliquem soluções que levem a uma redução no consumo de combustível e na emissão de poluentes. Como exemplo, menciona-se a adoção do sistema “start-stop”, com conseqüentes ganhos no período de tempo necessário para o retorno do investimento. Entretanto, de acordo com os dados da mesma tabela, a associação de seu reduzido desempenho em índices de mérito de influência relevante como, por exemplo, custo agregado e confiabilidade, e, também, em outros de menor influência tais como intercambiabilidade, oportunismo e requisitos de CEM, levou esta arquitetura a obter uma vantagem reduzida com relação às demais. Deve-se observar, no entanto, que os aspectos relacionados às imprecisões inerentes ao processo de obtenção das taxas de substituição, ilustradas pela Fig. 4.12, podem afetar esta análise. Observa-se, ainda, através da análise do gráfico conhecido como “*perfil de impacto*”, mostrado pela Fig. 4.14 e Fig. 4.15, a reduzida vantagem que a arquitetura elétrica 7 apresenta perante as demais, pois em diversos índices de mérito seu desempenho local é inferior ao de grande parte das demais arquiteturas elétricas avaliadas.

O método de análise adotado, cujo resultado é ilustrado pela Fig. 4.13, indica, na segunda posição, a arquitetura 11, formada pelo sistema elétrico atualmente em uso em grande parte dos veículos automotores (14V CC) e ilustrada pela Fig. 4.11. Ressalta-se que a posição ocupada por este sistema elétrico, apesar de inicialmente inesperada,

justifica-se devido a recentes iniciativas relacionadas à expansão da capacidade de geração de energia dos alternadores do tipo Lundell 14V CC utilizados atualmente [35]. Tal iniciativa, associada aos elevados custos e demais conseqüências procedentes da adoção do sistema elétrico em 42V CC como, por exemplo, maior complexidade na manufatura dos veículos e na detecção de falhas, tornando necessário o uso de mão-de-obra especializada, tem levado grande parte das montadoras a prorrogar cada vez mais seus planos de introdução de tal sistema em seus produtos [81], [123], [125]-[127]. Por outro lado, ressalta-se que as principais montadoras do setor automotivo mantêm departamentos de engenharia avançada desenvolvendo soluções que procurem viabilizar os sistemas elétricos de tensão elevada, pois, em um futuro não muito distante, até mesmo os alternadores do tipo Lundell 14V CC de maior capacidade de geração de energia, não serão suficientes para suprir toda a demanda dos dispositivos elétricos instalados nos veículos automotores [39], [126], [127]. Observa-se, entretanto, que o desempenho local da arquitetura elétrica 11 nos diversos índices de mérito, mostrados pela Tab. 4.32 e pela Fig. 4.13, permite promover sua participação como referência nesta avaliação, em uma alternativa ainda viável para o sistema elétrico automotivo.

A arquitetura elétrica 5, ilustrada pela Fig. 4.5, destaca-se como a terceira mais atrativa, de acordo com o modelo de avaliação construído. Conforme mencionado anteriormente, esta arquitetura se diferencia da arquitetura 7 através da consideração de uma bateria adicional, conectada ao barramento de tensão em 14 volts CC, permitindo com que o projeto do conversor CC-CC seja limitado aos valores médios do consumo elétrico deste barramento ao invés de seus valores de pico. Observa-se, de acordo com os dados da Tab. 4.32, que apesar das vantagens da utilização da arquitetura 5 ao invés da arquitetura 7 como, por exemplo, um melhor desempenho nos índices de mérito confiabilidade, devido à redundância formada pelo uso da bateria de 14V CC, e

intercambiabilidade, devido à possibilidade de uso dos componentes atualmente desenvolvidos para o barramento de tensão em 14 volts CC, a arquitetura 7 ainda se sobressai, pois apresenta melhor desempenho em outros índices de mérito de influência relevante utilizados no modelo de avaliação construído. Como exemplo, mencionam-se os índices de mérito custo agregado e peso.

Já a arquitetura elétrica 10, ilustrada pela Fig. 4.10, posiciona-se na quarta colocação, de acordo com o método de avaliação adotado, como mostra a Tab. 4.32. Observa-se que tal arquitetura representou, a princípio, a alternativa mais atrativa para a introdução do sistema elétrico em 42V CC nos veículos automotores, com base na transição ocorrida nos anos 50. Por outro lado, destaca-se que de modo diferente do ocorrido nos anos 50, quando o sistema elétrico em 7V CC foi substituído pelo sistema elétrico em 14V CC, uma transição semelhante, nos dias atuais, significaria a adequação de uma quantidade muito maior de dispositivos elétricos ao novo padrão de tensão, o que aumentaria a complexidade deste processo, obrigando-o a ser realizado de forma gradual [13], [62]-[64]. Assim, a posição ocupada por esta arquitetura elétrica justifica-se, de um lado, pelo seu elevado desempenho local nos índices de mérito peso, interface humana e requisitos de CEM, obtidos através da simplicidade da arquitetura, do acionamento automático de suas funções, com realimentação visual para o usuário e da ausência de conversores CC-CC, respectivamente; e, por outro lado, pelo seu reduzido desempenho local nos índices de mérito custo agregado, oportunismo e “payback” devido à necessidade de modificar grande parte dos dispositivos elétricos atuais tendo em vista adequá-los ao novo padrão de tensão.

A arquitetura elétrica 6, concebida originalmente como uma variante da arquitetura elétrica 5, de onde compartilha a mesma concepção básica com a adição de dispositivos de controle que permitam partir o motor com baterias auxiliares, destaca-se como a

quinta arquitetura mais atrativa, através da adoção do método de agregação aditiva, cujo resultado é ilustrado pela Tab. 4.32 e pela Fig. 4.13. Nota-se que a busca por soluções que permitam a partida de veículos automotores com baterias auxiliares de modo seguro e prático existe desde o momento em que os primeiros motores de partida elétricos foram empregados. Observa-se, desta forma, uma maior tendência ao uso deste tipo de procedimento nos dias atuais, devido a grande quantidade de dispositivos elétricos instalados nos veículos. Na proposta apresentada pela arquitetura elétrica 6, ilustrada pela Fig. 4.6, consideram-se dois terminais, ou conectores, estrategicamente localizados no veículo para a conexão de baterias auxiliares para partida, sendo um deles específico para conexão de sistemas elétricos em 14V CC. Com isto, obtém-se um melhor desempenho no índice de mérito confiabilidade, uma vez que eventuais falhas causadas pela conexão incorreta de baterias auxiliares podem ser evitadas. Por outro lado, ressalta-se que o acréscimo de custo e peso causados pela adição de tais dispositivos, além de um maior prazo para o retorno do investimento e de um certo risco quanto a aceitação do mercado, fazem com que o desempenho local desta arquitetura nos índices de mérito custo agregado, "payback", peso e aceitação do mercado seja reduzido e, conseqüentemente, que esta alternativa não ocupe uma posição de destaque na avaliação proposta.

A adoção do método de agregação aditiva indica, na sexta posição, a arquitetura elétrica 4, ilustrada pela Fig. 4.4, que se destaca por apresentar uma proposta cuja eventual implementação se traduz em um reduzido impacto para os componentes do sistema elétrico automotivo. Ressalta-se que, nesta proposta, somente alguns dos dispositivos elétricos instalados nos veículos seriam conectados ao barramento de tensão em 42 volts CC, preferencialmente aqueles dispositivos cuja adequação à este padrão de tensão seja simplificada. Por outro lado, nota-se que a proposta apresentada pela arquitetura elétrica

4 considera a aplicação de muitos componentes em redundância, entre eles, os alternadores responsáveis por gerar energia elétrica compatível com cada barramento de tensão, que devem ser montados no circuito da correia de acessórios do motor, tornando seu projeto mais complexo e custoso, além de aumentar o peso total do veículo. Assim, observa-se que, de acordo com o resultado da adoção do método de agregação aditiva, mostrado na Tab. 4.32, apesar da arquitetura elétrica 4 apresentar um elevado desempenho local em diversos índices de mérito como, por exemplo, oportunidade, confiabilidade e aceitação do mercado, seu desempenho local em outros índices de mérito como, por exemplo, custo agregado, "payback", consumo de combustível e peso, é modesto devido às características citadas, fazendo com que esta alternativa se torne inviável de acordo com os parâmetros do modelo construído.

A arquitetura elétrica 9, ilustrada pela Fig 4.9, ocupa a sétima colocação de acordo com o método de avaliação adotado, cujo resultado é mostrado na Tab. 4.32 e na Fig. 4.13. Ressalta-se que esta arquitetura elétrica apresenta uma elevada sinergia com a tecnologia utilizada em veículos movidos por motores elétricos, chamados híbridos, atualmente produzidos em série pelas principais montadoras do setor automotivo. Tais veículos, destaca-se, podem ser encontrados no mercado, principalmente em regiões onde os requisitos de emissões de poluentes são mais severos como, por exemplo, o estado da Califórnia nos Estados Unidos da América. Nota-se que, apesar do sistema elétrico desta arquitetura ser capaz de gerar uma grande quantidade de energia, sua utilização por parte dos equipamentos elétricos é prejudicada devido à especificação de tensão em 300 volts CC, cujos valores de sobre-tensão podem atingir picos da ordem de 1,4 vezes seu valor nominal, reduzindo, consideravelmente, o desempenho local desta proposta nos índices de mérito confiabilidade e choques elétricos. Desta forma, observa-se que somente alguns dispositivos elétricos são conectados a este barramento como,

por exemplo, o AMPI, elementos aquecedores tais como desembaçadores e motores elétricos em geral tais como os motores limpadores de pára-brisa, enquanto a grande maioria dos demais dispositivos elétricos permanecerem conectados ao barramento de tensão em 14 volts CC. Ressalta-se que tal condição conduz a uma nova redução do desempenho local desta arquitetura em alguns índices de mérito, tais como peso, devido ao uso de condutores elétricos de maior bitola, e custo agregado, devido ao maior requisito de consumo médio de energia para o projeto dos conversores CC-CC. Ainda de acordo com os dados da Tab. 4.32, destacam-se outros fatores que justificam a posição ocupada por esta arquitetura elétrica como, por exemplo, um reduzido desempenho local nos índices de mérito aceitação do mercado, devido à possibilidade de uso de novas funcionalidades, tais como a propulsão elétrica, que podem incomodar alguns usuários, “payback”, devido ao grande período de tempo necessário para o retorno do investimento no veículo motivado pelo seu elevado custo de aquisição, e expansibilidade, devido à necessidade de adequar os conversores CC-CC ao novo valor de consumo médio de energia, entre outros.

A adoção do método de agregação aditiva indica, na oitava posição, a arquitetura elétrica 3, ilustrada pela Fig. 4.3, originada de uma simplificação da arquitetura elétrica 4 com o objetivo, a princípio, de torná-la mais atrativa através da eliminação da redundância formada pela consideração de dois alternadores. Nesta proposta, utiliza-se somente um alternador capaz de gerar energia elétrica, de forma simultânea, para ambos barramentos de tensão, obedecendo os limites impostos pela especificação do barramento de tensão em 42 volts CC, mostrada na Tab. 2.1. Destaca-se, desta forma, que o desempenho local desta arquitetura elétrica nos índices de mérito custo agregado e peso podem ser considerados satisfatórios, quando comparado ao desempenho local da arquitetura 4 nos mesmos índices de mérito, devido à existência de um único alternador.

Ressalta-se, entretanto, que o mesmo é considerado modesto em comparação ao desempenho local das arquiteturas elétricas abordadas até então, considerando os mesmos índices de mérito, como mostra o resultado do método de agregação aditiva através da Tab. 4.32. Nota-se que a posição ocupada por esta arquitetura elétrica deve-se, ainda, ao seu reduzido desempenho local em outros índices de mérito como, por exemplo, redução na emissão de poluentes, expansibilidade e inovação tecnológica, devido a limitações de capacidade de geração de energia elétrica relacionado com o uso de um alternador com dupla saída de tensão, impedindo a adoção de soluções que reduzam a emissão de poluentes, e aspectos de IEM, devido ao risco de inoperância de algum sistema de segurança do veículo causado pelo nível de emissões eletromagnéticas radiadas pela eletrônica de controle do alternador, entre outros.

A arquitetura elétrica 1, ilustrada pela Fig. 4.1, posiciona-se na nona colocação, de acordo com o método de avaliação adotado, como mostra a Tab. 4.32 e a Fig. 4.13. Observa-se que tal arquitetura representou uma das primeiras propostas de arquiteturas elétricas consideradas nos primeiros estudos sobre a eventual introdução de sistemas elétricos com barramento de tensão elevada. Destaca-se que uma das principais características desta proposta é a consideração de uma série de dispositivos elétricos em duplicidade, como é o caso de alternadores, baterias e motores de partida, o que propicia um elevado desempenho local em alguns índices de mérito como, por exemplo, confiabilidade, expansibilidade, prazo para expansão e custo associado à expansão. Por outro lado, menciona-se que o contínuo desenvolvimento de dispositivos mais eficientes para o sistema de geração de energia automotivo permitiu uma crescente evolução das propostas de arquiteturas para o sistema elétrico veicular, tornando a arquitetura elétrica 1 inviável, de acordo com os parâmetros do modelo de avaliação construído, descritos na Tab. 4.32.

O resultado do método de análise adotado, mostrado na Fig. 4.13, indica, na décima e penúltima posição, a arquitetura elétrica 8, formada por um sistema elétrico de tensão elevada em CA e ilustrada pela Fig. 4.8. Ressalta-se que esta proposta, assim como a anterior, representa uma das primeiras alternativas avaliadas pelo grupo de trabalho “Industry Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems”, liderado pelo MIT, para a implementação de sistemas elétricos de tensão elevada em veículos automotores, sendo, posteriormente, estudado por outros autores. A arquitetura elétrica 8 destaca-se por propor a utilização de um sistema elétrico trifásico em veículos automotores, o que se traduz em uma grande mudança conceitual, pois a utilização de sistemas elétricos em CC esteve sempre associada à história de grande parte dos veículos produzidos em larga escala, seja ela motivada pela necessidade de armazenamento da energia elétrica em baterias, seja ela motivada pelo crescente uso de dispositivos eletrônicos nos veículos. Assim, devido ao uso de um sistema elétrico em CA, nota-se que o desempenho local da arquitetura elétrica 8 nos índices de mérito consumo de combustível e peso são otimizados através, respectivamente, do uso de motores elétricos de modo auxiliar à tração do veículo e da possibilidade de redução da bitola dos fios e cabos elétricos utilizados no veículo. Observa-se, por outro lado, que o uso de sistemas elétricos em CA nos veículos automotores não é viável devido a uma série de fatores, dentre eles o custo agregado ao sistema elétrico proveniente da adequação dos equipamentos elétricos atuais ao novo padrão de tensão, bem como o aumento do correspondente período de tempo necessário para o retorno do investimento, ou “payback”, como mostra o resultado do método de agregação aditiva através da Tab. 4.32. Além destes, mencionam-se outros fatores que justificam a posição ocupada por esta arquitetura elétrica como, por exemplo, seu desempenho local nos índices de mérito confiabilidade, devido ao uso de componentes novos e sem



redundância, requisitos de CEM, devido ao uso de componentes inversores e dispositivos elétricos em CA, e choques elétricos, devido a necessidade de utilização de dispositivos de proteção em grande parte dos circuitos de tensão elevada, entre outros. Ressalta-se, ainda, que apesar do método de avaliação adotado neste trabalho considerar inviável a adoção de sistemas elétricos em CA nos veículos automotores, com base nos parâmetros do modelo construído, as indústrias naval, aeronáutica e aeroespacial, adotaram tal sistema em seus produtos, conforme mencionado anteriormente. Menciona-se, por fim, que um dos principais argumentos utilizados para justificar esta atitude é a diferença existente entre as características de cada um dos mercados citados, afetando diretamente as taxas de substituição do modelo, bem como os próprios índices de mérito.

A arquitetura elétrica 2, concebida originalmente como uma variante da arquitetura elétrica 1, de onde compartilha a mesma concepção básica com a eliminação de alguns componentes em redundância e a consideração de uma fonte simétrica para o estabelecimento do barramento de tensão elevada, posiciona-se na décima primeira e última colocação, através da adoção do método de agregação aditiva, ilustrado pela Tab. 4.32 e pela Fig. 4.13. Observa-se que esta proposta, juntamente com a arquitetura elétrica 1, representam uma das primeiras alternativas para implementação de sistemas elétricos de tensão elevada nos veículos automotores. Assim, alguns fatores que anos mais tarde se tornaram consensuais como, por exemplo, o valor nominal da tensão de operação do barramento de tensão elevada em 42 volts CC, não foram considerados em sua concepção, impactando negativamente no desempenho local desta alternativa em alguns índices de mérito. Entretanto, destaca-se que um dos principais fatores que levaram a arquitetura elétrica 2 a se tornar menos atrativa do que a arquitetura elétrica 1, foi a consideração de uma fonte simétrica para o estabelecimento do barramento de

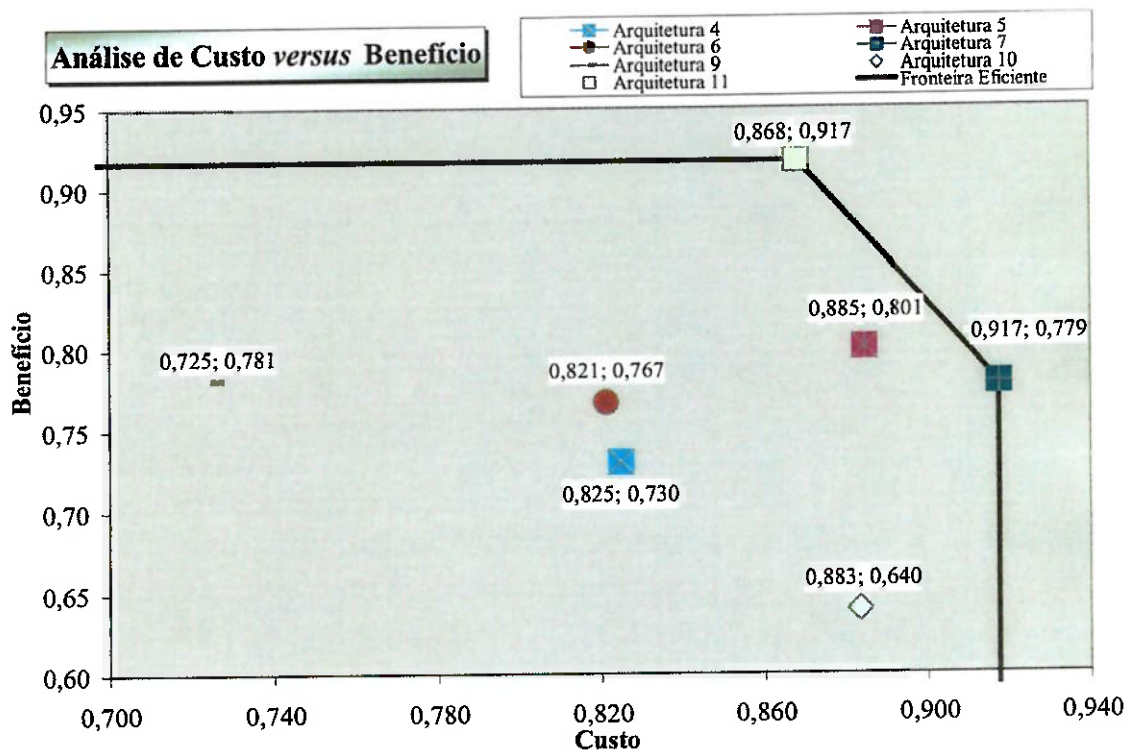
tensão elevada, o que implica em um reduzido desempenho local nos índices de mérito complexidade da arquitetura e confiabilidade, devido a dificuldade para a manutenção da carga das baterias utilizadas na fonte simétrica e a utilização de novos dispositivos elétricos para o controle da fonte simétrica, respectivamente.

#### 4.4.2 Discussão dos Resultados da Análise de Custo *versus* Benefício

O resultado da análise de custo *versus* benefício, ilustrado pela Fig. 4.16, relaciona, em um único gráfico, o desempenho de todas as arquiteturas elétricas em avaliação perante agrupamentos de índices de mérito que representam custos e benefícios, conforme a proposta apresentada na Tab. 4.34. Nota-se, através da comparação direta entre os dados mostrados pela Fig. 4.13 e pela Fig. 4.16, que os resultados do método de agregação aditiva e da análise de custo *versus* benefício são semelhantes ao indicarem as arquiteturas elétricas 7 e 11 como as mais atrativas e dominantes, respectivamente, de acordo com os parâmetros do modelo construído. Ressalta-se, ainda, que a análise de custo *versus* benefício também identificou a reduzida vantagem apresentada pela arquitetura elétrica 7 em relação a arquitetura elétrica 11, através da proximidade entre os pontos que representam estas arquiteturas, como mostra a Fig. 4.20, obtida através da ampliação do gráfico apresentado pela Fig. 4.16. De acordo com este gráfico, observa-se que a arquitetura elétrica 11 é a que apresenta maior benefício, apesar de se posicionar na quarta colocação em relação ao agrupamento custo. Já a arquitetura elétrica 7 possui um comportamento oposto, ao apresentar o melhor custo e a quarta posição em relação ao agrupamento benefício.

O resultado da análise de custo *versus* benefício indica, também, as arquiteturas elétricas que podem ser consideradas dominantes, ou seja, as arquiteturas elétricas que

apresentam um mesmo benefício que outra e um custo maior, ou que apresentam um mesmo custo que outra, mas um benefício menor. Assim, de acordo com a Fig. 4.16, pode-se afirmar que as arquiteturas elétricas 7 e 11 dominam as demais arquiteturas avaliadas neste trabalho. Neste aspecto, observa-se, ainda, que a análise do gráfico conhecido como “*perfil de impacto*”, ilustrado pela Fig. 4.14 e Fig. 4.15, possui este mesmo objetivo, porém, quando confrontado com o resultado da análise de custo *versus* benefício, mostrado pela Fig. 4.16, nota-se a maior facilidade na visualização das arquiteturas elétricas dominadas quando esta última ferramenta é utilizada.



**Fig. 4.20** – Ampliação do resultado da análise de custo *versus* benefício para a avaliação de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo

Por outro lado, ressalta-se que o resultado da análise de custo *versus* benefício não indica qual das arquiteturas elétricas é a mais atrativa. O principal objetivo desta análise

índices de mérito do modelo construído em agrupamentos que representam custos e benefícios. Tal reorganização permite uma clara visualização das arquiteturas consideradas dominantes, além da identificação da fronteira eficiente, onde se localizam as alternativas que oferecem uma melhor relação custo-benefício. A arquitetura elétrica mais atrativa, por sua vez, é identificada através do resultado do método de agregação aditiva, que considera o desempenho global de cada arquitetura em avaliação, obtido através dos desempenhos locais de cada arquitetura nos índices de mérito selecionados, ponderados pelas taxas de substituição definidas.

#### **4.4.3 Discussão dos Resultados da Análise de Sensibilidade**

A análise de sensibilidade executada no modelo de análise construído através dos métodos numérico e gráfico, cujo resultado se encontra ilustrado pelas Fig. 4.17, Fig. 4.18 e Fig. 4.19, certificou sua robustez, uma vez que a arquitetura elétrica 7 manteve-se como a mais atrativa mesmo perante uma variação de  $\pm 10\%$  na taxa de substituição de seu índice de mérito mais significativo; o índice de mérito custo agregado. Com o auxílio de uma planilha de cálculo, identifica-se que o resultado do modelo se altera somente a partir de uma variação de  $+35,37\%$  no mesmo índice de mérito.

Com relação ao resultado da análise de sensibilidade executada através do método numérico, ilustrado pela Tab. 4.39 e pela Fig. 4.17, observa-se que tanto para um aumento de  $10\%$  da taxa de substituição do índice de mérito custo agregado, quanto para uma diminuição do mesmo valor no mesmo índice de mérito, não ocorrem alterações significativas no desempenho global das arquiteturas elétricas, visto que suas colocações, com base no nível de atratividade de cada arquitetura, são mantidas.

Já com relação ao resultado da análise de sensibilidade executada através do método gráfico, ilustrado pela Fig. 4.18 e pela Fig. 4.19, observa-se com maior clareza o comportamento dinâmico do modelo de análise construído, representado pelo desempenho global das arquiteturas elétricas em função da variação da taxa de substituição do índice de mérito custo agregado. Assim, considerando-se as taxas de substituição definidas pela Tab. 4.31, o gráfico ilustrado pela Fig. 4.18 fornece diretamente a relação das arquiteturas elétricas mais atrativas através dos pontos de intersecção das retas que representam o desempenho global das arquiteturas com uma reta formada pela taxa de substituição do índice de mérito custo agregado que, neste caso, possui o valor 0,057. Observa-se que, desta forma, torna-se possível reproduzir, a partir do gráfico ilustrado pela Fig. 4.18, os dados apresentados pela Fig. 4.13.

Do mesmo modo, ressalta-se que ao forçar uma variação positiva da taxa de substituição do índice de mérito custo agregado, nota-se, através da visualização da Fig. 4.18, que o desempenho global da arquitetura elétrica 7 é constantemente reduzido até se igualar ao desempenho global da arquitetura elétrica 11, quando a taxa de substituição do índice de mérito custo agregado é igual a 0,077, ou 35,37% superior ao seu valor original. Isto significa que, para taxas de substituição do índice de mérito custo agregado superiores a 0,077, o modelo de avaliação construído passa a identificar a arquitetura 11 como a mais atrativa, uma vez que este índice de mérito se torna mais desejável. Observa-se, ainda, que novos incrementos no valor da taxa de substituição do índice de mérito custo agregado geram novas intersecções entre as retas que representam os desempenhos globais das arquiteturas em avaliação. Entretanto, tais intersecções não são relevantes pois ocorrem somente entre as retas que representam o desempenho global de arquiteturas elétricas cujo nível de atratividade é reduzido.

De forma geral, destaca-se como um dos principais objetivos deste tipo de análise, o estabelecimento dos limites de variação da taxa de substituição de determinado índice de mérito a partir dos quais o resultado do modelo se altera. Assim, levando-se em consideração a análise executada neste trabalho e limitando-se a classificação a três arquiteturas elétricas mais atrativas, pode-se definir três intervalos de variação da taxa de substituição do índice de mérito custo agregado nos quais o resultado do modelo se altera, com base na Fig. 4.18. O primeiro intervalo é definido quando a taxa de substituição do índice de mérito custo agregado varia entre zero e 0,024, onde as arquiteturas elétricas 7, 5 e 11, nesta ordem, são identificadas como as mais atrativas. O segundo intervalo é definido quando a taxa de substituição deste mesmo índice de mérito varia entre 0,024 e 0,077, onde a arquitetura elétrica 11 supera a 5. O terceiro intervalo é definido quando a taxa de substituição do índice de mérito custo agregado é superior a 0,077, onde a arquitetura elétrica 11 passa a ser a mais atrativa, superando, nesta ordem, as arquiteturas elétricas 7 e 5.

Destaca-se, por fim, a semelhança existente entre os resultados das variantes propostas por Ensslin e Shimizu para a execução da análise de sensibilidade através do método gráfico. Na variante proposta por Ensslin, o eixo das abscissas é formado pelo valor da taxa de substituição do índice de mérito custo agregado, enquanto na variante proposta por Shimizu, este mesmo eixo é formado pela somatória dos valores das demais taxas de substituição. Pelo fato da somatória dos valores das taxas de substituição de todos os índices de mérito ser unitário, conforme mencionado anteriormente, espera-se que o resultado das análises propostas por Ensslin e Shimizu sejam simétricas em relação ao eixo das ordenadas, representado pelo desempenho global das arquiteturas, em valores absolutos.

## 5 CONCLUSÃO

Os principais aspectos técnicos relacionados às novas tecnologias e arquiteturas elétricas aplicáveis aos veículos automotores foram apresentados, assim como uma revisão da literatura sobre a aplicação de vários sistemas de tensão elevada, com ênfase nos sistemas elétricos em 36V / 42V CC, em comparação com o sistema elétrico em 12V / 14V CC.

As características técnicas de algumas das principais arquiteturas elétricas propostas na literatura existente foram apresentadas, e as diferentes considerações a respeito da viabilidade de sistemas de tensão elevada foram examinadas na aplicação e avaliação da metodologia proposta.

Os diversos índices de mérito definidos neste trabalho foram apresentados e justificados com relação à sua importância histórica na evolução da tecnologia do sistema elétrico automotivo. As funções de valor, as taxas de substituição e o método de agregação aditiva, da mesma forma, também foram apresentados.

Enfatizou-se a utilização do método de agregação aditiva, ressaltando-se sua capacidade de avaliar simultaneamente diversas alternativas, através de parâmetros qualitativos. Tal método, detalhadamente discutido na metodologia, mostrou-se muito eficiente por permitir uma avaliação dinâmica da análise proposta perante modificações em quaisquer parâmetros existentes.

A análise de sensibilidade mostrou a robustez do modelo construído, pois seu resultado permaneceu inalterado após uma variação de  $\pm 10\%$  na taxa de substituição do índice de mérito custo agregado. Com isto, pode-se afirmar que o modelo de avaliação construído é consistente e seu resultado indica a tendência de arquitetura elétrica a ser, eventualmente, adotada para o sistema elétrico automotivo. Observa-se que o resultado

obtido pela metodologia adotada coincide com a solução aplicada pela Toyota, desde 2002, no veículo Crown Royal Sallon, cujo sistema elétrico é formado por uma versão da arquitetura elétrica 5, avaliada neste trabalho.

Apesar da robustez e consistência do modelo de avaliação construído e da importância dos índices de mérito selecionados, convém ressaltar que não existe uma solução definitiva para o tema em questão. Diferentes avaliações podem conduzir a diferentes resultados, uma vez que as taxas de substituição de cada índice de mérito do modelo são definidas pelo responsável pela avaliação, sujeitando-as, desta forma, à seus próprios critérios.

Ressalta-se, por fim, que este trabalho contribuiu para a evolução do estudo do sistema elétrico automotivo através da aplicação de uma metodologia sistemática para a avaliação de diversas arquiteturas elétricas de forma simultânea. Tal metodologia utiliza-se do conhecimento adquirido através da evolução histórica do sistema elétrico automotivo, além de permitir a consideração de análises críticas existentes na literatura, como base para gerar uma ferramenta de avaliação que propicia o uso de critérios objetivos para a tomada de decisão. Menciona-se que, na literatura atualmente disponível, não foi possível identificar estudos cuja abordagem seja semelhante à adotada neste trabalho.



## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar das taxas de substituição e das funções de valor terem sido obtidas através da experiência profissional de membros da indústria automobilística, qualquer método que sugira quantificar numericamente diversos níveis de preferência resulta em determinado grau de imprecisão, como consequência da própria natureza humana.

Desta forma, com o objetivo de complementar este trabalho, sugere-se que, em trabalhos futuros, as imprecisões geradas pelo processo de definição das taxas de substituição e das funções de valor, sejam consideradas como um dos inúmeros cenários existentes para a análise do tema proposto.

Cada um dos eventuais cenários deverá, ainda, ser ponderado através de uma análise probabilística, de modo a indicar sua possibilidade de ocorrência. Assim, o modelo a ser construído englobará uma série de cenários, eventualmente até estudos executados por outras montadoras ou departamentos, o que resulta em uma análise mais abrangente, com a possibilidade de considerar fatores externos ao tema proposto como, por exemplo, oscilações da economia mundial. Convém ressaltar que esta sugestão não anula os resultados apresentados neste trabalho. Ela apenas complementa o processo de obtenção das taxas de substituição e funções de valor com a consideração de um número maior de opiniões como forma de minimizar as imprecisões geradas por este processo.

A simulação de funções e equipamentos elétricos e eletrônicos em computador, utilizando softwares como, por exemplo, MATLAB, SPICE ou MAESTRO, constitui uma nova sugestão para trabalhos futuros. As simulações em computador podem prover resultados que auxiliem a comprovação teórica dos efeitos relacionados à reduções no consumo de combustível e no nível de emissões de poluentes provenientes da eventual adoção do sistema elétrico em 42V CC, sem que sejam necessários a execução de testes

com peças físicas desenvolvidas para operarem de forma compatível com este sistema [106].

A realização de testes com peças físicas, no entanto, ainda pode ser executada, como uma evolução natural da proposta anterior, com o objetivo de gerar um maior conhecimento sobre o comportamento de determinados subsistemas de um veículo, tendo em vista complementar os resultados apresentados neste trabalho, além de confrontar os dados obtidos durante simulações em computador.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. JOHNSTON, R. H. A history of automobile electrical systems. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.104, n.9, p.53-66, setembro 1996.
2. GIVENS, L. A technical history of the automobile – Part 1. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.98, n.6, p.61-67, junho 1990.
3. GIVENS, L. A technical history of the automobile – Part 2. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.98, n.7, p.43-48, julho 1990.
4. GIVENS, L. A technical history of the automobile – Part 3. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.98, n.8, p.49-52, agosto 1990.
5. HARTZELL, H. L. The 12 volts history. **Society of Automotive Engineers**. Warrendale, Pennsylvania, outubro, 1952. SAE paper 520171.
6. HARTZELL, H. L. Why 12 volts ? **Automotive Industries**, Philadelphia, v.107, n.9, p.56-112, novembro 1952.
7. HARTZELL, H. L. It's still 12 volts. **St. Louis Section of the Society of Automotive Engineers**. St. Louis, Missouri, outubro, 1953. SAE paper 530171.
8. MILLER, J. M. Multiple voltage electrical power distribution system for automotive applications. **Proceedings of the 31<sup>st</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**, Washington, D.C., v.3, p.1930-1937, agosto 1999.
9. DELCO REMY DIVISION. **Passenger car electrical system. 24-volt vs 12-volt.** : Delco Remy Division, fevereiro 1977 (SASI 775777).
10. SANTOS, Gláucio; SARTORI, Carlos A. F. **Considerações do ambiente eletromagnético urbano na análise de interferências em veículos automotores.** 2002. 82p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
11. IEC-479 Part 1, “Effects of current passing through the human body, part 1: general aspects”, **International Electrotechnical Commission Report**, Second edition, 1984.
12. IEC-479 Part 2, “Effects of current passing through the human body, part 2: special aspects”, **International Electrotechnical Commission Report**, Second edition, 1987.
13. HELLMANN, J. V.; SANDEL, R. J. Dual/high voltage vehicle electrical systems. **SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition**. Portland, Oregon, agosto, 1991. SAE paper 911652.

14. MATOUKA, M. F. Design considerations for higher voltage automotive electrical systems. **SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition**. Portland, Oregon, agosto, 1991. SAE paper 911654.
15. MOHAN, B.; MACKE, E. Electromagnetic components in dual voltage systems. **SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition**. Portland, Oregon, agosto, 1991. SAE paper 911656.
16. WEST, J. G. W. Powering up a higher system voltage for cars. **IEE Review**, Londres, v.35, n.1, p.29-32, janeiro 1989.
17. AFRIDI, K. K. et al. Alternative electrical distribution system architectures for automobiles. **Proceedings of IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation**, Dearborn, Michigan, p.33-38, outubro 1994.
18. SAE J2232, "Vehicle System Voltage – Initial Recommendations", **SAE Information Report**, SAE Handbook, junho 1992.
19. MIT/INDUSTRY CONSORTIUM ON ADVANCED AUTOMOTIVE ELECTRICAL / ELECTRONIC COMPONENTS AND SYSTEMS . Cambridge. Massachussets Institute of Technology. Disponível em: <http://mit42v.mit.edu/index.html>. Acesso em: 01 de dez. 2002.
20. KASSAKIAN, J. G. The 42V powernet story – challenges of an international collaboration. **IEEE / SAE Convergence 2002**. Detroit, Michigan, outubro, 2002. SAE paper 2002-21-0005.
21. COSTLOW, T. MIT prof drives the shift to 42-v cars. **Electronic Engineering Times**, Manhasset, n.1053, p.115-116, março 1999.
22. HARTMANN, H. D. Standardization of the 42v powernet – history, current status, future action. **Proceedings of the HDT Conference 42V-PowerNet: The First Solutions**. Villach, Austria, p.1-14, setembro, 1999.
23. KASSAKIAN, J. G. The future of power electronics in advanced automotive electrical systems. **Proceedings of the 27<sup>th</sup> Annual IEEE Power electronics Specialist Conference**. Lake Maggiore, v.1, p.7-14, junho, 1996.
24. KASSAKIAN, J. G. et al. Automotive electrical systems circa 2005. **IEEE Spectrum**, New York, v.33, n.8, p.22-27, agosto 1996.
25. TRUETT, R. Technology's top 10. **Automotive News International**, Detroit, p.20-22, março 2001.
26. MADOV, N. Da até para morar. **Veja**, São Paulo, v.35, n.47, p.137, novembro 2002.

27. WEBER, A. The 42-volt challenge: automakers are starting to convert to more powerfull electrical systems. **Assembly Magazine**, Bensenville, v.45, n.6, p.34-44, junho 2002.
28. KASSAKIAN, J. G. et al. The future of automotive electrical systems. **Proceedings of IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation**. Dearborn, Michigan, p.3-12, outubro, 1996.
29. WEST, J. G. W. The present status of electrical machines in vehicles. **IEEE Colloquium on Machines for Automotive Applications**. Londres, p.1/1-12/1, novembro, 1996 (Digest No. 1996/166).
30. BISCHOF, H. et al. High output alternator concepts. **SAE International Congress and Exposition**. Detroit, Michigan, março, 1999. SAE paper 1999-01-1092.
31. OSTOVIC, V. et al. A magnetic-equivalent-circuit-based performance computation of a lundell alternator. **IEEE Transaction on Industry Applications**, New York, v.35, n.4, p.825-830, julho 1999.
32. LIANG, F. et al. A vehicle electric power generation system with improved output power and efficiency. **IEEE Transaction on Industry Applications**, New York, v.35, n.6, p.1341-1346, novembro 1999.
33. REITER, F. B. et al. Salient pole generators for belt-driven automotive alternator applications. **Proceedings of the 36<sup>th</sup> Annual IEEE Industry Applications Conference**, New York, New York, p.437-442, setembro 2001.
34. KHAN, I. A. Power electronics in automotive electrical systems. **Proceedings of IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation**. Dearborn, Michigan, p.29-38, outubro, 1996.
35. JOST, K. IR high-output airr for maybach. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.111, n.4, p.56, abril 2003.
36. BOLENZ, K. Design modifications of the electrical systems to use intermittent engine operation. **IEEE Colloquium on Machines for Automotive Applications**. Londres, p.2/1-2/7, novembro, 1996 (Digest No. 1996/166).
37. LE BARS, P.; REGINI, A. 42V load dump transient and centralised active suppression. **IEE Seminar on Passenger Car Electrical Architecture**. Austin Court, Birmingham, p.4/1-4/3, junho, 2000.
38. SHEN, Z. J. et al. Load dump protection in 42v automotive electrical distribution systems. **Proceedings of the 16<sup>th</sup> Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition**. New Orleans, Los Angeles, v.1, p.289-295, fevereiro, 2001.

39. EHSANI, M. et al. 42V automotive power systems. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2001. SAE paper 2001-01-2465.
40. HENRY, R. R. et al. Belt-driven starter-generator for future 42-volt systems. **SAE 2001 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2001. SAE paper 2001-01-0728.
41. NAIDU, M.; WALTERS, J. A 4kw, 42v induction machine based automotive power generation system with a diode bridge rectifier and a pwm inverter. **Proceedings of the 36<sup>th</sup> Annual IEEE Industry Applications Conference**, New York, New York, p.449-456, setembro 2001.
42. MILLER, J. M. et al. Design considerations for an automotive integrated starter-generator with pole-phase modulation. **Proceedings of the 36<sup>th</sup> Annual IEEE Industry Applications Conference**, New York, New York, p.2366-2373, setembro 2001.
43. SILVA, W.; PAULA, P. 12V/14V to 36V/42V automotive system supply voltage change and the new technologies. **Congresso SAE Brasil 2002**. São Paulo, São Paulo, novembro, 2002. SAE paper 2002-02-0334.
44. BECKER, J. Dual-voltage alternators. **SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition**. Toledo, Ohio, novembro, 1992. SAE paper 922488.
45. DWYER, J. O. et al. Dual voltage alternator. **IEEE Colloquium on Machines for Automotive Applications**. Londres, p.4/1-4/5, novembro, 1996 (Digest No. 1996/166).
46. ARMIROLI, P. A simple architecture for 42v generator: technical design and benefits. **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-0517.
47. KLOTZ, F.; GRAF, A. Driving small motors at 42v powernet. **SAE 2001 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2001. SAE paper 2001-01-0726.
48. THIEMER, H. Influence of automotive 42v powernet on small pm dc motors. **Proceedings of the IEEE International Electrical Machines and Drives Conference**, Cambridge, Massachusetts, p.591-593, junho 2001.
49. SO, L. et al. 42v-pwm – lighting the way in the new millennium. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3053.
50. LI, K. et al. 42v pwm conversion & control technologies and e/eds architecture. **SAE 2001 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2001. SAE paper 2001-01-0725.

51. BERRYHILL, J. et al. Summary of 42v pwm testing results. **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-0518.
52. ANDRADE, M. M.; SARTORI, C. A. F. Simulation of automotive electronic systems using imported experimental data. **Congresso SAE Brasil 2001**. São Paulo, São Paulo, novembro, 2001. SAE paper 2001-01-3819.
53. MILLER, J. et al. Making the case for a next generation automotive electrical system. **SAE Convergence Transportation Electronics Association Congress**. Dearborn, Michigan, outubro, 1998. SAE paper 98C006.
54. HUANG, H. et al. Automotive electrical system in the new millennium. **SAE International Truck & Bus Meeting & Exposition**. Detroit, Michigan, novembro, 1999. SAE paper 1999-01-3747.
55. NEUBERT, J. Powering up. **IEE Review**, Londres, v.46, n.5, p.21-25, setembro 2000.
56. HARTNETT, P. 42V powernet enabling technologies: overview. **IEE Seminar on Passenger Car Electrical Architecture**. Austin Court, Birmingham, p.1/1-1/4, junho, 2000.
57. EVANS, H. 42 volts – impact on electrical distribution systems and components. **IEE Seminar on Passenger Car Electrical Architecture**. Austin Court, Birmingham, p.5/1-5/7, junho, 2000.
58. BRANDÃO, M. . **Congresso SAE Brasil 2001**. São Paulo, São Paulo, novembro, 2001. SAE paper 2001-01-3869.
59. COTTRILL, M. C. et al. Foresight vehicle: large area flexible circuits for automotive applications manufacturing technology – a review of process options. **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-1127.
60. FRANK, R. et al. The role of power electronics in future automotive systems. **Convergence Transportation Electronics Association Congress**. Dearborn, Michigan, outubro, 1998. SAE paper 98C009.
61. MILLER, J. et al. Current status and future trends in more electric car power systems. **Proceeding of the 1999 IEEE 49<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference**. Houston, Texas, p.1380-1384, julho, 1999.
62. KASSAKIAN, J. G. Automotive electrical systems – the power electronics market of the future. **Proceedings of the 15<sup>th</sup> Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition**. New Orleans, Los Angeles, p.3-9, fevereiro, 2000.
63. KASSAKIAN, J. G. et al. Automotive electronics power up. **IEEE Spectrum**, New York, v.37, n.5, p.34-39, maio 2000.

64. KASSAKIAN, J. G. et al. The future of electronics in automobiles. **Proceedings of the 13<sup>rd</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs**, Osaka, Japão, p.15-19, junho 2001.
65. PANDYA, K. I.; PIETRCZAK, K. Shifting from 12-v to 42-v systems in automotive applications. **Proceedings of the 52<sup>nd</sup> Electronic Components and Technology Conference**, San Diego, California, p.1735-1738, junho 2002.
66. MOENS, P. et al. I3T80: a 0,35 $\mu$ m based system-on-chip technology for 42v battery automotive applications. **Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs**, Santa Fe, Novo Mexico, p.225-228, junho 2002.
67. PECHLANER, A.; GRAF, A. 42v powernet in door applications. **SAE 2000 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2000. SAE paper 2000-01-0450.
68. MURRAY, A. F. et al. A 42v inverter/rectifier for isa using discrete semiconductor components. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2001. SAE paper 2001-01-2497.
69. PFAELZER, A. et al. Bi-direcional automotive 42/14 volt bus dc/dc converter. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3066.
70. PFAELZER, A.; WEINER, M. Notes on mit / intronics 42 volt / 14 volt bi-directional converter. **Proceedings of IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation**, Auburn Hills, Michigan, p.27-29, outubro 2002.
71. PENG, F. Z. et al. A magnetic-less dc-dc converter for dual-voltage automotive systems. **IEEE Transaction on Industry Applications**, New York, v.39, n.2, p.511-518, março 2003.
72. WIENER, M.; PARKER, A. Proposed backup control for bi-directional automotive 42 volt to 14 volts converter. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2001. SAE paper 2001-01-2499.
73. BERNDT, D. The lead-acid battery system. In: BERNDT, D. **Maintenance-free batteries – lead-acid, nickel/cadmium, nickel/metal hydride. A handbook of battery technology**. Tauton: Research Studies Press, 1997. P.96-173.
74. PARK, C. W.; JAURA, A.K. Transient heat transfer of 42v ni-mh batteries for an hev application. **2002 Future Car Congress**. Arlington, Virginia, junho, 2002. SAE paper 2002-01-1964.
75. TRAUB, N. 42V activities at SAE. **JSAE Annual Congress & Exposition**. Detroit, Michigan, março, 2002.



76. CROUCH, D.; BALLARD, G. Batteries for 42/14 volt automotive electrical systems. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3065.
77. COX, M. et al. Field results of battery management technology integration into a vehicle application (ingen). **Power Systems Conference**. Coral Springs, Florida, outubro, 2002. SAE paper 2002-01-3259.
78. JASPAR, J. et al. Fuses for future vehicles with 42v rated electrical systems. **SAE 2000 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2000. SAE paper 2000-01-0137.
79. WILLIAMS, M. et al. Impact of 42v automotive electrical systems on fuses. **SAE 2000 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2000. SAE paper 2000-01-0138.
80. SCHULTE, H. et al. The future possibilities of fuse systems for increased power management capabilities in future 42v architecture. **SAE 2001 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2001. SAE paper 2001-01-0727.
81. DANIELS, J. Suppliers smooth road to 42V implementation. **European Automotive Design**, Franks Hall, v.5, n.4, p.29-35, maio 2001.
82. LEUNG, C.; LEE, A. Contact erosion in automotive dc relays. **Proceedings of the 36<sup>th</sup> Annual IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts**. Montreal, Quebec, p.85-93, agosto, 1990.
83. ZAREI, S.; ALLES, S. Effect of 42v on automotive relays and switches. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3054.
84. COLOMBO, P. et al. Arcing study in high current electromechanical switching for future 14-42v dual voltage systems. **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-0520.
85. JEMAA, N. B. et al. Break arc study for the new electrical level of 42v in automotive applications. **Proceedings of the 47<sup>th</sup> Annual IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts**. Montreal, Quebec, p.50-55, setembro, 2001.
86. BISHOP, R. Relay solves 42v arcing problems. **European Automotive Design**. Franks Hall, v.5, n.7, p.78, setembro 2001.
87. DIEZ, T. P. et al. Transient voltage characterization for automotive 42 volts power systems. **Proceedings of the 2000 IEEE EMC International Symposium**. Washington, D.C., p.921-926, agosto, 2000.
88. SCHRAMM, D. et al. 14/42v – electrical power supply systems consequences for electrical interconnections and switches. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3055.

89. SAKIYAMA, K. et al. A new connector for 42v automotive electrical system. **SAE 2001 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2001. SAE paper 2001-01-0724.
90. WILLIAMS, G. A. et al. "Getting the best out of 12 volts" The development of an advanced electrical architecture vehicle. **SAE International Congress and Exposition**. Detroit, Michigan, fevereiro, 1994. SAE paper 940368.
91. WILLIAMS, G. A. et al. The challenges and oportunities for electrical power systems. **Automotive Electronics**. Londres, Londres, maio, 1994. Paper C481/027/94.
92. WILLIAMS, A. et al. Advanced electrical arctecture vehicle development. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.103, n.2, p.101-105 fevereiro 1995.
93. MILLER, J. M. A proposal for electric power plant for future ice powered vehicles. **Proceedings of IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation**. Dearborn, Michigan, p.13-20, outubro, 1996.
94. MASRUR, M. A. et al. Can an ac (alternating current) electrical system replace the present dc system in the automobile? An investigative feasibility study - part I: system architecture. **IEEE Transaction on Vehicular Technology**, New York, v.47, n.3, p.1072-1080, agosto 1998.
95. MASRUR, M. A. et al. Can an ac (alternating current) electrical system replace the present dc system in the automobile? An investigative feasibility study - part II: Comparison and tradeoffs. **IEEE Transaction on Vehicular Technology**. New York, v.47, n.3, p.1081-1086, agosto 1998.
96. MILLER, J.; NICASTRI, P. R. The next generation automotive electrical power system architecture: issues and challenges. **Proceeding of the 17<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference on Air, Space and Ground Vehicle Electronic Systems**. Bellevue, Warren, p.115-1-115-8, outubro, 1998.
97. GORDON, J. More power. **Aftermarket Business**, Cleveland, v.112, n.7, p.32-36, julho 2002.
98. ALTES, J. M. et al. Analysis of the most appropriate electrical architecture and communications bus for the new dual voltage 14/42v system. **Proceeding of the 28<sup>th</sup> Annual Conference of the Industrial Electronics Society**. Sevilha, Espanha, p.1687-1692. novembro. 2002.
99. NICASTRI, A.; HUANG, H. Jump starting 42v powernet vehicles. **Proceeding of the 18<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference on Air, Space and Ground Vehicle Electronic Systems**. St. Louis, Missouri, p.8.A.6-1-8.A.6-10, outubro, 1999.

100. NICASTRI, P.; HUANG, H. 42V powernet: providing the vehicle electrical power for the 21<sup>st</sup> century. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3050.
101. TOWNSEND, P. G. et al. A new 12 volt automotive connection. **SAE International Congress and Exposition**. Detroit, Michigan, fevereiro, 1997. SAE paper 971125.
102. BIGORRA, J. et al. Innovative electrical and electronic architecture for vehicles with dual voltage power networks. In-vehicle application. **SAE 2000 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2000. SAE paper 2000-01-0452.
103. HADELER, R; MATHONY, H. J. Design of intelligent body networks. **SAE 2000 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2000. SAE paper 2000-01-0152.
104. FRANK, R. Towards the intelligent power network. **SAE Convergence 2002**. Detroit, Michigan, outubro, 2002. SAE paper 2002-21-0060.
105. GAARDER, E. H.; BORREGARD, R. C. Simulation of higher voltage vehicles to optimize performance. **SAE Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2001. SAE paper 2001-01-2498.
106. AN, F. et al. Near-term fuel economy potential for light-duty trucks. **2002 Future Car Congress**. Arlington, Virginia, junho, 2002. SAE paper 2002-01-1900.
107. TAMAI, G. et al. Saturn engine stop-start system with an automatic transmission. **SAE 2001 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2001. SAE paper 2001-01-0326.
108. DIEM, B. 42 volts. **Automotive Engineer Journal**, Londres, v.24, n.6, p.82-83, junho 1999.
109. KOZLOWSKI, F.; HENGSTENBERGER, H. Compact starter-alternator systems with high efficiency for 42v and 12v. **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-0522.
110. FATTIC, G. et al. Cold starting performance of a 42-volt integrates starter generator system. **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-0523.
111. GAO, Y.; EHASNI, M. A mild hybrid drive train for 42 v automotive power system – design, control and simulation. **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-1082.
112. FTP75, “1975 Federal Test Procedure for light-duty vehicles”, **Federal Register**, v.40, n.126, part III, 1975.

113. ITAGAKI, K. et al. Development of Toyota mild-hybrid system (THS-M). **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-0990.
114. KUSUMI, H. et al. 42V power control system for mild hybrid vehicle (MHV). **SAE 2002 World Congress**. Detroit, Michigan, março, 2002. SAE paper 2002-01-0519.
115. SHARKE, P. Power of 42. **Mechanical Engineering**, New York, v.124, n.4, p.40-42, abril 2002.
116. SPILLANE, D. et al. Supervisory control of a hv integrated starter-alternator with ultracapacitor support within the 42 v automotive electrical system. **Proceedings of the 18<sup>th</sup> Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition**. New Orleans, Los Angeles, v.3, p.1111-1117, fevereiro, 2003.
117. PIAZZA, M. C. et al. EMC in dual voltage vehicle electrical system: experimental investigation of transient disturbance problems and comparison with conventional 14 v electrical systems behaviour. **Proceeding of the 28<sup>th</sup> Annual Conference of the Industrial Electronics Society**. Sevilha, Espanha, p.1734-1739, novembro, 2002.
118. DANIELS, J. It's all about power and control. **European Automotive Design**, Franks Hall, v.6, n.6, p.52-54, junho 2002.
119. BROGE, J. L. Concentrados na eletrônica. **Engenharia Automotiva e Aeroespacial**, São Paulo, v.2, n.8, p.44-46, dezembro 2001.
120. CARNEY, D. Tecnologia do caminhão híbrido elétrico da GM. **Engenharia Automotiva e Aeroespacial**, São Paulo, v.2, n.8, p.49-50, dezembro 2001.
121. BISHOP, R. Motor winding advance boosts IMA output. **European Automotive Design**, Franks Hall, v.6, n.6, p.4, junho 2002.
122. BIRCH, S. Ricardo + valeo = I-mogen. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.111, n.2, p.69-70, fevereiro 2003.
123. CORBETT, B. No flick of the switch. **WARD's AutoWorld**, Overland Park, v.37, n.4, p.50-50, abril 2001.
124. WINTER, D. Are cars getting too complicated? **WARD's AutoWorld**, Overland Park, v.38, n.3, p.26-31, março 2002.
125. CHIN, S. 42v vehicle systems hit cost roadblock. **EBN**, Manhasset, n.1329, p.31-34, setembro 2002.
126. ADCOCK, I. Bigger, stronger... later. **European Automotive Design**, Franks Hall, v.6, n.7, p.28-30, agosto 2002.

127. DEFFREE, S. Gearing up to 42V. **Electronic News**, Massachusetts, v.48, n.48, p.1-3, novembro 2002.
128. EMADI, A. Low-voltage switched reluctance machine based traction systems for lightly hybridized vehicles. **SAE Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2001. SAE paper 2001-01-2507.
129. DENTON, D. S. Variable shift schedule control for integrated starter generator equipped hybrid vehicles. **SAE Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2001. SAE paper 2001-01-2496.
130. WEST, J. G. W. DC, induction, reluctance and pm motors for electric vehicles. **Power Engineering Journal**, New York, v.8, n.2, p.77-88, abril 1994.
131. FAHIMI, B. et al. On the suitability of switched reluctance motor drives for 42 volts super high speed operation: application to automotive fuel cells. **Proceeding of the 27<sup>th</sup> Annual Conference of the Industrial Electronics Society**, Denver, Colorado, p.1947-1952, v.3, novembro 2001.
132. YAMAGUCHI, J. Leading the way – fuel cell vehicles from Toyota and Honda are hitting the streets for customer use in both Japan and the U.S.. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.111, n.3, p.54-58, março 2003.
133. KRANTZ, B. New sell for fuel cell – GM and Opel boast world's most advanced 'road-going' fuel cell vehicle. **WARD's AutoWorld**, Overland Park, v.36, n.8, p.54-56, agosto 2000.
134. RAJASHEKARA, K. et al. Comparative study of new on-board power generation technologies for automotive applications. **Proceedings of IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation**, Auburn Hills, Michigan, p.3-10, outubro 2002.
135. HUSTED, H. L. Dual-voltage electrical system with a fuel cell power unit. **SAE Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3067.
136. LEONARDI, F.; DEGNER, M. Integrated starter generator based HEVs: a comparison between low and high voltage systems. **Proceedings of the IEEE International Electrical Machines and Drives Conference**, Cambridge, Massachusetts, p.622-628, junho 2001.
137. EMADI, A. et al. Advanced silicon rich automotive electrical power systems. **Proceeding of the 18<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference on Air, Space and Ground Vehicle Electronic Systems**. St. Louis, Missouri, p.8.B.1-1-8.B.1-8, outubro, 1999.
138. EMADI, A. et al. On the suitability of low-voltage (42v) electrical power system for traction application in the parallel hybrid electric vehicles. **SAE Future Car Congress**. Arlington, Virginia, abril, 2000. SAE paper 2000-01-1558.

139. MILLER, J. M. et al. Starter-alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives. **Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Annual IEEE Industry Applications Conference**, New York, New York, p.513-523, outubro 1998.
140. SEPE, R. B. et al. High efficiency operation of a hybrid electric vehicle starter/generator over road profiles. **Proceedings of the 36<sup>th</sup> Annual IEEE Industry Applications Conference**, New York, New York, p.921-925, setembro 2001.
141. JOST, K. Autonomy – General Motors stunned the North American International Auto Show audience with a fuel cell concept intended to revolutionize the way vehicles are designed, built, and operated. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.110, n.2, p.35-37, fevereiro 2002.
142. BIRCH, S. Driving the hy-wire – GM's Larry Burns sees the alliance of fuel cell and by-wire technologies as an essential element in the development of tomorrow's vehicles. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.111, n.4, p.105-108, abril 2003.
143. KEENEY, R.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1976.
144. CHANKONG, V.; HAILES, Y. **Multiobjective decision making: theory and methodology**. New York: Elsevier Science Publishing Co. Inc., 1983.
145. GOODWIN, P.; WRIGHT, G. **Decision analysis for management judgment**. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 1991.
146. KAMINSKI, P. C. Projeto básico, ou anteprojeto. In: KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000. P.37-45.
147. SHIMIZU, T. Decisão sem risco, com múltiplos objetivos e múltiplos cenários. In: SHIMIZU, T. **Decisão nas organizações** – introdução aos problemas de decisão encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2000. P.286-293.
148. ENSSLIN, L. et al. **Apoio à decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**. Florianópolis: Insular, 2001.
149. SOUZA, G. F. M. Confiabilidade de produtos e sistemas. São Paulo: PME/EPUSP, 2002. / Apostila da disc. de Confiabilidade de Produtos e Sistemas /