

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

Fernando de Brito Santos
General Motors do Brasil

Prof. Dr. Carlos Antonio França Sartori
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este artigo apresenta 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 o sistema elétrico em 12V / 14V CC. Apresenta-se, assim, uma revisão da literatura sobre este tema.

As características técnicas das arquiteturas para aplicação de tais sistemas elétricos, propostas na literatura disponível, são apresentadas, e os diferentes pontos de vista, relacionados à adoção desta nova tecnologia, são considerados no desenvolvimento deste artigo.

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

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 foi a implementação de um dispositivo que gerasse uma descarga elétrica dentro da câmara de combustão [1].

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

Lâmpadas a óleo e acetileno eram amplamente utilizadas, sendo posteriormente substituídas por incandescentes nos novos modelos de automóveis. As baterias empregadas eram do tipo secas e chumbo-ácido, sendo necessária sua troca ou recarga em locais específicos, devido à ausência de geradores CC para fins automotivos [1].

Em 1912, com o desenvolvimento dos primeiros motores de partida elétricos pela *Dayton Electrical Laboratory Company* (DELCO), o primeiro veículo com partida elétrica foi lançado e uma nova era na história do sistema elétrico automotivo se iniciou. Nesta mesma época, os primeiros geradores de CC, com tensão nominal em 7V, foram desenvolvidos com o objetivo de fornecer energia para os sistemas de iluminação, ignição e para a carga da bateria [2].

Por volta de 1955, o desenvolvimento de um MCI V8 de alta taxa de compressão foi responsável pela transição do sistema elétrico em 6V/7V CC para 12V/14V CC, devido a crescente necessidade de um sistema de ignição mais confiável, face aos requisitos mais exigentes de energia durante a partida dos novos motores [3].

Nos dias atuais, aproximadamente cinco décadas após a implementação do sistema elétrico em 12V/14V CC, vive-se um cenário semelhante. A fim de ilustrar este fato, a *Figura 1 – Consumo elétrico nos veículos* reproduz, para o período de 1970 até 2010, a evolução e a expectativa de potência consumida nos veículos automotores [4].

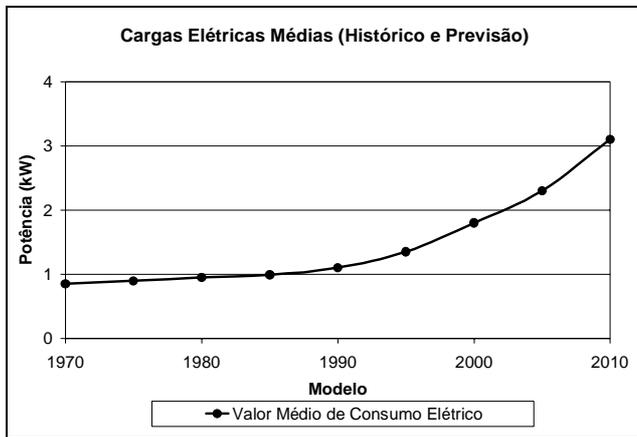


Figura 1. Consumo elétrico nos veículos [4]

Dentre os fatores que contribuem para a crescente demanda por energia nos últimos projetos de automóveis, um dos maiores, certamente, é a substituição de sistemas mecânicos ou hidráulicos por sistemas elétricos [4]. Como exemplo, citam-se os sistemas de freios ABS e os sistemas *break-by-wire*, *drive-by-wire* e *steer-by-wire*.

Prevê-se, desta forma, que a demanda por energia elétrica nos veículos automotores superará a capacidade de geração de um alternador do tipo Lundell 14V CC [5]. Na busca de possíveis soluções para este desafio, o aumento da tensão do sistema elétrico dos automóveis, apresenta-se como uma solução atraente, entretanto complexa.

Desde o início dos anos 90, Institutos e Sociedades internacionais, como o MIT (*Industry consortium on advanced automotive electrical / electronic components and systems*) e a SAE (*Dual / higher voltage study group*), vêm promovendo encontros entre os fabricantes de veículos e os principais fornecedores automotivos. Dentre os principais estudos publicados a partir destes fóruns, destaca-se o estabelecimento do barramento de tensão em 42V CC como o futuro padrão para o setor automotivo, bem como a definição da faixa de regulação da tensão deste barramento [4]-[6].

Finalmente, destacam-se dois fatores que possuem elevado peso na decisão da eventual transição do sistema elétrico automotivo: Redução no consumo de combustível, que pode ser obtida através do aumento da eficiência dos equipamentos elétricos atuais, e a conformidade com as leis ambientais, obtida através do controle de emissões de poluentes [7].

O barramento de tensão em 42V CC permitiria disponibilizar meios para alcançar os objetivos citados, através da introdução de novos equipamentos elétricos nos automóveis.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste artigo tem como objetivo avaliar as diversas arquiteturas propostas, atualmente, para o sistema elétrico automotivo, entre estas os sistemas elétricos em 42V CC.

Primeiramente, serão abordados os critérios que conduziram a definição de índices de mérito. Em seguida, os índices de mérito serão definidos. Por fim, será apresentada uma breve descrição do método a ser aplicado na avaliação das arquiteturas propostas para o sistema elétrico automotivo.

CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DOS ÍNDICES DE MÉRITO – Um dos principais aspectos considerados na definição dos índices de mérito foi a evolução histórica da tecnologia dos sistemas elétricos automotivos. Tais aspectos, amplamente encontrados na literatura existente, conduziram à definição dos critérios utilizados para a proposição dos índices de mérito. Assim, os índices de mérito incluem os principais fatores atualmente exigidos pelos consumidores, além de outros fundamentados na experiência profissional de membros da indústria automobilística.

Embora exista a possibilidade de considerar diversos índices de mérito nesta avaliação, apresenta-se na Tabela 1 alguns pré-selecionados devido a sua grande importância nos dias atuais [8].

Tabela 1. Definição dos índices de mérito

Área de Interesse	Índice de Mérito
Mercado	Custo agregado
	Consumo de combustível <i>Payback</i>
Qualidade	Confiabilidade
Engenharia	Requisitos de compatibilidade eletromagnética (CEM)
Regulamentação	Redução na emissão de poluentes
Aspectos Estratégicos	Expansibilidade

DEFINIÇÃO DOS ÍNDICES DE MÉRITO – Uma vez introduzidos os índices de mérito, segue uma breve definição de cada índice, com o objetivo de permitir sua diferenciação na avaliação das arquiteturas para o sistema elétrico automotivo.

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.

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*.

Payback – 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.

Confiabilidade – Refere-se a 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 [9].

Requisitos de Compatibilidade Eletromagnética – 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 à CEM como, por exemplo, níveis de imunidade e de emissão conduzida e irradiada.

Redução na Emissão de Poluentes – Refere-se a possibilidade de reduzir a emissão de poluentes de um veículo através da utilização de um sistema elétrico formado pela arquitetura elétrica em avaliação.

Expansibilidade – Refere-se a capacidade de expandir o sistema elétrico de um veículo, equipado com a arquitetura elétrica em avaliação, no sentido de introduzir novos equipamentos elétricos, mantendo-se a tecnologia de geração de energia inalterada.

MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DAS ARQUITETURAS – O método selecionado para a avaliação das arquiteturas deve considerar a existência de índices de mérito representados por variáveis técnicas qualitativas, além de quantitativas, uma vez que os índices de mérito selecionados contemplam tal característica.

Dentre os métodos de apoio à decisão existentes na literatura, destaca-se o método de agregação aditiva por permitir a avaliação de todas as arquiteturas simultaneamente, através da somatória do valor que cada índice de mérito representa em cada alternativa [10]. O desempenho global de uma arquitetura é calculado através de uma fórmula de agregação aditiva, dada por:

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

onde:

$V(a)$ → Desempenho global da arquitetura a .

$v_1(a), \dots, v_n(a)$ → Desempenho local da arquitetura a nos índices de mérito 1, ..., n.

w_1, \dots, w_n → Taxa de substituição dos índices de mérito 1, ..., n.

n → Número de índices de mérito do modelo.

A equação 1 fornece a soma ponderada dos desempenhos locais obtidos por uma determinada arquitetura nos diversos índices de mérito, sendo que a ponderação é feita através das taxas de substituição de cada índice de mérito.

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

Função de Valor – Uma função de valor pode ser definida como uma ferramenta utilizada como auxílio na articulação de preferências, de forma numérica, permitindo avaliar alternativas segundo um determinado ponto de vista [11].

O método da pontuação direta foi adotado neste artigo para a obtenção das funções de valor devido a sua simplicidade, rapidez e ausência de transformações matemáticas que possam afetar os resultados a serem obtidos [10]. Assim, a seguir são mostradas as funções de valor (v_i) para cada índice de mérito do modelo proposto.

Tabela 2. Função de valor – Custo agregado

Descrição	v_i
Custo inferior ao sistema elétrico em 14V CC	1,00
Custo até 50% superior ao sistema elétrico em 14V CC	0,50
Custo superior a 100% do sistema elétrico em 14V CC	0

Tabela 3. Função de valor – Consumo de combustível

Descrição	v_i
Consumo inferior a 80% do sistema elétrico em 14V CC sem auxílio de equipamentos adicionais	1,00
Consumo inferior até 80% do sistema elétrico em 14V CC	0,50
Consumo superior ao sistema elétrico em 14V CC	0

Tabela 4. Função de valor – Payback

Descrição	v_i
Payback de um ano	1,00
Payback até três anos	0,50
Payback maior do que três anos	0

Tabela 5. Função de valor – Confiabilidade

Descrição	v_i
Faz uso de componentes conhecidos, com redundância e dispositivos de proteção	1,00
Faz uso de componentes conhecidos, sem redundância	0,50
Faz uso de componentes novos, sem redundância	0

Tabela 6. Função de valor – Requisitos de CEM

Descrição	v_i
Nível de IEM equivalente ao sistema elétrico em 14 CC	1,00
Requer adição de dispositivos supressores	0,50
Nível de IEM incompatível com os requisitos de CEM	0

Tabela 7. Função de valor – Redução na emissão de poluentes

Descrição	v_i
Emissões inferiores a 80% do sistema elétrico em 14V CC	1,00
Emissões equivalentes ao sistema elétrico em 14V CC	0,50
Emissões superiores ao sistema elétrico em 14V CC	0

Tabela 8. Função de valor – Expansibilidade

Descrição	v_i
Facilmente expansível	1,00
Requer alterações moderadas no sistema instalado	0,50
Requer desenvolvimento de nova tecnologia	0

Taxa de Substituição – As taxas de substituição podem ser definidas como parâmetros que agregam, de forma compensatória, desempenhos locais em um desempenho global [12].

O método *swing weights* foi adotado neste artigo para a obtenção das taxas de substituição devido a sua simplicidade e rapidez [10]. Deste modo, a Tabela 9 ilustra os valores das taxas de substituição.

Avaliação das Alternativas – Uma vez obtidos os desempenhos locais de todas as arquiteturas, através das funções de valor, aplica-se a equação 1 para o cálculo de seus respectivos desempenhos globais, com base das taxas de substituição definidas.

Tabela 9. Taxas de substituição

Índice de Mérito	Taxa de Substituição	
	Relativa	Normalizada (w_i)
Custo agregado	1,0	0,175
Consumo de combustível	0,8	0,140
<i>Payback</i>	0,9	0,158
Confiabilidade	0,8	0,140
Requisitos de CEM	0,7	0,123
Redução na emissão de poluentes	0,7	0,123
Expansibilidade	0,8	0,140
Somatória:	5,7	1,00

Análise de Sensibilidade – A análise de sensibilidade indica a robustez do modelo de avaliação construído frente a alterações nos parâmetros do mesmo [11]. Assim, o objetivo desta avaliação neste artigo será estudar a estabilidade das respostas do modelo perante variações de $\pm 10\%$ nas taxas de substituição.

Ressalta-se que a análise de sensibilidade será executada através de dois métodos: um de forma numérica e outro de forma gráfica [10]. O método numérico estabelece a definição de um índice de mérito que possuirá sua taxa de substituição alterada em $\pm 10\%$, por exemplo. As demais taxas de substituição devem ser recalculadas, de forma a manter a proporcionalidade entre elas, através da seguinte equação:

$$w'_i = w_i \cdot \left[\frac{(1 - w'_s)}{(1 - w_s)} \right] \quad (2)$$

onde:

$w'_i \rightarrow$ Taxa de substituição recalculada para o índice i .

$w_i \rightarrow$ Taxa de substituição original do índice i .

$w'_s \rightarrow$ Nova taxa de substituição para o índice definido.

$w_s \rightarrow$ Taxa de substituição original do índice definido.

De posse das taxas de substituição recalculadas, aplica-se a equação 1 para a obtenção dos novos desempenhos globais de todas as arquiteturas. O modelo será considerado robusto, caso o resultado final não se modifique significativamente, em decorrência da variação das taxas de substituição.

Já o método gráfico estabelece a construção de retas para a representação do desempenho global de cada arquitetura. Cada reta será definida por dois de seus pontos, sendo um deles formado pela taxa de substituição original do índice de mérito definido para a análise, e o outro com seu valor alterado para um, caso particular onde o desempenho global se iguale ao desempenho local das arquiteturas [10]. De posse das coordenadas, traça-se um gráfico onde as abscissas representam a taxa de

substituição do índice definido e as ordenadas representam o desempenho global das arquiteturas.

ARQUITETURAS

As arquiteturas selecionadas para a análise proposta encontram-se disponíveis, de forma abrangente, na literatura disponível. Assim, as arquiteturas elétricas sugeridas pelos principais Institutos e Sociedades internacionais serão consideradas neste artigo.

Novamente, embora exista uma grande quantidade de propostas para as arquiteturas elétricas, a seguir serão apresentadas somente aquelas consideradas mais atrativas, utilizando-se a simbologia descrita na Tabela 10 [8].

Tabela 10. Simbologia para representação das arquiteturas elétricas

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

ARQUITETURA 1 – A arquitetura elétrica ilustrada pela Figura 2 – Arquitetura elétrica proposta por Becker e Dwyer se destaca pela sua simplicidade e por ser a primeira a utilizar o barramento de tensão em 42V CC [13], [14].

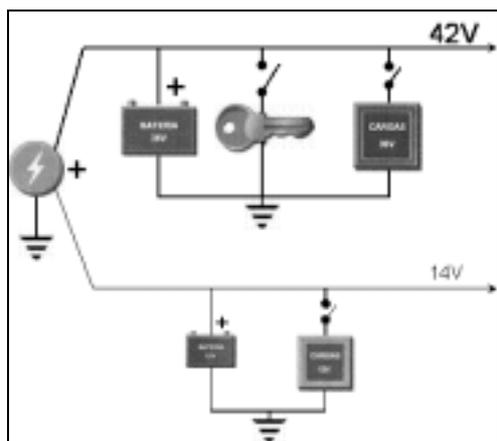


Figura 2. Arquitetura elétrica proposta por Becker e Dwyer [13], [14]

ARQUITETURA 2 – A arquitetura elétrica ilustrada pela Figura 3 – Arquitetura elétrica proposta por Miller, Silva e Huang se destaca por ser a primeira a utilizar o conceito de alternador e motor de partida integrados (AMPI), além

de ser considerada por diversos autores uma das arquiteturas mais atrativas [5], [6], [15].

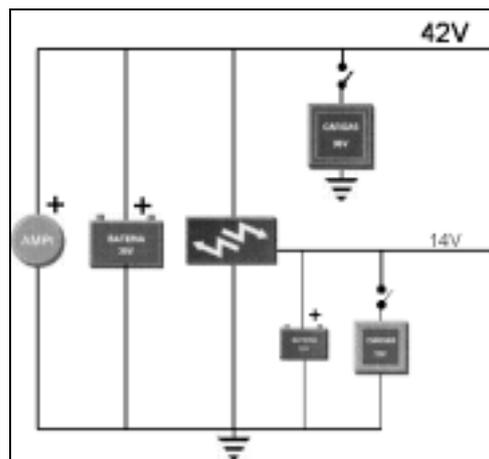


Figura 3. Arquitetura elétrica proposta por Miller, Silva e Huang [5], [6], [15]

ARQUITETURA 3 – A arquitetura elétrica ilustrada pela Figura 4 – Arquitetura elétrica proposta por Kassakian e Altes se diferencia da arquitetura anterior através da eliminação da bateria de 12V, com o conseqüente projeto do conversor CC-CC pelo valor de pico da demanda de energia no barramento de 14V CC [16], [17].

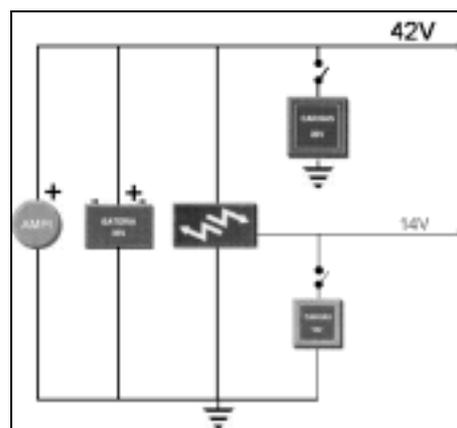


Figura 4. Arquitetura elétrica proposta por Kassakian e Altes [16], [17]

ARQUITETURA 4 – A arquitetura elétrica ilustrada pela Figura 5 – Arquitetura elétrica proposta por Nicastrì se diferencia das demais arquiteturas por possuir um único barramento de tensão, obrigando a adequação de todos os dispositivos elétricos à tensão de 42V CC [4].

ARQUITETURA 5 – A arquitetura elétrica ilustrada pela Figura 6 – Arquitetura elétrica de grande parte dos veículos atuais foi incluída na avaliação para fornecer os parâmetros necessários de modo a diferenciar as diversas arquiteturas perante uma referência conhecida. Assim, todas as arquiteturas poderão ser avaliadas pelos índices de mérito em termos absolutos, e, em termos relativos, através da referência representada por esta arquitetura.

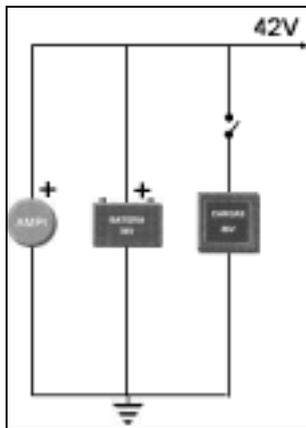


Figura 5. Arquitetura elétrica proposta por Nicastrì [4]

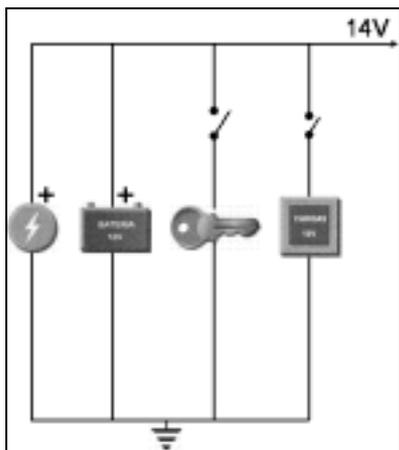


Figura 6. Arquitetura elétrica de grande parte dos veículos atuais

RESULTADOS

AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS – A Tabela 11 ilustra os desempenhos locais e globais das arquiteturas, obtidos, respectivamente, através das funções de valor e da equação 1.

Tabela 11. Desempenho global das arquiteturas

Índices de mérito	Taxa de substituição	Arquitetura 1	Arquitetura 2	Arquitetura 3	Arquitetura 4	Arquitetura 5
Custo agregado	0,175	0,5	0,6	0,7	0,3	1,0
Consumo de combustível	0,140	0,4	1,0	1,0	1,0	0,3
Payback	0,158	0,3	0,5	0,6	0,2	0,7
Confiabilidade	0,140	0,3	0,6	0,6	0,6	1,0
Requisitos de CEM	0,123	0,8	0,7	0,7	1,0	1,0
Redução na emissão de poluentes	0,123	0,7	1,0	1,0	1,0	0,3
Expansibilidade	0,140	0,9	1,0	1,0	1,0	0,7
$V(a)$		0,57	0,76	0,79	0,69	0,73

A Figura 7 – Desempenho global das arquiteturas, por outro lado, ilustra, de forma gráfica, o mesmo resultado obtido anteriormente, permitindo uma melhor comparação entre os desempenhos globais das arquiteturas.

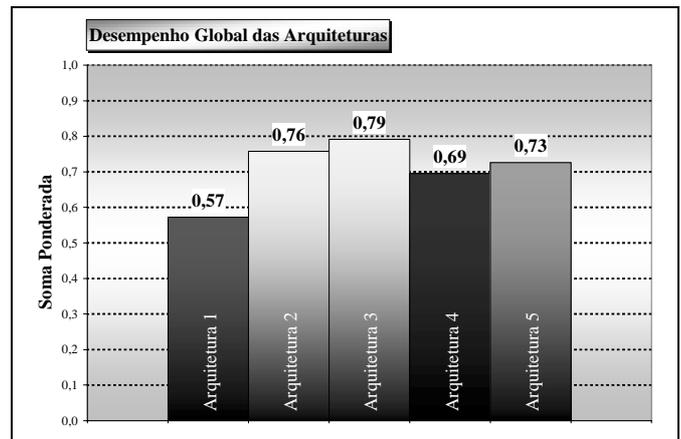


Figura 7. Desempenho global das arquiteturas

Já a Figura 8 – Desempenho local das arquiteturas, ilustra o resultado de uma comparação direta entre as avaliações locais das arquiteturas perante os índices de mérito, agrupados conforme sua área de interesse.

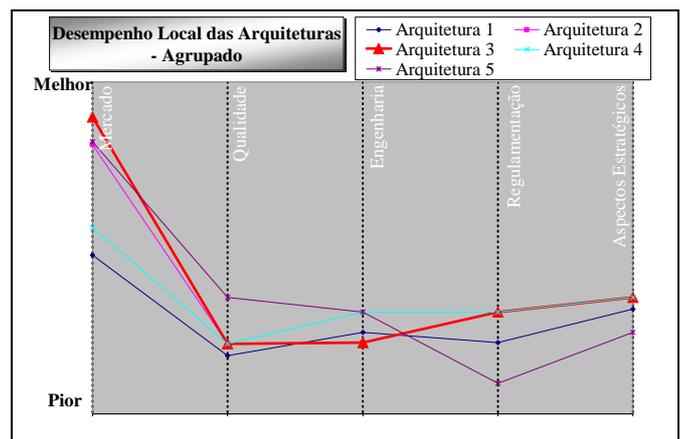


Figura 8. Desempenho local das arquiteturas

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – O índice de mérito custo agregado foi selecionado para a execução da análise de sensibilidade através dos métodos propostos, pois representa o índice mais significativo, conforme os dados da Tabela 9. Assim, para a análise numérica de sensibilidade, a taxa de substituição deste índice de mérito terá seu valor modificado em $\pm 10\%$, exigindo o cálculo das novas taxas de substituição para os demais índices de acordo com a equação 2. A Tabela 12 mostra os resultados destes cálculos.

Já a Tabela 13, mostra os novos valores do desempenho global das arquiteturas, quando a taxa de

substituição do índice de mérito custo agregado apresenta uma variação de $\pm 10\%$.

Tabela 12. Variação nas taxas de substituição

Índices de mérito	Taxa de substituição		
	Original	+10%	-10%
Custo agregado	0,175	0,193	0,158
Consumo de combustível	0,140	0,137	0,143
Payback	0,158	0,155	0,161
Confiabilidade	0,140	0,137	0,143
Requisitos de CEM	0,123	0,120	0,125
Redução na emissão de poluentes	0,123	0,120	0,125
Expansibilidade	0,140	0,137	0,143
Total	1,00	1,00	1,00

Tabela 13. Análise numérica de sensibilidade – Desempenhos globais

$V(a)$	Desempenho global com taxa de substituição		
	Original	+10%	-10%
Arquitetura 1	0,572	0,570	0,573
Arquitetura 2	0,758	0,755	0,761
Arquitetura 3	0,791	0,789	0,793
Arquitetura 4	0,695	0,686	0,703
Arquitetura 5	0,726	0,732	0,720

A Figura 9 – Resultado da análise numérica de sensibilidade ilustra, de forma gráfica, o mesmo resultado obtido anteriormente, permitindo uma melhor comparação entre os desempenhos globais das arquiteturas.

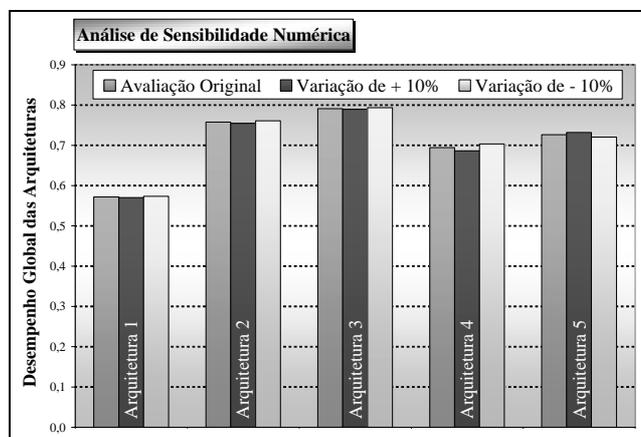


Figura 9. Resultado da análise numérica de sensibilidade

Já com relação ao método gráfico da análise de sensibilidade, seguindo-se o procedimento descrito anteriormente, obtém-se as coordenadas dos pontos que formam as retas que, por sua vez, representam o desempenho global das arquiteturas. A Tabela 14 mostra o resultado deste processo.

A Figura 10 – Resultado da análise gráfica de sensibilidade ilustra o resultado desta análise, incluindo algumas referências como, por exemplo, os pontos de intersecção entre os desempenhos globais das arquiteturas e a situação da análise proposta por este artigo, representada pela taxa de substituição original do índice de mérito custo agregado.

Tabela 14. Análise gráfica de sensibilidade – Desempenhos globais

	$V(a)$ (com taxa de substituição original)	$V(a)$ (com taxa de substituição do índice custo agregado igual a um)
Arquitetura 1	0,572	0,500
Arquitetura 2	0,758	0,600
Arquitetura 3	0,791	0,700
Arquitetura 4	0,695	0,300
Arquitetura 5	0,726	1,00

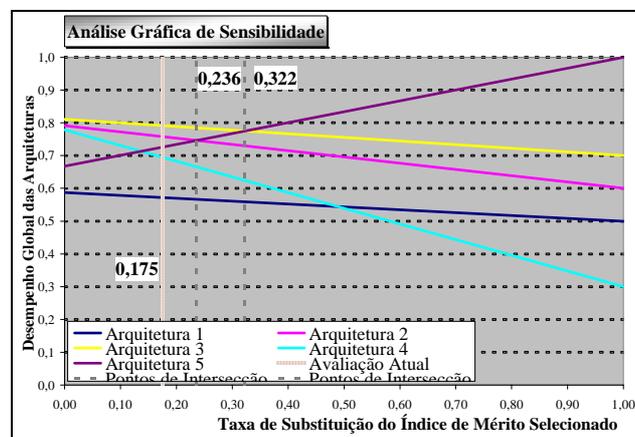


Figura 10. Resultado da análise gráfica de sensibilidade

DISCUSSÃO

O resultado do método de agregação aditiva, utilizado neste artigo, indica que a arquitetura 3 representa a alternativa mais atrativa, dentre as disponíveis, com base nos parâmetros do modelo de avaliação construído.

A arquitetura 3 é formada por um sistema elétrico com duplo barramento de tensão (14V CC e 42V CC), que são conectados entre si através de um conversor CC-CC. Esta arquitetura utiliza somente uma bateria, conectada ao barramento de 42V CC.

Esta arquitetura foi concebida originalmente como uma variante da arquitetura 2 com o objetivo de possuir um custo agregado inferior. Atualmente, algumas montadoras como, por exemplo, a Toyota possuem veículos com esta configuração de sistema elétrico [7].

O resultado do método de análise proposto identificou, também, na terceira posição, a arquitetura 5, formada pelo sistema elétrico atualmente em uso nos veículos automotores (14V CC). A posição ocupada por este sistema elétrico, principalmente considerando o escopo deste artigo e as arquiteturas concorrentes, é justificado devido a recentes iniciativas relacionadas à expansão da capacidade de geração de energia dos alternadores do tipo Lundell [18].

Nas últimas colocações se encontram as arquiteturas 1 e 4. A arquitetura 4, apesar de representar, a princípio, a alternativa mais realista para os sistemas elétricos em 42V CC, é uma das menos atrativas devido ao elevado custo de adequação de todos os equipamentos elétricos atuais à este novo padrão de tensão. Já com relação à arquitetura 1, pode-se afirmar que o contínuo desenvolvimento de soluções mais eficientes para o sistema de geração de energia tornou esta alternativa menos atrativa.

A análise de sensibilidade executada no modelo construído indicou sua robustez, uma vez que seus resultados não foram significativamente alterados perante uma variação de $\pm 10\%$ na taxa de substituição do índice de mérito custo agregado. Com o auxílio de uma planilha de cálculo, é possível identificar que o resultado do modelo construído passa a se alterar a partir de uma variação de $+23\%$ no mesmo índice de mérito.

Ressalta-se, ainda, a grande importância do resultado da análise gráfica de sensibilidade como ferramenta de visualização do resultado do modelo construído. De início, pode-se identificar diretamente as arquiteturas mais atrativas através dos pontos de intersecção entre as retas que representam as arquiteturas e uma reta que representa o valor da taxa de substituição do índice de mérito selecionado para a análise, neste caso, o índice custo agregado.

Por outro lado, ao forçar uma variação positiva da taxa de substituição do índice de mérito custo agregado, nota-se que o desempenho global da arquitetura 3 é reduzido até que se iguale ao desempenho global da arquitetura 5, quando a taxa de substituição deste índice é igual a 0,322. Isto significa que para taxas de substituição do índice de mérito custo agregado superiores a 0,322, o modelo construído passa a identificar a arquitetura 5 como a mais atrativa, uma vez que este índice de mérito se torna mais desejável.

CONCLUSÃO

Os principais aspectos técnicos relacionados às novas tecnologias e arquiteturas elétricas aplicáveis aos veículos automotores foram apresentados, assim como uma breve revisão da literatura sobre a aplicação de 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 os diferentes pontos de vista, relacionados a este tema, foram considerados durante a aplicação da metodologia proposta.

Os índices de mérito considerados neste artigo foram apresentados e justificados devido ao seu elevado grau de importância nos dias atuais. As funções de valor, as taxas de substituição e o próprio método de agregação aditiva, da mesma forma, também, foram apresentados.

O método de agregação aditiva, utilizado na avaliação das arquiteturas, foi selecionado devido a sua capacidade de avaliar simultaneamente diversas alternativas, através de parâmetros qualitativos. Tal método se mostrou muito eficiente por permitir uma avaliação dinâmica da análise proposta perante qualquer modificação dos 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 construído é consistente e seu resultado indica a tendência de arquitetura elétrica a ser eventualmente adotada para o sistema elétrico automotivo.

Apesar da robustez e consistência do modelo construído e da importância dos índices de mérito selecionados, convém ressaltar que não existe uma solução definitiva para o tema em questão. A metodologia adotada é apenas uma ferramenta que propicia uma abordagem sistemática sobre as diversas propostas de arquiteturas para o sistema elétrico automotivo, com base nos principais critérios considerados na literatura.

Ressalta-se, por fim, que a proposta apresentada neste artigo engloba uma parte da quantidade substancial de opções disponíveis para o estudo de sistemas elétricos em 42V CC. Na literatura existente é possível encontrar estudos semelhantes ao proposto por este artigo, que consideram uma maior quantidade de índices de mérito e arquiteturas para a construção do modelo de apoio à decisão [8].

SUGESTÕES 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 se complementar este artigo, 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 vários possíveis cenários 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, resultando em uma análise mais abrangente, com a possibilidade de considerar fatores externos ao estudo como, por exemplo, oscilações da economia mundial.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [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] Miller, J. M. Multiple voltage electrical power distribution system for automotive applications. **Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**, Washington, D.C., v.3, p.1930-1937, agosto 1999.
- [4] Nicastrì, P.; Huang, H. 42V powernet: providing the vehicle electrical power for the 21st century. **Future Transportation Technology Conference**. Costa Mesa, California, agosto, 2000. SAE paper 2000-01-3050.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Santos, Fernando B. **Uma contribuição para a avaliação das novas tecnologias e arquiteturas para o sistema elétrico automotivo**. 2004. 172p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- [9] Souza, G. F. M. Confiabilidade de produtos e sistemas. São Paulo: PME/EPUSP, 2002. / Apostila da disc. de Confiabilidade de Produtos e Sistemas /
- [10] Ensslin, L. et al. **Apoio à decisão**: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas. Florianópolis: Insular, 2001.
- [11] Keeney, R.; Raiffa, H. **Decisions with multiple objectives**: preferences and value tradeoffs. New York: John Wiley & Sons Inc., 1976.
- [12] 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.

[13] Becker, J. Dual-voltage alternators. **SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition**. Toledo, Ohio, novembro, 1992. SAE paper 922488.

[14] 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).

[15] 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.

[16] Kassakian, J. G. Automotive electrical systems – the power electronics market of the future. **Proceedings of the 15th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition**. New Orleans, Los Angeles, p.3-9, fevereiro, 2000.

[17] 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 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society**. Sevilha, Espanha, p.1687-1692, novembro, 2002.

[18] Jost, K. IR high-output airr for maybach. **Automotive Engineering International**, Warrendale, v.111, n.4, p.56, abril 2003.

CONTATO

Autor: Fernando de Brito santos
General Motors do Brasil
Engenheiro de Produtos

Endereço: Av. Goiás, 2769
São Caetano do Sul – S.P. – Brasil
CEP: 09501-970

Telefone: (55-11) 4234-6116

Fax: (55-11) 4234-7272

Email: fernandobrito.santos@gm.com

Co-autor: Prof. Dr. Carlos Antonio França Sartori
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Endereço: Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 3, 158
Prédio da Engenharia Elétrica
São Paulo – S.P. – Brasil
ZIP: 05508-900

Telefone: (55-11) 3091-5415

Email: sartori@pea.usp.br
sartori@pucsp.br