

APLICAÇÃO DO TEOREMA DE MARKOWITZ PARA AVALIAÇÃO DE PORTFÓLIOS DE TECNOLOGIAS VEICULARES EM TERMOS DE EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO

Rodrigo de Freitas Santos¹, Viviane Tavares Nascimento²,
Miguel Edgar Morales Udaeta², Carlos Frederico Meschini Almeida², Erik Eduardo Rego³

¹ Dep. de Eng. de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP, rodrigofsantos@alumni.usp.br

² Dep. de Eng. de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP

³ Dep. de Eng. de Produção da Escola Politécnica da USP

RESUMO

Nos últimos anos tem havido um crescente interesse na adoção de veículos elétricos a bateria no mercado automotivo mundial, impulsionado pela busca por alternativas mais sustentáveis e eficientes em termos de energia. No contexto brasileiro, essa tendência também se torna relevante, dada a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e a busca por maior autonomia energética. Este artigo aborda a perspectiva de adoção de veículos elétricos a bateria no mercado brasileiro, em paralelo com outra tecnologia emergente: veículos híbridos plug-in flex a etanol. Será utilizado uma adaptação da teoria do portfólio de Markowitz para composições dessas duas opções de veículos, como solução para transição energética, considerando os benefícios de cada uma em termos de emissões de gases do efeito estufa e os correspondentes desvios-padrões.

Palavras-chave: Veículos elétricos. Veículos híbridos. Emissões. Markowitz.

1. INTRODUÇÃO

A transição para veículos mais sustentáveis e eficientes em termos de energia tem sido um tópico de grande relevância no setor automotivo global. Nos últimos anos, os veículos elétricos a bateria (VEB) têm ganhado destaque como uma alternativa promissora, impulsionada pela busca por redução das emissões de gases de efeito estufa e pela necessidade de maior autonomia energética. Nesse contexto, o mercado brasileiro também enfrenta o desafio de promover a adoção desses veículos e explorar outras tecnologias emergentes, como veículos híbridos plug-in flex a etanol - VEHP (TANURE, 2021).

Este artigo tem como objetivo aplicar o Teorema de Markowitz, também conhecido como modelo média-variância, para analisar a melhor composição dessas tecnologias no mercado brasileiro. Para isso, será utilizado uma adaptação da teoria do portfólio de Markowitz, tradicionalmente aplicada em investimentos financeiros, para compor uma abordagem que leve em consideração os benefícios de cada uma dessas opções de veículos

em termos de emissões de gases de efeito estufa e os correspondentes desvios-padrões, ou seja, o risco dessas emissões não se concretizarem.

O Teorema de Portfólio de Markowitz, desenvolvido pelo economista Harry Markowitz, é uma teoria fundamental no campo da gestão de investimentos. Essa teoria fornece um método para a seleção ótima de um portfólio de ativos financeiros, levando em consideração o equilíbrio entre risco e retorno. O modelo foi concebido durante a década de 1950 e aprimorado por discípulos como William Sharpe durante a década de 1960. Pelas contribuições, Markowitz e Sharpe receberam o prêmio Nobel de Economia em 1990.

O conceito central do teorema é a diversificação. Markowitz argumenta que, ao combinar diferentes ativos em um portfólio, é possível reduzir o risco total sem sacrificar o retorno esperado. A lógica por trás disso é que os diferentes ativos podem ter correlações entre si, ou seja, podem se comportar de maneiras distintas em diferentes condições de mercado. Ao combinar ativos com correlação negativa ou baixa correlação, as oscilações negativas de alguns ativos podem ser compensadas pelas oscilações positivas de outros, resultando em um portfólio mais estável (MARKOWICZ, 2014).

O teorema ainda estabelece que a seleção ideal de ativos deve ser baseada na relação entre o retorno esperado e o risco (medido pela variância ou desvio-padrão dos retornos). A ideia é construir um conjunto eficiente de portfólios que ofereça o maior retorno esperado para um determinado nível de risco, ou o menor risco para um determinado nível de retorno esperado. Essa relação entre risco e retorno é representada graficamente pela chamada "fronteira eficiente", que ilustra a combinação ótima de ativos para diferentes níveis de risco.

O presente artigo tem por objetivo avaliar a fronteira entre o valor estimado de emissão e seu risco de atingimento. O artigo não propõe escolher uma metodologia ou tecnologia preferencial, mas levantar diferentes portfólios das duas tecnologias descritas, considerando-se como retorno as emissões de CO₂ e o risco delas não se concretizarem.

É importante ressaltar que a correlação entre os ativos não é uma constante e pode mudar ao longo do tempo em resposta a fatores econômicos e de mercado. Portanto, a avaliação regular e atualizada da correlação é fundamental para a tomada de decisões informadas na construção e gestão de portfólios.

2. METODOLOGIA

Os autores entendem que a aplicação pode ser a diferentes veículos, entretanto, este artigo avaliou apenas veículos leves, nos quais as duas tecnologias estão mais consolidadas. Parte da metodologia consiste no trabalho de coleta de dados publicados e disponíveis on-line, especialmente de relatórios de governos e organizações especializadas sobre emissões veiculares e da rede de geração elétrica.

Para o levantamento da curva de fronteira eficiente são necessários que os dados de cada tecnologia para emissões de poluentes e seus desvios padrões (risco) estejam bem delineados:

2.1 Veículos Elétricos a Bateria (VEB)

As emissões operacionais de veículos elétricos a bateria correspondem às emissões da rede elétrica em que é abastecido. A rede elétrica brasileira, ou seja, o Sistema Interligado Nacional (SIN), segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações - MCTIC (2023), emitiu, através do seu fator médio anual de geração, no período de 2012 a 2021, os valores em tCO₂/MWh presentes na tabela 1.

Da tabela 1 obtemos uma média de emissão do SIN de 0,0933 tCO₂/MWh com desvio-padrão de 0,0254 tCO₂/MWh. Convertendo as unidades obtemos **93,3 gCO₂/kWh** de média e **25,4 gCO₂/kWh** de desvio-padrão.

Tabela 1. Emissões anuais do Sistema Interligado Nacional.

Ano	Emissão [tCO ₂ /MWh]
2012	0,0653
2013	0,0960
2014	0,1355
2015	0,1244
2016	0,0817
2017	0,0927
2018	0,0740
2019	0,0750
2020	0,0617
2021	0,1264

As emissões do SIN também serão importantes para a avaliação dos veículos híbridos plug-in flex a etanol, quando estes estiverem operando no modo elétrico.

Para que haja base de comparação entre as duas tecnologias é necessário que as emissões estejam na mesma unidade, como os VEHP possuem componentes de emissões oriundas tanto do modo elétrico quanto do modo a combustão a unidade escolhida foi a g/km – grama por quilômetro.

Tabela 2. Valores mínimos e máximos de desempenho em kWh/100 km.

Modelo Montadora	Mínimo	Máximo
Bolt CHEVY	15,0	12,4
C40 VOLVO	21,4	16,5
XC40 VOLVO	18,7	16,3
Yuan BYD	20,5	12,2
iev-40 JAC	17,1	12,9
Tan BYD	26,0	17,4
E-JS1 JAC	18,0	10,0
Leaf NISSAN	14,0	12,0
i3 BMW (sem Rex)	12,0	12,0
Song BYD	13,3	9,8

Para converter a média de emissão obtida da tabela 1 em g/km os autores obtiveram a média de consumo em kWh/km de alguns dos principais veículos elétricos disponíveis no Brasil pelo AVEX (2023) e expostos na tabela 2.

A média de desempenho obtida da tabela acima é de 15,38 kWh/100 km, que pode ser convertido para **6,50 km/kWh**. Dividindo a média de emissão do SIN pelo valor aqui encontrado obtemos os valores de emissão de VEB de **14,3 gCO₂/km** e desvio-padrão de **3,91 gCO₂/km**.

2.2 Veículos Híbridos Plug-in Flex a Etanol (VEHP)

Os veículos híbridos aqui considerados são do tipo plug-in, ou seja, podem ser carregados na tomada e funcionaram como puramente elétrico até determinada velocidade e alcance. São também do tipo flex, que podem ser abastecidos tanto com etanol quanto com gasolina.

Como há dois modos de operação no veículo, é preciso quantificar as emissões do sistema elétrico e do sistema a combustão interna. Para o sistema elétrico as emissões são as mesmas do SIN, como analisado anteriormente nos veículos elétricos a bateria.

Os modos de condução são separados através de um Fator de Utilização (FU), que determina a proporção de distância percorrida em modo elétrico relativa à distância total

percorrida, sendo definido como zero para um veículo apenas no modo de propulsão térmica e de valor unitário para um veículo no modo propulsão elétrica segundo Riemersma (2017). Em um veículo híbrido plug-in, a definição do FU é importante porque quanto maior for o FU, menor será o consumo de combustível e conseqüentemente menor serão as emissões de gases do efeito estufa (BRADLEY, 2010).

O Fator de Utilização aplicado neste estudo é de 0,48, e representa a média obtida por Campino (2021) através de quatro viagens realizadas em dois modelos distintos de veículos híbridos.

No sistema a combustão interna, as emissões variam quando abastecido a etanol ou a gasolina, para quantificar o uso de um ou de outro combustível, buscou-se primeiramente as quantidades de veículos na frota nacional que os consomem, através da base de dados da Secretaria Nacional de Trânsito – SENATRAN (2023) na década compreendida entre 2012 e 2021 foi elaborada a tabela 3.

Em seguida, obteve-se as vendas pelas distribuidoras de etanol hidratado e gasolina tipo "C"¹ através do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2011-2020 da Agência Nacional do Petróleo – ANP (2023) presentes na tabela 4.

Tabela 3. Quantidade de veículos por tipo de combustível na frota nacional (ref. dezembro).

Ano	A Álcool	A Gasolina	Flex
2012 ²	4.458.519	43.622.344	21.006.910
2013	4.458.454	44.408.865	24.712.650
2014	4.458.389	45.195.386	28.418.390
2015	4.458.829	45.851.674	31.255.522
2016	4.459.229	46.414.293	33.311.007
2017	4.459.674	46.902.112	35.564.940
2018	4.458.289	47.433.518	38.116.267
2019	4.458.850	47.964.832	40.935.619
2020	4.459.259	48.398.080	43.019.622
2021	4.459.731	48.944.845	45.302.592

Distribuindo proporcionalmente os valores das vendas de etanol hidratado e gasolina tipo "C" entre as respectivas frotas consumidoras, inclusive os veículos do tipo flex, obtém-se uma aproximação da distribuição de consumo dos carros flex entre os dois tipos de combustíveis, conforme tabela 5.

¹Gasolina C: 78% + 22% Etanol anidro (v/v).

²Valores extrapolados linearmente a partir dos dois anos seguintes.

Tabela 4. Vendas de etanol e gasolina, em mil m³, pelas distribuidoras (2011-2020)

Ano	Etanol Hidratado	Gasolina Tipo "C"
2012	9.850	39.698
2013	11.755	41.426
2014	12.994	44.364
2015	17.863	41.137
2016	14.586	43.019
2017	13.642	44.150
2018	19.385	38.352
2019	22.544	38.165
2020	19.258	35.824
2021	16.792	39.317

Esta distribuição se trata de uma aproximação pois há inúmeras variáveis que influenciam a repartição de consumo entre o etanol e a gasolina para os carros flex. Uma análise mais precisa há de incluir a idade da frota e seus respectivos desempenhos, dentre outros fatores. Para o objetivo deste trabalho, a distribuição exposta é suficiente para o levantamento da fronteira de eficiência de um portfólio que contenha as duas tecnologias.

Tabela 5. Distribuição de consumo de etanol e gasolina para carros flex (2012 a 2021).

Ano	% Etanol	% Gasolina
2012	39%	61%
2013	40%	60%
2014	40%	60%
2015	48%	52%
2016	42%	58%
2017	39%	61%
2018	50%	50%
2019	54%	46%
2020	51%	49%
2021	45%	55%

Obtidos o Fator de Utilização e a distribuição de consumo de etanol e gasolina anual para os veículos flex, e as emissões de CO₂ para VEB, é possível calcular as emissões anuais, em gCO₂/km dos VEHP, através da seguinte fórmula:

$$f_{eCO_2-VEHP} = (0,48 \times f_{eCO_2-VEB}) + (0,52 \times \%GAS \times f_{eCO_2-FLEX}) \quad (\text{Equação 1})$$

Da equação 1 é possível observar que os valores de emissão de CO₂ do etanol foram desconsiderados, pois há a hipótese assumida que os valores de emissões na cadeia de

produção do etanol possam ser mitigados no futuro e que não são significativos para esse estudo.

O fator de emissão para veículos flex mencionado na equação 1 foi extraído do Relatórios de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo elaborado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2023), como exposto na tabela 6.

Aplicando a equação 1 aos valores aqui elencados, obtém-se os fatores de emissão para veículos VEHP a etanol – tabela 6. A média de emissão para VEHP é **53,4 gCO₂/km** com desvio-padrão de **7,69 gCO₂/km**. Os valores anuais dos fatores de emissão para VEHP estão correlacionados com os valores anuais dos fatores de emissão para VEB por um fator de 0,446288.

Tabela 6. Fatores de emissão para veículos flex e VEHP.

Ano	Emissão FLEX [gCO ₂ /km]	Emissão VEHP [gCO ₂ /km]
2012	181	62,6
2013	176	61,8
2014	173	64,3
2015	166	53,7
2016	159	54,2
2017	154	55,8
2018	154	45,2
2019	152	42,2
2020	149	42,7
2021	147	51,7

3. RESULTADOS

Com as emissões de cada tecnologia, em conjunto com seus desvios-padrões, levantados conforme a metodologia destacada anteriormente, é possível plotar a curva de fronteira eficiente de Markowitz.

Tabela 7. Fatores de emissão e seus desvios-padrões para cada tecnologia – VEB E VEHP

Tecnologia	Emissão [gCO ₂ / km]	σ [gCO ₂ / km]
VEB	14,3	3,91
VEHP	53,4	7,69

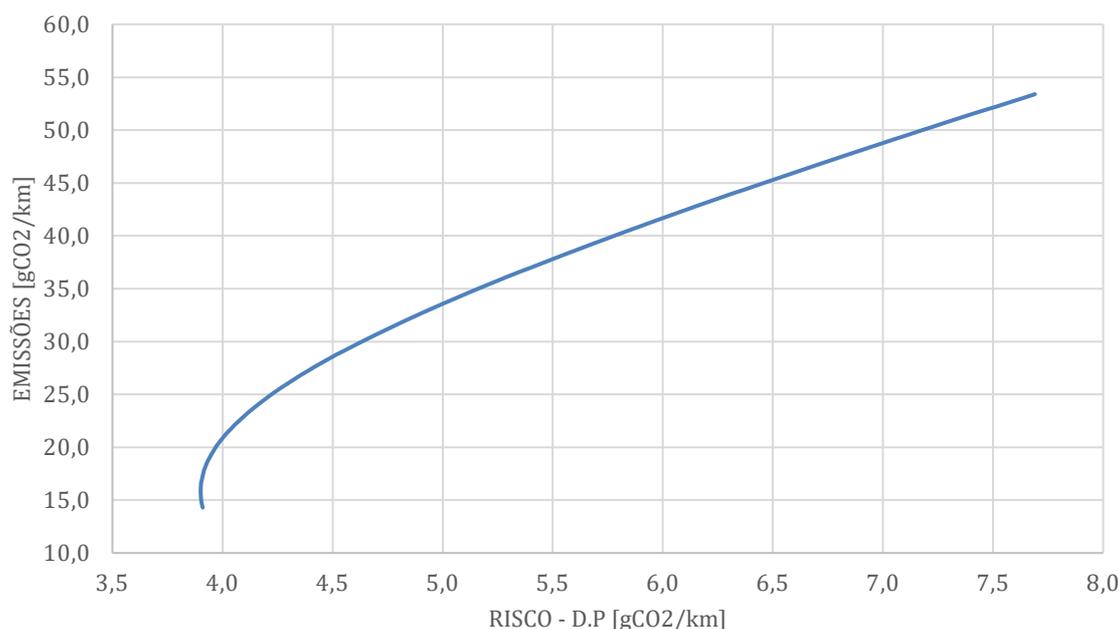
As emissões do portfólio seguirão proporcionalmente aos pesos de cada tecnologia, já o risco (desvio-padrão) da carteira será obtido pela equação 2.

$$\sigma_{Carteira} = \sqrt{(W_A^2 \cdot \sigma_A^2) + (W_B^2 \cdot \sigma_B^2) + 2 \cdot (W_A \cdot W_B \cdot \rho_{AB} \cdot \sigma_A \cdot \sigma_B)} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde σ corresponde ao desvio-padrão, ρ à correlação entre os dois ativos (0,446288), e W ao peso (%) de cada tecnologia no portfólio.

Da equação 2 completa-se a tabela 8 com os valores de composição variável de cada tecnologia seguidas de suas respectivas emissões e riscos (desvio-padrão).

Figura 1. Fronteira Eficiente para um portfólio contendo duas tecnologias veiculares



Os dados da tabela 8 é base para a figura 1, que representa a curva da fronteira eficiente de Markowitz, nesse gráfico é possível destacar os valores crescentes das emissões conforme há maior proporção de veículos VEHP no portfólio, e o contrário, ou seja, a diminuição das emissões quando há um aumento da proporção de VEB.

No entanto, para um certo valor de emissão, o risco do portfólio não se altera, esse ponto, em torno de 90%/10% (VEB/VEHP) representa o portfólio ideal das tecnologias mencionadas.

Para aprofundar os resultados obtidos com a análise da curva de fronteira eficiente de Markowitz para o portfólio de tecnologias veiculares, é fundamental destacar a importância das descobertas e sua relevância para a tomada de decisões estratégicas no setor automotivo.

Tabela 8 – Portfólios de VEB E VEHP

VEB	VEHP	Emissão [gCO ₂ /km]	Risco [gCO ₂ /km]
0%	100%	53,4	7,7
10%	90%	49,5	7,1
20%	80%	45,6	6,5
30%	70%	41,7	6,0
40%	60%	37,8	5,5
50%	50%	33,9	5,0
60%	40%	29,9	4,6
70%	30%	26,0	4,3
80%	20%	22,1	4,1
90%	10%	18,2	3,9
100%	0%	14,3	3,9

Os dados apresentados na tabela 8 e na figura 1 revelam uma tendência clara de *trade-off* entre as emissões de CO₂ e o risco associado ao portfólio. À medida que se aumenta a proporção de veículos híbridos plug-in flex a etanol (VEHP) no portfólio, observa-se um crescimento linear das emissões, acompanhado de uma redução progressiva do risco, conforme medido pelo desvio-padrão das emissões.

O ponto de equilíbrio ideal, em torno de 90% de VEB e 10% de VEHP, apresenta-se como uma descoberta fundamental neste estudo. Esse resultado indica que a alocação de 90% do portfólio em veículos elétricos a bateria e apenas 10% em veículos híbridos plug-in flex a etanol é a estratégia mais eficiente para minimizar o risco das emissões de CO₂, sem comprometer significativamente o potencial de redução dessas emissões. Essa alocação equilibrada permite ao tomador de decisão obter o menor risco possível, mantendo-se no nível ótimo de emissões para alcançar o melhor equilíbrio entre os objetivos ambientais e financeiros.

4. CONCLUSÃO

A compreensão dos benefícios e riscos de cada tecnologia é essencial para fomentar a inovação no Brasil e impulsionar a indústria automotiva rumo à sustentabilidade. Ao aplicar o Teorema de Markowitz em um contexto diferente de sua origem, é possível encontrar soluções otimizadas para problemas ambientais. O artigo analisou as emissões de CO₂ de tecnologias veiculares em destaque, encontrando uma proporção otimizada de 90% VEB e 10% VEHP. Como próximo passo, sugere-se incluir tecnologias de hidrogênio verde no

portfólio, para tal, recomenda-se futuras pesquisas sobre as emissões dessa tecnologia, assim como a inclusão de outros tipos de veículos, como os pesados.

Essa metodologia considera principalmente os aspectos ambientais, permitindo aos tomadores de decisão avaliarem o impacto ambiental de suas escolhas de alocação. É importante reconhecer as limitações do modelo de média-variância, que não considera eventos extremos e não reflete totalmente o verdadeiro risco dos ativos, também é necessário incluir custos e impactos de mercado para uma análise mais completa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP, **Agência Nacional do Petróleo**. Disponível em <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/anuario-estatistico-2021-dados-abertos>. Acessado em 15 de julho de 2023.

AVEX, **Autonomia de Veículos Elétricos com Base na Experiência Do Usuário**. Disponível em: <https://avex.eco.br/>. Acessado em 15 de julho de 2023.

Bradley T.H., Quinn C.W. **Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors**. Journal of Power Sources 2010; 195:5399–408. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.02.082>.

Campino, Miguel A. C.. **Avaliação Energética de um Sistema de Gestão de Propulsão de Veículos Híbridos Plug-In**. Dissertação de mestrado, ISEL – 2021.

CETESB, **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acessado em 15 de julho de 2023.

Markowitz, Harry M. Acessado em 15 de julho de 2023. **Risk-Return Analysis: The Theory and Practice of Rational Investing**. McGraw-Hill Education, 2014.

MCTIC, **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação**. Disponível em https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html. Acessado em 15 de julho de 2023.

Riemersma I., Mock P. **Too low to be true? How to measure fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid vehicles, today and in the future**. 2017.

SENATRAN, **Secretaria Nacional de Trânsito**. Disponível em <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2021>. Acessado em 15 de Julho de 2023.

Tanure, Tarik M.P.. **2º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica: O Brasil em direção ao mix de tecnologias para a descarbonização e digitalização dos transportes**. São Paulo, 2021. Cap.6.