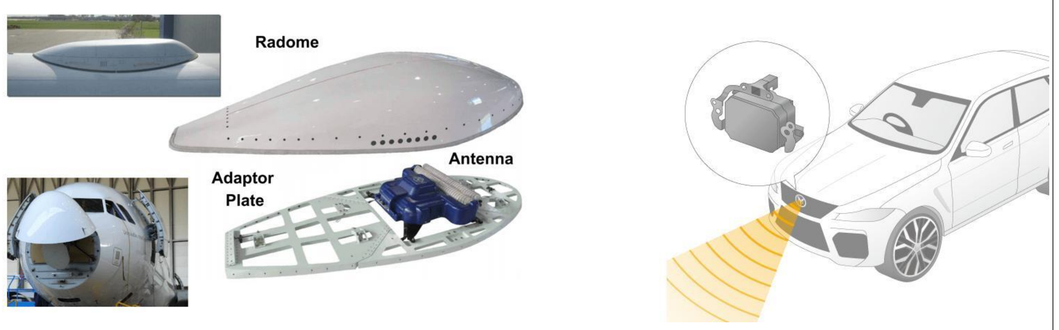
Seleção de Polímeros para Radomes em 24 GHz com AHP-SAW e IA Generativa

Divani Barbosa Gavinier[1], Jorge Tadao Matsushima[2], Maurício Ribeiro Baldan[3]
Faculdade de Tecnologia de Taubaté, Taubaté, SP, Brasil
Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, São José dos Campos, SP, Brasil
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

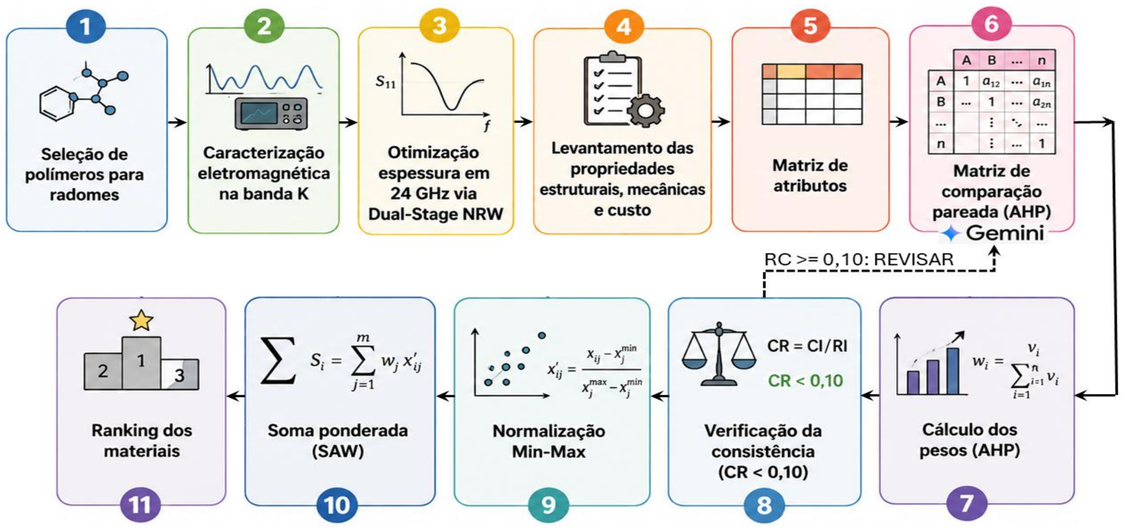
Resumo — Radomes são estruturas protetoras de antenas que transmitem seletivamente a frequência de sua operação e refletem as demais, devendo ainda suportar condições severas de ordem mecânica, térmica e ambiental. Eles podem ser compostos de diversos materiais, aqui são avaliados oito polímeros comerciais como candidatos, para tanto, os polímeros foram inicialmente caracterizados eletromagneticamente por meio do método NRW de duplo estágio, onde foi determinado a espessura ótima de efeito radome em 24,125 GHz. Como esse procedimento equalizou o desempenho eletromagnético dos materiais, suas outras propriedades passaram a constituir os principais critérios de seleção. Portanto, aqui propõe-se o uso de um modelo de tomada de decisão multicritério, baseado na integração dos métodos AHP e SAW utilizando pesos gerados por um especialista sintético implementado pela IA generativa Gemini, na seleção. O modelo foi aplicado a dois cenários: radomes aeronáuticos, com prioridade para a redução da massa superficial, e radomes automotivos, com prioridade para a resistência ao impacto. Os resultados indicam materiais distintos como mais adequados para cada aplicação: o PVC no cenário aeronáutico (índice global de 0,79), pelo equilíbrio entre massa superficial, expansão térmica e custo, e o policarbonato no automotivo (0,86), impulsionado pela resistência ao impacto.

I. INTRODUÇÃO

Radomes são estruturas protetoras projetadas para antenas que operam em uma frequência específica, sua função principal é permitir estritamente a passagem da frequência de operação da antena, enquanto reflete as demais. Adicionalmente, quando aplicados em aviões e automóveis, esses dispositivos devem apresentar elevada resistência às intempéries da natureza, suportando condições severas como variações extremas de temperatura, impactos, vento e umidade.



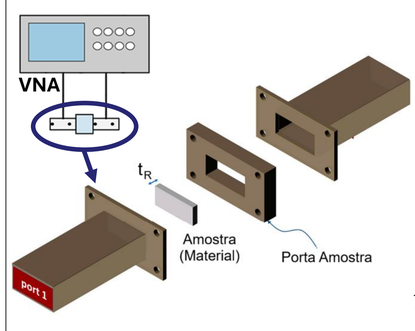
II. METODOLOGIA

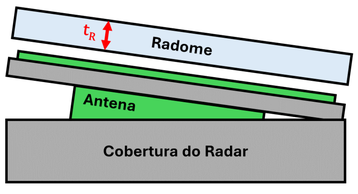


III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

PASSOS 1 a 4: OTIMIZAÇÃO ESPESSURA PARA EFEITO RADOME

Para que o radome seja transparente à onda desejada, sua espessura deve ser ajustada adequadamente de acordo com a permissividade elétrica do material (ε'_r). Abaixo segue aplicação da metodologia NRW de duplo estágio [1] que garante reflexão mínima e transmissão máxima da onda eletromagnética na frequência de operação da antena.





Espessura do radome:

$$t_R = \frac{n \cdot 6{,}2\ mm\ (\approx 24.125\ \text{GHz})}{\sqrt{\varepsilon_r}\ (material)}$$

Material	ε'_r	t_R (mm)	24,125 GHz (%)		
			R	T	A
PTFE	1,88	4,52	1,64	98,38	0,02
HDPE	2,31	4,08	2,06	97,81	0,12
PP	2,21	4,17	2,31	97,28	0,42
PS	2,73	3,76	1,81	96,75	1,44
PMMA	2,78	3,72	2,12	96,10	1,78
ABS	2,78	3,72	2,23	95,97	1,79
PC	2,67	3,79	2,95	95,31	1,74
PVC	3,20	3,47	2,75	94,76	2,49

R, T e A são os coeficientes de reflexão, transmissão e absorção calculados para a espessura otimizada t_R sob incidência normal em espaço livre, utilizando a permissividade extraída no VNA em guia de onda (modo TE_{10}).

PASSOS 4 e 5: MONTAGEM MATRIZ ATRIBUTOS

Material	Espessura t_R em 24,125 GHz (mm)	Densidade (g/cm³)	Massa superficial em 24,125 GHz (kg/m²)	Módulo de Young (MPa)	Impacto Izod (J/mm)	Temp. máx. mecânica (°C)	Expansão térmica (µm/m-K)	Custo (R$/cm³) Junho 2025
PTFE	4,52	2,2	9,944	14-35	0,4	270	120	1,49
HDPE	4,08	1	4,08	20-38	0,025-1,0	90	130	0,45
PP	4,17	0,91	3,7947	31-38	0,025-0,1	120	90	2,14
PS	3,76	1	3,76	35-83	0,0125-0,02	70	80-98	0,13
PMMA	3,72	1,2	4,464	48-76	0,015-0,025	70-90	76	0,07
ABS	3,72	1,0-1,4	3,72-5,21	30-53	0,25-0,4	86-89	81-95	1,90
PC	3,79	1,2	9,944	55-65	0,60-0,90	120	69	0,18
PVC	3,47	1,4	4,08	34-62	0,02-1,0	95	61	0,16

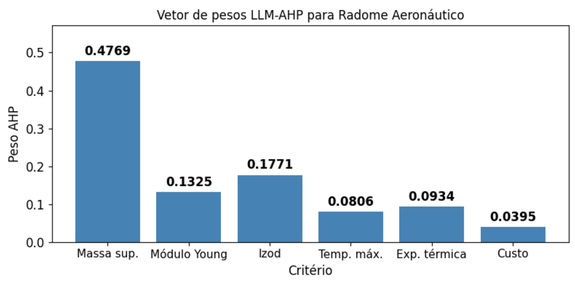
Fonte dos dados da matriz de atributos: espessura ótima em 24,125 GHZ (t_R), custo e massa superficial foram obtidos nesse trabalho, densidade, temperatura máxima mecânica e expansão térmica foram obtidos da referência [2], módulo de Young e impacto Izod foram obtidos da referência [3].

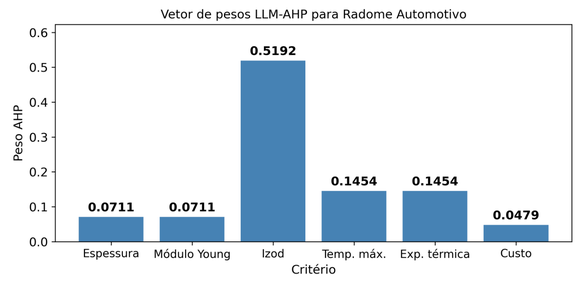
PASSO 6: MATRIZ DE COMPARAÇÃO PAREADA

Os julgamentos pareados foram obtidos via consulta única ao modelo Gemini 2.5 Flash (Google), utilizado como especialista sintético, abordagem denominada LLM-AHP [4]. Um único prompt retornou, em JSON, as 15 comparações pareadas simultaneamente, cada um com valor na escala de Saaty (1–9) [5] e justificativa técnica. Foram impostos os seguintes critérios: radome automotivo, minimização da espessura, expansão térmica e custo e radome aeronáutico: minimização massa superficial, expansão térmica e custo.

PASSO 7: CÁLCULO DOS PESOS AHP

A partir da matriz de comparação pareada ($\mathbf{A}$), o vetor de pesos ($\boldsymbol{\omega}$) foi obtido pelo método da média geométrica normalizada por coluna dado por: $\omega_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \bar{a}_{ij}$ onde $\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} a_{kj}}$.





PASSO 8: VERIFICAÇÃO DAS CONSISTÊNCIAS

A consistência foi validada pela Razão de Consistência RC [5]:

$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{(\mathbf{A}\boldsymbol{\omega})_i}{\omega_i}$, $\text{IC} = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$, $\text{RC} = \frac{\text{IC}}{\text{IR}_n}$, onde IR_n é o índice aleatório de Saaty para n critérios. Ambos os cenários obtiveram $\text{RC} < 0{,}10$ (aeronáutico: $\text{RC} = 0{,}0578$ e automotivo: $\text{RC} = 0{,}0533$).

PASSO 9: NORMALIZAÇÃO MIN-MAX

Para critérios a maximizar: $x_i^* = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$ e minimizar: $x_i^* = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}}$

PASSO 10: SOMA PONDERADA (SAW)

$I = \sum_{i=1}^{n} \omega_i x_i^*$, onde ω_i é o peso AHP do critério i e x_i^* é o valor normalizado do material no critério i.

PASSO 11: RANKING:

III. CONCLUSÃO

A abordagem combinando caracterização via NRW duplo estágio e LLM-AHP+SAW, mostrou-se funcional para a seleção de materiais para radomes. Os vetores de pesos gerados pelo especialista sintético refletiram adequadamente as prioridades de cada cenário: massa superficial dominante no aeronáutico (0,4769) e resistência ao impacto no automotivo (0,5192). O policarbonato (PC) consolidou-se como material ideal no cenário automotivo, impulsionado pela resistência ao impacto, enquanto o policloreto de vinila (PVC) liderou o aeronáutico. O gradiente do ranking foi mais acentuado no automotivo, onde esse critério concentrou 51,92% do peso decisório. Como trabalhos futuros, sugere-se a incorporação de dados ambientais na matriz de atributos, como absorção de umidade e envelhecimento, além de uma análise de sensibilidade dos pesos AHP.

REFERÊNCIAS

1. D. B. Gavinier, J. T. Matsushima, C. E. S. Leal et al., "Electromagnetic assessment of polymers for 24 GHz radomes via a dual-stage NRW method", J. Mater. Sci.: Mater. Electron., vol. 37, p. 415, 2026.
2. Makeitfrom. Material Properties Database. Acesso em: junho 2026. [Online]. Disponível em: https://www.makeitfrom.com/.
3. E. Lokensgard, Industrial Plastics: Theory and Applications, 6th ed. Clifton Park, NY: Cengage Learning, 2016
4. A. Memduhoğlu, N. Fulman, N. Polat, T. Ataş, "Large language models as virtual experts? Evaluating AHP-based criteria weighting performance for solar power plant site selection" Expert Systems With Applications, vol. 299, p. 130171, 2026.
5. A. D. T. Almeida: Processo de Decisão Nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério. São Paulo, Atlas: Editora Universitária, UFPE, 2013.