



**1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes**



***Análise comparativa dos métodos de determinação do número de acidez total em petróleo e derivados sob a perspectiva da sustentabilidade***

***Comparative analysis of methods for determining total acid number in oil and derivatives from a sustainability perspective***

Flaviane Mendonça Ambrozim<sup>1,\*</sup>, Raquel Vieira<sup>1</sup>, Lucimara Ribeiro Venial<sup>2</sup>, Luana Negris Zanelato<sup>3</sup>, Maristela de Araújo Vicente<sup>4</sup>, Maria de Fátima Pereira dos Santos<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Aluna do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>2</sup> Estagiária de Pós-Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>3</sup> Dra em Química do Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus Goiabeiras, ES, Brasil

<sup>4</sup> Professora do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: [flaviane.ambrozim@ufes.br](mailto:flaviane.ambrozim@ufes.br)

**Resumo:** O Número de Acidez Total (NAT) é um parâmetro crítico na avaliação da qualidade de petróleos e derivados, influenciando processos de refino, corrosividade de equipamentos e custos de manutenção. Tradicionalmente, métodos colorimétricos, potenciométricos e termométricos clássicos, como ASTM D974, ASTM D664 e ABNT NBR 14448, têm sido amplamente utilizados devido à simplicidade e à confiabilidade. Contudo, esses métodos apresentam elevado consumo de solventes orgânicos e geração de resíduos, além de limitações quanto à precisão em matrizes complexas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar comparativamente os principais métodos de determinação do NAT em petróleo e derivados, considerando eficiência analítica e critérios de sustentabilidade, por meio da Avaliação do Grau de Sustentabilidade (GS). Realizou-se um levantamento sistemático (SciELO, Web of Science, Scopus e Google Scholar) e avaliou-se a sustentabilidade por Análise Multicritério (MCDA) em três critérios: Ambiental (peso 0,5), Econômico (0,3) e Social/Operacional (0,2) com pontuação de 1 a 5. O GS foi calculado pela média ponderada e classificado em baixa ( $GS < 2,0$ ), média ( $2,0 \leq GS < 3,5$ ) e alta ( $GS \geq 3,5$ ). Os resultados mostraram que os métodos colorimétricos possuem baixa sustentabilidade (GS entre 2,85 e 3,25), enquanto os potenciométricos clássicos apresentam média sustentabilidade (GS entre 2,65 e 3,05). O método Micelar Solubilização Nanoemulsionado (MSN) destacou-se como alternativa promissora, alcançando  $GS = 3,60$  e classificando-se como altamente sustentável. O método termométrico ASTM D8045 obteve  $GS = 3,30$ , configurando-se como tecnologia intermediária. Concluiu-se, portanto, que os métodos colorimétricos apresentaram menor sustentabilidade (alto uso de solventes e subjetividade), enquanto potenciométricos clássicos tiveram desempenho intermediário, sendo método MSN o mais sustentável e robusto, enquanto o método termométrico é o intermediário.

**Palavras-chave:** Petróleo; Sustentabilidade; Métodos Analíticos; Química Verde, Avaliação multicritério.

**Abstract:** The Total Acidity Number (TAN) is a critical parameter in the evaluation of the quality of petroleum and derivatives, influencing refining processes, equipment corrosivity and maintenance costs. Traditionally, classical colorimetric, potentiometric, and thermometric methods, such as ASTM D974, ASTM D664, and ABNT NBR 14448, have been widely used due to their simplicity and reliability. However, these methods have high consumption of organic solvents and waste generation, as well as limitations

regarding accuracy in complex matrices. Thus, the objective of this work was to comparatively analyze the main methods of determining TAN in petroleum and derivatives, considering analytical efficiency and sustainability criteria, through the Sustainability Degree Assessment (GS). A systematic survey was carried out (Scielo, Web of Science, Scopus and Google Scholar) and sustainability was evaluated by Multicriteria Analysis (MCDA) in three criteria: Environmental (weight 0.5), Economic (0.3) and Social/Operational (0.2) with a score from 1 to 5. The SG was calculated by weighted average and classified as low ( $GS < 2.0$ ), medium ( $2.0 \leq GS < 3.5$ ) and high ( $GS \geq 3.5$ ). The results showed that the colorimetric methods have low sustainability (SG between 2.85 and 3.25), while the classical potentiometric methods have medium sustainability (SG between 2.65 and 3.05). The Micellar Solubilization Nanoemulsion (MSN) method stood out as a promising alternative, reaching  $GS = 3.60$  and being classified as highly sustainable. The ASTM D8045 thermometric method obtained  $GS = 3.30$ , configuring itself as an intermediate technology. It was concluded, therefore, that the colorimetric methods presented lower sustainability (high use of solvents and subjectivity), while the classical potentiometric methods had intermediate performance, with the MSN method being the most sustainable and robust, while the thermometric method is the intermediate.

**Keywords:** Petroleum; Sustainability; Analytical Methods; Green Chemistry; Multicriteria Assessment.

## 1 Introdução

O NAT é um parâmetro fundamental para a caracterização de petróleos brutos e derivados, pois reflete a presença de ácidos orgânicos capazes de comprometer a qualidade do produto, aumentar a corrosividade em equipamentos e tubulações e elevar os custos de refino e manutenção. A determinação do NAT está normatizada por três técnicas analíticas de ensaio (Figura 1): titulação colorimétrica (por indicador), titulação potenciométrica e titulação termométrica catalítica (ASTM, 2014; ISO, 1997; ASTM, 2018; ASTM, 2017; Metrohm, 2023).

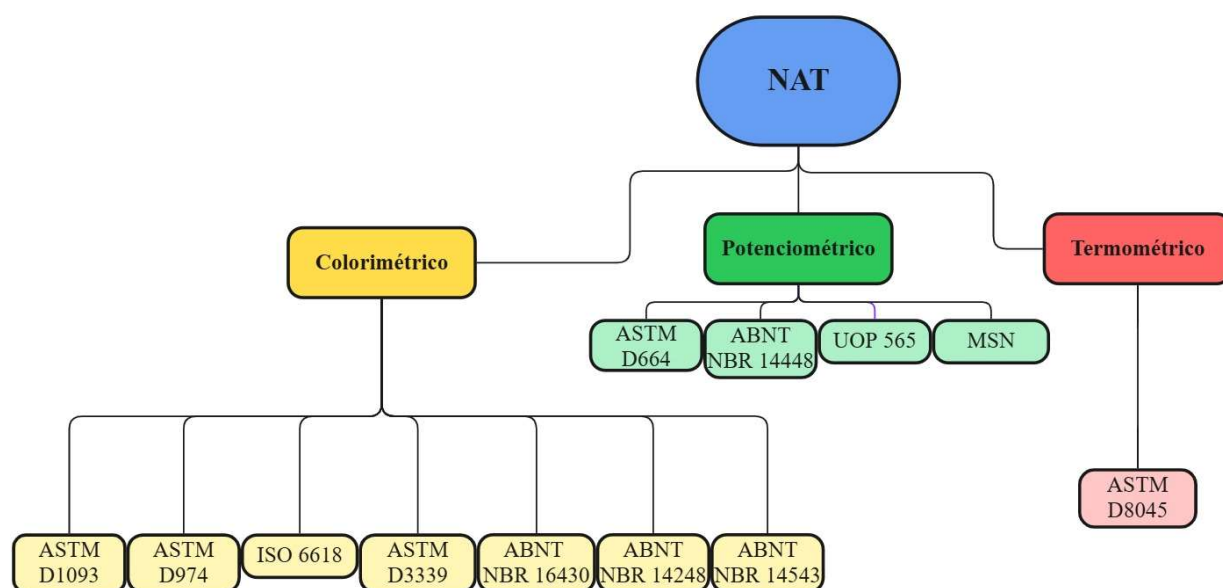


Figura 1. Agrupamento dos métodos de determinação do NAT conforme a técnica de titulação utilizada.

Nos métodos colorimétricos, exemplificados por ASTM D974 e ISO 6618 (com equivalentes nacionais como ABNT NBR 14248 e ABNT NBR 14543), emprega-se indicador visual em solvente misto tolueno:isopropanol:água; a viragem é observada por mudança de cor no meio de titulação (ISO, 1997; ASTM, 2014; ABNT, 2009). Os procedimentos demandam rotinas operacionais simples, mas a dependência de leitura visual pode limitar a aplicabilidade em matrizes escuras (ISO, 1997; ASTM, 2014; ABNT, 2009; ABNT; Xylem Analytics, 2018).

Já os métodos potenciométricos (ASTM D664, ABNT NBR 14448, UOP 565 e Micelar Solubilização Nanoemulsionada - MSN) representam uma evolução metodológica ao empregar eletrodos que possibilitam a identificação precisa do ponto de equivalência, aumentando a robustez e a confiabilidade das análises em diversas matrizes (ASTM, 2018; ABNT, 2013; UOP, 2005). Contudo, apresentam elevado consumo de solventes orgânicos e, em alguns casos, como na ABNT NBR 14448, requerem preparo prévio da amostra para extração dos compostos ácidos, o que aumenta não só o tempo de análise, mas também o consumo de reagentes e a geração de resíduos (ABNT, 2013; ASTM, 2018).

Como inovação nesse grupo, destaca-se o método MSN, que mantém o princípio potenciométrico, mas substitui os solventes orgânicos por emulsões micelares em meio aquoso. Essa estratégia permite reduzir drasticamente o impacto ambiental e eliminar interferências de sais hidrolisáveis (como  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{MgCl}_2$ ), além de aumentar a segurança ocupacional e a eficiência do processo (Negris et al., 2024; Fernandes et al., 2022).

A titulação termométrica catalítica, descrita em ASTM D8045, surge como abordagem intermediária, uma vez que se baseia na variação de temperatura durante a titulação, cujo ponto final é detectado pela inflexão térmica. Assim, elimina-se o uso de eletrodos, empregando apenas um sensor de temperatura, e tem-se um procedimento que oferece maior robustez. Esse método é aplicável a petróleo bruto, óleos lubrificantes, betumes, ceras e asfaltos. Entretanto, seu custo de implementação e o uso de reagentes ainda representam barreiras para a adoção mais ampla (ASTM, 2017; Metrohm, 2016; Metrohm, 2023).

Diante desse cenário, é possível observar que cada grupo de métodos apresenta benefícios e limitações próprias, variando entre custo, precisão, tempo de análise, impacto ambiental e aplicabilidade em diferentes matrizes de petróleo. Nesse contexto, torna-se essencial utilizar ferramentas que permitam comparar esses métodos de forma sistemática e multidimensional. A Avaliação do Grau de Sustentabilidade (GS), baseada em uma abordagem de Análise Multicritério (MCDA), surge como um instrumento adequado para integrar aspectos ambientais, econômicos, sociais e operacionais, possibilitando a classificação dos métodos em níveis de sustentabilidade e apoiando a tomada de decisão na escolha da metodologia mais adequada (Decoté et al., 2021; Ferla et al., 2024).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi analisar comparativamente os principais métodos de determinação do NAT em petróleo e derivados, considerando eficiência analítica e critérios de sustentabilidade, por meio da Avaliação GS.

## 2 Metodologia

### 2.1 Revisão bibliográfica

Foi realizado um levantamento bibliográfico sistemático em diferentes bases de dados nacionais e internacionais, incluindo Scielo, Web of Science, Scopus e Google Scholar. O processo de seleção iniciou-se pela leitura dos títulos e resumos, seguido da análise integral dos trabalhos potencialmente adequados ao tema. Nessa fase, buscou-se identificar os principais métodos e normas utilizados para determinação do NAT, destacando suas aplicações, princípios de funcionamento, reagentes envolvidos, vantagens e limitações.

### 2.2 Avaliação do Grau de Sustentabilidade (GS) dos métodos de determinação do NAT

#### 2.2.1 Critérios de avaliação

Foram considerados três critérios principais, com pesos diferenciados de acordo com sua relevância para a sustentabilidade analítica:

- Ambiental (peso 0,5): avalia consumo de solventes e titulantes, toxicidade e volume de resíduos. É o critério de maior peso por refletir diretamente o impacto ambiental (Boggia et al., 2018).
- Econômico (peso 0,3): considera custos de reagentes, equipamentos e tempo de análise. Recebe peso intermediário, pois influencia a viabilidade prática (Opon e Henry, 2020).
- Social/Operacional (peso 0,2): avalia facilidade de execução, robustez, segurança ocupacional e nível de padronização. Embora de menor peso, é essencial para medir aplicabilidade e aceitação (Opon e Henry, 2022).

#### 2.2.2 Escala de pontuação

Cada critério foi avaliado em uma escala ordinal de 1 a 5, conforme modelos utilizados em análises multicritério de sustentabilidade: 1 = muito insustentável / desfavorável; 2 = insustentável; 3 = intermediário / neutro; 4 = sustentável e 5 = altamente sustentável / favorável

### 2.2.3 Grau de Sustentabilidade (GS)

Não foi necessário aplicar normalização porque as notas já estavam atribuídas na mesma escala de 1 a 5 para cada critério, dessa forma o GS foi calculado diretamente pela média ponderada dos três critérios, por meio da Eq. 1.

$$GS = (A \times 0,5 + E \times 0,3 + S \times 0,2) / 1,0 \quad (1)$$

onde A é a nota atribuída ao critério ambiental, E é a nota atribuída ao critério econômico e S é a nota atribuída ao critério social/operacional.

### 2.2.4 Classificação

Os valores de GS permitem classificar os métodos/normas em: baixa sustentabilidade:  $GS < 2,0$ ; média sustentabilidade:  $2,0 \leq GS < 3,5$  e alta sustentabilidade:  $GS \geq 3,5$

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica permitiu identificar e caracterizar os principais métodos empregados na determinação do NAT em petróleo e derivados, os quais se organizam em três grupos analíticos principais: colorimétricos, potenciométricos e termométricos. Cada grupo apresenta princípios distintos, vantagens operacionais e limitações ambientais que influenciam diretamente a sustentabilidade do processo analítico. O resumo com as principais características de cada método está apresentado na Tabela 1.

Os métodos colorimétricos. ASTM D974, ISO 6618 (e equivalentes nacionais ABNT NBR 14248 e ABNT NBR 14543) são, de modo geral, simples e de baixo custo, pois utilizam indicador visual em mistura tolueno:isopropanol:água, sem necessidade de eletrodos; a viragem é observada pela mudança de cor no meio de titulação, o que limita o uso em amostras escuras (ISO, 1997; ASTM, 2022; ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Dessa forma, esses procedimentos apresentam elevada subjetividade, principalmente em matrizes escuras, nas quais a detecção visual do ponto de equivalência torna-se imprecisa. Além disso, o uso intensivo de solventes orgânicos (aproximadamente 100 mL por ensaio) implica alto impacto ambiental e maior geração de resíduos, reduzindo seu desempenho em sustentabilidade. Assim, embora esses métodos ainda sejam amplamente utilizados por sua viabilidade em laboratórios convencionais, tendem à obsolescência gradual diante das demandas atuais por práticas analíticas mais verdes e automatizadas.

Os métodos potenciométricos (ASTM D664, ABNT NBR 14448, UOP 565) eliminam a subjetividade relacionada à leitura visual ao monitorar a variação do potencial elétrico durante a titulação e permitem maior reprodutibilidade e precisão, mesmo em amostras complexas. Contudo, também são métodos que utilizam solventes orgânicos (tolueno/isopropanol) e demandam etapas adicionais, como a remoção prévia de sais, que aumentam o tempo e o custo da análise. Apesar dessas restrições, permanecem como referências regulatórias para a determinação do NAT devido à sua confiabilidade e ampla validação interlaboratorial.

A inovação mais recente neste grupo é o método Micelar Solubilização Nanoemulsionado (MSN), que substitui os solventes orgânicos por emulsões micelares aquosas. Essa abordagem reduz substancialmente a toxicidade e o volume de resíduos, além de eliminar interferências de sais hidrolisáveis ( $\text{CaCl}_2$  e  $\text{MgCl}_2$ ) e aumentar a segurança ocupacional. Estudos recentes (Negris et al., 2024) demonstram resultados equivalentes aos métodos clássicos, porém com maior sustentabilidade ambiental e operacional, configurando-se como alternativa promissora para substituir as normas tradicionais.

O método termométrico ASTM D8045 detecta a inflexão térmica durante a titulação, apresentando rápida resposta, alta precisão em amostras com baixo NAT e boa aplicabilidade em petróleo bruto, betumes e óleos escuros, sendo indispensável para amostras com altos teores de ceras e asfaltos. Entretanto, seu custo de implementação e o uso de reagentes específicos, como misturas de xilenos e isopropanol com p-formaldeído, ainda limitam sua disseminação em laboratórios convencionais (ASTM, 2017; Metrohm, 2016; Metrohm, 2023). Mesmo assim, representa uma tecnologia de transição entre os métodos clássicos e as abordagens sustentáveis emergentes, combinando confiabilidade analítica com avanços em segurança e redução de resíduos.

Tabela 1. Resumo dos métodos de análise de NAT.

Norma	Princípio	Aplicabilidade	Faixa típica (mg KOH/g)	Solvente(s) do meio de titulação	Titulante	Indicador/ Eletrodo	Massa de amostra (g)	Observações / limitações	Referência
ASTM D1093	Colorimétrico	Hidrocarbonetos líquidos e resíduos de destilação	—	— (extração com água)	—	Alaranjado de metila	—	Análise qualitativa; não mede NAT.	ASTM (2023)
ASTM D974	Colorimétrico	Derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados).	0 a 2,0	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	p-naftolbenzeína (viragem: marrom-verde)	0,2 a 20	Em amostras escuras, a visualização pode ser prejudicada	ASTM (2022)
ISO 6618	Colorimétrico	Derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados).	—	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	p-naftolbenzeína (viragem: marrom-verde)	0,2 a 20	Método equivalente à ASTM D974.	ISO (1997)
ASTM D3339	Colorimétrico	Derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados).	0,05 a 20	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	p-naftolbenzeína (viragem: marrom-verde)	0,1 a 5,0	Similar à ASTM D974, ISO 6618 e ABNT NBR 14248 e equivalente a ABNT NBR 14543. Usa menores quantidades de amostra e solventes. Atmosfera de nitrogênio.	ASTM (2021)
ABNT NBR 14248	Colorimétrico	Derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados).	0 a 2,0	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	p-naftolbenzeína (viragem: marrom-verde)	0,2 a 20	Método equivalente à ASTM D974 e ISO 6618.	ABNT (2009a)
ABNT NBR 14543	Colorimétrico	Derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados)	0,05 a 20	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,01 mo/L em isopropanol	p-naftolbenzeína (viragem: marrom-verde)	0,1 a 5,0	Similar à ASTM D974, ISO 6618 e ABNT NBR 14248 e equivalente a ABNT NBR 14543. Usa menores quantidades de amostra e solventes. Atmosfera de nitrogênio.	ABNT (2009b)
ABNT NBR 16430	Colorimétrico	Misturas de álcoois de baixo peso molecular, cetonas, éteres, ésteres, diluentes à base de	Abaixo de 0,05% (m/m) em ácido acético	Água ou álcool	NaOH 0,05 mo/L	Fenolftaleína (viragem: primeiro tom róseo)	50 mL	Método genérico para acidez total em orgânicos. Não determina NAT.	ABNT (2015)

ASTM D664	Potenciométrico	hidrocarbonetos, nafta e outras frações leves do petróleo. Derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados), biodiesel e misturas de biodiesel	0,5 a 90	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	Eletrodo indicador de vidro e eletrodo de referência	0,1 a 20	Amplamente aplicável, pode superestimar NAT em presença de sais e meios específicos.	ASTM (2024)
ABNT NBR 14448	Potenciométrico	Petróleo, derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados), biodiesel e misturas de biodiesel	0,1 a 150	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	Eletrodo indicador de vidro e eletrodo de referência	40	Equivalente a ASTM D664. Inclui uma etapa de remoção de sais da amostra.	ABNT (2013).
UOP 565	Potenciométrico	Produtos de petróleo e destilados; inclui opção para sais de naftenatos	0,002 a 5	Tolueno-água-isopropanol (100:1:99)	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	Eletrodo indicador de vidro e eletrodo de referência	1 a 20	Inclui procedimentos para quantificar ácidos naftênicos e sais de naftenatos. Método elimina interferências de sais. menor consumo de solventes em relação a ASTM D664 e ASTM D8045. Resultados consistentes em relação a ABNT NBR 14448, sem necessidade de pré-tratamento para remoção de sais.	UOP (2005)
MSN	Potenciométrico	Petróleos brutos com API entre 13 e 38	—	Isopropanol	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	Eletrodo indicador de vidro e eletrodo de referência	0,25 a 10		(Negris et al., 2024)
ASTM D8045	Termométrico	Petróleo, derivados de petróleo e lubrificantes (novos ou usados), ceras, betumes, asfaltos	0,1 a 16	Mistura de xilenos e isopropanol (75:25) e p-formaldeído como agente catalítico	KOH 0,1 mo/L em isopropanol	Sensor de temperatura	1 a 20	Resultados similares à ASTM D664. Ideal para óleos contendo compostos que solidificam.	ASTM (2023)

### 3.2 Avaliação do Grau de Sustentabilidade (GS) dos métodos de determinação do NAT

Os resultados sintetizados na Figura 2 revelam três patamares de sustentabilidade entre os métodos de determinação de NAT. A interpretação integrada dos critérios ambiental, econômico e social/operacional permite compreender a posição relativa de cada grupo, além de indicar vetores de substituição metodológica orientados por química verde e custos totais de propriedade (Ziemba, 2022; Ferla et al., 2024).

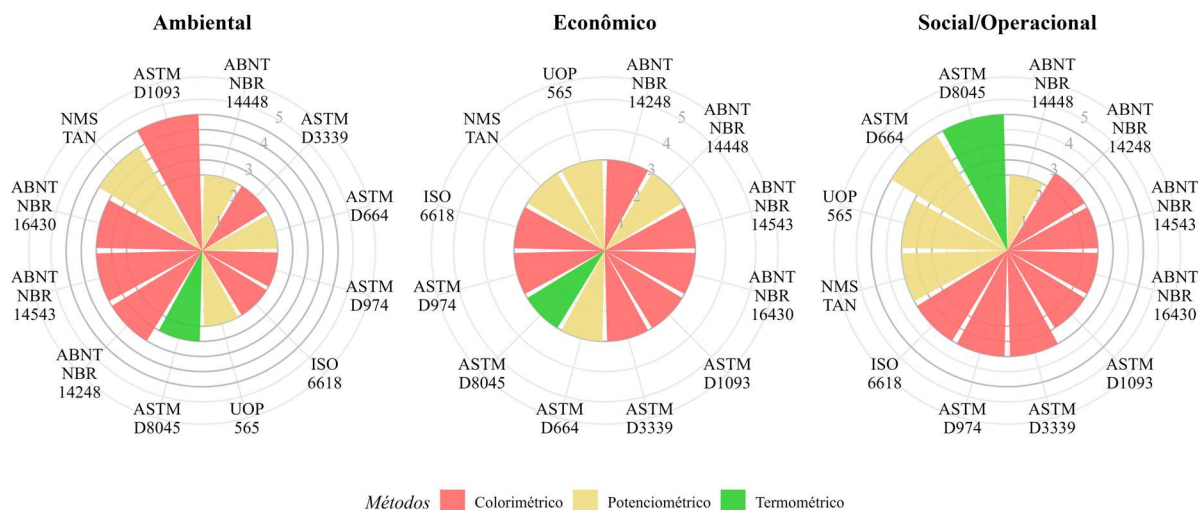


Figura 2. Grau de Sustentabilidade (GS) dos métodos de determinação do NAT: impacto ambiental, econômico e operacional.

Os métodos colorimétricos (ASTM D974, ISO 6618, ASTM D3339, ABNT NBR 14248, ABNT NBR 14543 e ABNT NBR 16430) apresentaram GS médio, variando entre 2,85 e 3,25. Esse desempenho reflete a simplicidade operacional e o baixo custo, mas evidencia limitações importantes do ponto de vista ambiental. O elevado consumo de solventes orgânicos (como tolueno e isopropanol) e a geração de resíduos tóxicos foram determinantes para a redução do critério ambiental (Boggia et al., 2018; Cinelli et al., 2014). Do ponto de vista social, o manuseio relativamente simples dos indicadores favorece a execução em laboratórios com menor infraestrutura, ainda que a subjetividade do ponto de viragem limite a reprodutibilidade dos resultados. Em síntese, esses métodos permanecem úteis em cenários de baixa complexidade, mas apresentam restrições de sustentabilidade (Ferla et al., 2024; Ziemba, 2022).

No grupo contendo os métodos potenciométricos, destacam-se as normas ASTM D664, ABNT NBR 14448, UOP 565 e a proposta inovadora MSN. Os métodos clássicos alcançaram valores de GS entre 2,65 e 3,05, classificados como de média sustentabilidade. Apesar de oferecerem maior robustez analítica em relação aos colorimétricos, apresentam limitações ambientais devido ao uso de solventes mistos e elevada geração de resíduos. O destaque deste grupo é o método MSN, que obteve GS=3,60, caracterizando-se como de alta sustentabilidade. A substituição de solventes orgânicos por emulsões micelares em meio aquoso contribuiu para a elevação do desempenho ambiental e para a redução dos riscos ocupacionais, sem comprometer a precisão. Essa inovação se apresenta como alternativa promissora para a superação das limitações associadas às normas tradicionais. Esses resultados corroboram a tendência observada em estudos que analisam metodologias de avaliação multicritério aplicadas à sustentabilidade de sistemas técnico-analíticos (Sahabuddin & Khan, 2021; Ferla et al., 2024).

O método termométrico ASTM D8045 apresentou GS=3,30, enquadrando-se na categoria de média sustentabilidade. Embora ainda não atinja os valores mais elevados, este método representa um avanço significativo frente aos potenciométricos convencionais. Sua principal vantagem reside na eliminação do uso de eletrodos de vidro e na maior precisão em matrizes com baixo NAT. Além disso, o menor consumo de reagentes e a redução do tempo de análise refletem ganhos relevantes nos critérios ambiental e social, reforçando sua adequação a princípios de química verde e eficiência operacional (Opon & Henry, 2022; Cinelli et al., 2014; Ziemba, 2022).

A análise do GS evidencia que os métodos colorimétricos, embora simples e de baixo custo, apresentam desempenho limitado (GS 2,85–3,25) devido ao impacto ambiental e à subjetividade, configurando tendência de obsolescência. Os potenciométricos clássicos mantêm-se como padrão regulatório (GS 2,65–3,05), mas sofrem restrições ambientais e econômicas, enquanto o MSN desponta como alternativa promissora (GS=3,60), conciliando confiabilidade analítica e maior sustentabilidade. O método termométrico, por sua vez, ocupa posição intermediária (GS=3,30), representando tecnologia de



transição com ganhos de eficiência, mas ainda limitado por custos e insumos específicos (Ziemba, 2022; Cinelli et al., 2014; Ferla et al., 2024).

## 4 Conclusões

O levantamento bibliográfico possibilitou a verificação dos métodos analíticos mais empregados para a determinação do TAN, parâmetro indispensável para a caracterização de petróleos e derivados, e sua classificação em colorimétricos, potenciométricos e termométrico, de acordo com o princípio de medição utilizado. A análise comparativa desses métodos mostrou que:

- a) os colorimétricos têm a menor sustentabilidade devido ao alto uso de solventes e à subjetividade;
- b) os potenciométricos clássicos permanecem referência regulatória, porém com desempenho ambiental apenas moderado.
- c) o potenciométrico MSN destacou-se como a alternativa mais sustentável e robusta;
- d) o termométrico (ASTM D8045) ocupa posição intermediária com boa resposta para amostras escuras

Diante disso, recomenda-se priorizar a adoção do método MSN e, quando pertinente, integrar o termométrico em rotinas que exigem rapidez e menor geração de resíduos.

## Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Governo do Estado do Espírito Santo, Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN).

## Referências bibliográficas

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2009a). *NBR 14248 – Produtos de petróleo: determinação do número de acidez e de basicidade – método do indicador*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2009b). *NBR 14543 – Produtos de petróleo: determinação do número de acidez por titulação colorimétrica semi-micro*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2013). *NBR 14448 – Óleos lubrificantes, produtos de petróleo e biodiesel: determinação do número de acidez pelo método de titulação potenciométrica*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASTM International. (2014). *ASTM D974-14e2 – Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2017). *ASTM D8045-17e1 – Standard Test Method for Acid Number of Crude Oils and Petroleum Products by Catalytic Thermometric Titration*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM D3339 – Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Semi-Micro Color Indicator Titration*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2022). *ASTM D974 – Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2023). *ASTM D1093 – Standard Test Method for Acidity of Hydrocarbon Liquids and Their Distillation Residues*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2024). *ASTM D664 – Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Boggia, A, Massei, G, Pace, E, Rocchi, L, Paolotti, L and Attard, M (2018). *Spatial multicriteria analysis for sustainability assessment: a new model for decision making*. Land Use Policy, 71, pp.281–292.
- Cinelli, M, Coles, SR and Kirwan, K (2014). *Analysis of the potentials of multi-criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment*. Ecological Indicators, 46, pp.138–148.



- Decoté, PAP et al. (2021). *Green chemistry metric to assess the use of chemicals in standard TAN methods and the role of MCDA*. Research, Society and Development.
- Ferla, G, Mura, B, Falasco, S, Caputo, P and Matarazzo, A (2024). *Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) for sustainability assessment in food sector: a systematic literature review on methods, indicators and tools*. Science of the Total Environment, 946, 174235.
- Fernandes, HA et al. (2022). *Effects of calcium and magnesium chlorides on TAN determination by potentiometric titration*. Fuel. 311, 122522.
- International Organization for Standardization (ISO). (1997). *ISO 6618 – Petroleum products and lubricants: determination of acid or base number – colour-indicator titration method*. Geneva: ISO.
- Metrohm AG. (2023). *Online thermometric titration of acid number (AN) in oils (ASTM D8045). Application Note AN-PAN-1037*. Herisau: Metrohm.
- Metrohm. (2022). *White Paper WP-013EN – Acid number: thermometric vs. potentiometric (ASTM D8045)*. Herisau: Metrohm.
- Metrohm. (2023). *Application Note AN-H-141 – Acid number in crude oil according to ASTM D8045*. Herisau: Metrohm.
- Negriz, L, Brandão, GP and Flores, EMM (2024). *Micellar solubilization of crude-oil acids in oil-in-water nanoemulsions to determine the total acid number of crude oil by potentiometric titration (NMS\_TAN)*. Fuel, 366, 131379.
- Opon, J and Henry, M (2020). *A multicriteria analytical framework for sustainability evaluation under methodological uncertainties*. Environmental Impact Assessment Review, 83, 106403.
- Opon, J and Henry, M (2022). *Implementation of a multicriteria analytical framework for the sustainability evaluation and comparison of concrete materials considering methodological uncertainties*. Journal of Cleaner Production, 344, 131057.
- Sahabuddin, M e Khan, I (2021). *Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: robustness analysis through criteria weight change*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47, 101380.
- Universal Oil Products. (2005). *UOP 565-05 – Acid Number and Naphthenic Acids by Potentiometric Titration*. Des Plaines, IL: UOP.
- Xylem Analytics (SI Analytics). (2018). *Indicator titration (ASTM D974): application note*. Weilheim: Xylem Analytics.
- Ziemba, P (2022). *Application framework of multi-criteria methods in sustainability assessment*. Energies, 15(23), 9201.