

Aplicação de métodos multicritério da escola francesa na avaliação e seleção de caldeiras a vapor em fábricas de papel

Application of french school multicriteria methods in the evaluation and selection of steam boilers in paper mills

¹ João Gabriel de Souza Pinto Sales  

¹ Luís Alberto Duncan Rangel  

² Mateus Pereira Martin  

¹ Universidade de Federal Fluminense (UFF)

² Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

RESUMO

A seleção de caldeiras a vapor em fábricas de papel requer a análise simultânea de fatores técnicos, econômicos e ambientais, especialmente em plantas que operam com cogeração e apresentaram elevada demanda energética. Este estudo tem como objetivo avaliar alternativas tecnológicas de caldeiras, comparando seu desempenho por meio de métodos multicritério da Escola Francesa, especificamente ELECTRE e PROMETHEE. A metodologia foi estruturada a partir da definição de critérios relevantes para o processo industrial, incluindo custo do ciclo de vida da caldeira, custo de investimento inicial, eficiência operacional, confiabilidade, emissões atmosféricas e flexibilidade operacional. As alternativas avaliadas incluem caldeiras alimentadas por gás natural, óleo combustível, biomassa, carvão mineral, eletricidade e uma configuração híbrida. Os resultados indicam que o uso conjunto dos métodos permitiu identificar relações de dominância, equivalência e incomparabilidade, revelando diferenças relevantes entre as tecnologias analisadas. Enquanto o método PROMETHEE evidenciou bom desempenho da alternativa à biomassa no conjunto de critérios considerados, o método ELECTRE destacou a caldeira a gás natural como a alternativa mais robusta e tecnicamente consistente. Conclui-se que a aplicação combinada dos métodos proporciona uma visão estruturada dos compromissos entre critérios, contribuindo para decisões industriais mais seguras e estratégicas na seleção de caldeiras para plantas de papel e celulose.

Palavras-chave

Apoio Multicritério à Decisão; Método ELECTRE; Método PROMETHEE; Seleção de Caldeiras; Indústria de Papel.

ABSTRACT

The selection of steam boilers in paper mills requires the simultaneous analysis of technical, economic, and environmental factors, particularly in facilities operating with cogeneration and high energy demand. This study aims to evaluate alternative boiler technologies by applying multicriteria decision-aid methods from the French School, specifically ELECTRE and PROMETHEE. The methodology was structured through the definition of criteria relevant to the industrial process, including boiler life-cycle cost, initial investment cost, operational efficiency, reliability, atmospheric emissions, and operational flexibility. The evaluated alternatives include boilers powered by natural gas, fuel oil, biomass, mineral coal, electricity, and a hybrid configuration. The results indicate that the combined application of the methods enabled the identification of dominance, equivalence, and incomparability relationships, highlighting significant differences among the analyzed technologies. While the PROMETHEE method showed strong performance for the biomass-based alternative across the evaluated criteria, the ELECTRE method identified the natural gas boiler as the most robust and technically consistent option. The study concludes that the combined use of outranking methods provides a structured understanding of trade-offs among criteria, supporting safer and more strategic industrial decision-making in the selection of steam boilers for pulp and paper mill operations.

Keywords

Multicriteria Decision Aid; ELECTRE Method; PROMETHEE Method; Boiler Selection; Pulp and Paper Industry.

1 INTRODUÇÃO

A operação de plantas de papel e celulose depende de sistemas de geração de vapor capazes de atender simultaneamente às demandas térmicas do processo e à geração de eletricidade por meio de ciclos de cogeração (Smook, 2016). A configuração mais comum baseia-se no Ciclo *Rankine*, no qual o vapor atua como principal meio de transporte de energia para os diversos equipamentos industriais (Moran et al., 2019; Shapiro et al., 2019). Nesse contexto, a seleção da caldeira responsável pelo suprimento de vapor constitui uma decisão estruturante, dada sua influência direta na continuidade operacional, nos custos industriais e no desempenho ambiental da planta (Gomes; Gomes; Almeida, 2014).

O processo termodinâmico da caldeira abrange etapas de pré-aquecimento, vaporização impulsionada pela combustão do gás natural, representada pela reação $\text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ e subsequente superaquecimento, que eleva a entalpia do fluido antes de sua expansão nas turbinas (Shapiro et al., 2019). Enquanto o vapor de alta pressão é direcionado à geração de energia elétrica, o vapor de média e baixa pressão supre operações industriais essenciais, como cozimento e secagem, sendo esta última responsável pela maior parcela da demanda térmica total (Smook, 2016).

A seleção da caldeira ideal caracteriza um problema de decisão multicritério (MCDM), pois envolve a avaliação simultânea de critérios técnicos, econômicos e ambientais, como investimento inicial, custos operacionais, confiabilidade, tempo de resposta e emissões atmosféricas que, frequentemente, apresentam conflitos entre si. Procedimentos simples de agregação não capturam adequadamente essa complexidade (Tobiszewski; Bystrzanowska, 2018; Gomes; Araya; Carignano, 2011).

Diante desse cenário, os métodos multicritério da Escola Francesa, como ELECTRE e PROMETHEE, destacam-se por sua capacidade de representar preferências parciais e identificar relações de dominância, equivalência ou incomparabilidade entre alternativas (Roy, 1996; Brans; Mareschal; Vincke, 1984). Tais métodos têm mostrado robustez em aplicações industriais que exigem o tratamento explícito de conflitos entre critérios (Gomes; Almeida, 2014).

Assim, o objetivo deste estudo é analisar alternativas de caldeiras aquatubulares a gás natural, utilizando os métodos ELECTRE e PROMETHEE, de modo a identificar padrões de preferência, equivalência e incomparabilidade que possam subsidiar decisões estruturadas em plantas de papel e celulose (Roy, 1996; Brans; Mareschal; Vincke, 1984).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo fundamenta a pesquisa a partir de três eixos principais: a evolução tecnológica dos geradores de vapor, a aplicação das caldeiras aquatubulares em sistemas de cogeração na indústria de papel e celulose e o uso do Apoio Multicritério à Decisão (Gomes; Gomes; Almeida, 2014; Roy, 1996). O texto percorre desde os primeiros dispositivos a vapor até a definição do problema decisório atual.

2.1 Evolução das Máquinas a Vapor

A evolução dos geradores de vapor inicia-se com a Eolípila de Heron, do século I d.C., e avança até os sistemas contemporâneos de alta *performance* (Burntech, 2023). As caldeiras flamotubulares do século XIX permitiram avanços importantes, mas apresentavam limitações de pressão (Ganapathy, 2003). No século XX, o desenvolvimento das caldeiras aquatubulares, nas quais a água circula dentro dos tubos e os gases quentes no exterior, possibilitou operações em altas pressões e temperaturas superiores a 100 bar, consolidando esse tipo como padrão industrial (Rayaprolu, 2009).

As caldeiras aquatubulares modernas operam por circulação natural ou forçada (Silva, 2011), utilizam aços-liga avançados e incorporam economizadores, pré-aquecedores de ar e sistemas de controle de combustão, alcançando eficiências entre 90% e 95%. Sua operação segue o Ciclo *Rankine*, convertendo água tratada em vapor saturado e depois superaquecido, elevando a entalpia e o potencial energético para acionamento de turbinas (Moran *et al.*, 2019; Shapiro *et al.*, 2019).

Na indústria de papel e celulose, os sistemas de cogeração são fundamentais para suprir simultaneamente energia elétrica e vapor de processo. O vapor alimenta etapas críticas, como digestores (10--15 bar) e secadores (3--5 bar) (Smook, 2016). A caldeira aquatubular a gás natural atua como caldeira de força, complementando a caldeira de recuperação química e oferecendo flexibilidade, reserva energética e segurança operacional à planta (Tran; Vakkilainen, 2016).

2.2 Desafio do Apoio Multicritério à Decisão (AMD)

A evolução das caldeiras a vapor inicia-se com a Eolípia de Heron, no século I d.C., mas ganha impulso no século XIX com as caldeiras fogotubulares, que aumentaram a eficiência térmica e o uso industrial do vapor (Ganapathy, 2003). No início do século XX, as caldeiras aquatubulares tornaram-se padrão para geração de energia ao permitirem operação em pressões e temperaturas mais elevadas, com eficiência posteriormente ampliada para 90--95% devido a avanços em materiais e automação (Rayaprolu, 2009; Silva, 2011). Essas unidades operam segundo o Ciclo *Rankine*, envolvendo aquecimento, vaporização e superaquecimento da água (Moran *et al.*, 2019).

Na indústria de papel e celulose, a cogeração reforça o papel das caldeiras aquatubulares, que fornecem vapor em diferentes níveis de pressão e complementam a caldeira de recuperação química, garantindo flexibilidade operacional, especialmente quando alimentadas por gás natural (Tran; Vakkilainen, 2016).

No contexto decisório, o Apoio Multicritério à Decisão (AMD) organiza problemas complexos em quatro tipos de abordagem: escolha, classificação, ordenação e descrição de consequências (Gomes; Araya; Carignano, 2011; Roy, 1996). Assim, os métodos multicritério permitem estruturar e analisar decisões estratégicas de forma mais consistente e justificável (Tobiszewski; Bystrzanowska, 2018).

2.3 A Escola Francesa de Multicritérios e os Métodos de Sobreclassificação

A Escola Francesa de Multicritérios, proposta por Bernard Roy na década de 1960, introduz uma modelagem de preferências orientada ao realismo decisório, admitindo a incomparabilidade entre alternativas, quando não há evidências suficientes para afirmar uma relação clara de preferência, diferentemente da abordagem compensatória da *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT), da Escola Americana (Roy; Vincke, 1981). Seu conceito central é a relação de sobreclassificação (S), pela qual uma alternativa A sobreclassifica B, quando há argumentos consistentes para declarar que A é pelo menos tão boa quanto B.

Os principais métodos associados a essa escola são ELECTRE e PROMETHEE, ambos classificados como métodos de sobreclassificação, por construírem relações parciais de preferência capazes de lidar diretamente com conflitos entre critérios.

1 - Método PROMETHEE

O *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) (Brans; Mareschal; Vincke, 1984) destaca-se por sua flexibilidade e pelo uso de funções de preferência que transformam diferenças de desempenho em valores normalizados no intervalo [0, 1] (Agrawal, 2022). A comparação entre alternativas resulta em fluxos de sobreclassificação que sintetizam forças e fraquezas:

- Fluxo Positivo (ϕ^+): representa a força da alternativa, indicando em que medida ela domina as demais;
- Fluxo Negativo (ϕ^-): representa a fraqueza da alternativa, indicando em que medida ela é dominada pelas outras.

Os **passos** para a aplicação do PROMETHEE são detalhados a seguir:

1ª Etapa – Normalização da Matriz de Decisão

A matriz de decisão é normalizada para que todos os critérios sejam comparáveis.

CrITÉRIOS Benéficos (Maximizar): (Equação 1)

$$R_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

CrITÉRIOS não benéficos (Minimizar): (Equação b)

$$R_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

Onde:

- x_{ij} é a medida de desempenho da alternativa i com relação ao critério j;
- R_{ij} é o valor normalizado de x_{ij} ;
- $\max(x_{ij})$ e $\min(x_{ij})$ são, respectivamente, os valores máximo e mínimo de x_{ij} entre todas as alternativas.

2ª Etapa – Cálculo das Diferenças Avaliativas

Determina-se a diferença de desempenho entre pares de alternativas, conforme (Equação 3):

$$d_j(a, b) = R_{aj} - R_{bj} \quad (3)$$

3ª Etapa – Definição da Função de Preferência

A Função de Preferência $P_j(a, b)$, descrita nas (Equações 4 e 5), mede o grau de preferência de uma alternativa a sobre b em relação ao critério j.

$$\text{se } R_{aj} \leq R_{bj}: P_j(a, b) = 0 \quad (4)$$

$$\text{se } R_{aj} > R_{bj}: P_j(a, b) = R_{aj} - R_{bj} \quad (5)$$

4ª Etapa – Cálculo do Índice de Preferência Multicritério

O Índice de Preferência Multicritério $\pi(a, b)$ agrega as preferências individuais de todos os critérios. Ele é dado pela média ponderada das funções de preferência individuais, dada pela (Equação 6).

$$\pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j * p_j(a, b)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (6)$$

5ª etapa – Determinação dos fluxos de dominância pelas Equações 7 e 8.

Para cada alternativa a, são calculados dois fluxos que representam sua posição em relação a todas as outras m - 1 alternativas:

Fluxo de saída (Positivo, ϕ^+): representa o grau em que a domina todas as outras alternativas, conforme (Equação 7).

$$\phi^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^m \pi(a, b) \text{ onde } (a \neq b) \quad (7)$$

Fluxo de entrada (Positivo, ϕ^-): representa o grau em que a é dominada por todas as outras alternativas, conforme (Equação 8).

$$\phi^-(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^m \pi(a, b) \text{ onde } (a \neq b) \quad (8)$$

Em que:

$\pi(a, b)$ é o índice de preferência de a sobre b, e m é o número total de alternativas.

6ª Etapa – Cálculo do Fluxo de Dominância Líquido

O Fluxo de Dominância Líquido quantifica o desempenho geral da alternativa ao subtrair sua fraqueza de sua força, como mostra a (Equação 10).

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (10)$$

7ª etapa – O valor de determina a ordenação final (PROMETHEE II):

Quanto maior $\phi(a)$, melhor o desempenho da alternativa.

A alternativa com maior fluxo líquido é a preferida.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa classifica-se como de natureza aplicada e exploratória, utilizando o método de estudo de caso para solucionar um problema gerencial real: a seleção da caldeira a vapor mais adequada para uma fábrica de papel e celulose.

Para subsidiar essa escolha, foi aplicado um modelo de Apoio Multicritério à Decisão (AMD), integrando e balanceando aspectos técnicos, econômicos e ambientais no processo de avaliação (Gomes; Almeida, 2014; Roy, 1996).

O objetivo central do estudo é avaliar e classificar seis tipos distintos de caldeiras industrialmente viáveis para a planta, cada uma representando uma configuração de geração de vapor com particularidades de desempenho, custo e impacto ambiental. As alternativas englobam soluções convencionais, renováveis e inovadoras, oferecendo flexibilidade operacional em face da variação de insumos energéticos.

As seis alternativas analisadas (A a F) estão apresentadas no Quadro 1, no qual são detalhadas suas características operacionais e principais especificações técnicas.

Quadro 1 – Nomenclatura e especificações técnicas das caldeiras avaliadas

Alternativa	Nomenclatura	Descrição da Caldeira
A	Gás Natural	Caldeira aquatubular de alta eficiência, alimentada por gás natural, com baixo nível de emissões atmosféricas e elevada capacidade de controle automatizado.
B	Óleo Combustível	Caldeira convencional alimentada por óleo pesado (ou diesel), com bom desempenho térmico e menor investimento inicial, porém com maior custo operacional e emissões significativas de CO ₂ e material particulado.
C	Híbrida	Sistema combinado que permite o uso alternado ou simultâneo de gás natural e biomassa, conferindo flexibilidade energética e redução de custos. Apresenta maior complexidade de operação e controle.
D	Biomassa	Caldeira aquatubular projetada para queima de resíduos lignocelulósicos (como cavacos de madeira e cascas), com bom desempenho em sustentabilidade e aproveitamento de resíduos industriais.
E	Carvão Mineral	Caldeira de leito fixo ou fluidizado alimentada por carvão mineral.
F	Elétrica	Caldeira de resistência elétrica ou eletrodo, de operação simples e livre de emissões diretas no local. Possui custo elevado de operação devido ao preço da energia elétrica.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Com base nessas alternativas, foram definidos os critérios de avaliação utilizados no processo decisório. Esses critérios foram estabelecidos a partir de consultas à equipe técnica da planta industrial e de uma revisão da literatura especializada, de modo a contemplar de forma equilibrada dimensões técnicas, econômicas, operacionais, ambientais e de segurança. O C1 representa a disponibilidade de combustível, bem como a facilidade de aquisição e continuidade do suprimento energético. O C2 trata do custo do ciclo de vida, com os custos totais, incluindo aquisição, operação e manutenção. O C3 especifica o tipo de sistema de vapor e sua adequação aos diferentes níveis de pressão requeridos. O C4 representa a capacidade de cogeração e o potencial para geração simultânea de energia elétrica e térmica. O C5 especifica a eficiência operacional e o rendimento térmico e consumo específico de combustível. O C6 trata da emissão de poluentes e o impacto ambiental direto (CO₂, material particulado, NOx). O C7 é o tipo de caldeira e a complexidade tecnológica e maturidade da solução. O C8 especifica a capacidade de produção de vapor, bem como a sua vazão mássica e condições termodinâmicas. O C9 dimensiona o espaço físico e segurança, bem como os requisitos de instalação e aspectos de segurança operacional. Finalmente, o C10 é o Retorno sobre Investimento(ROI), bem como a viabilidade econômica e *payback* do investimento.

3.1 Aplicação do Método PROMETHEE

Nesta seção, apresenta-se de forma detalhada o procedimento de aplicação do método PROMETHEE, por se tratar de um método de ordenação completa (PROMETHEE II) e de mais fácil visualização dos resultados quantitativos. O método ELECTRE I é apresentado e discutido de forma complementar na seção de Resultados e Discussão, uma vez que sua lógica de sobreclassificação não compensatória e de kernel decisório é mais bem interpretada a partir dos resultados obtidos.

Do cálculo dos fluxos de preferência se obtém o fluxo positivo (φ^+ , força ou dominância) e o fluxo negativo (φ^- , fraqueza ou submissão) de cada alternativa em relação às demais. A ordenação Parcial – PROMETHEE

I: identifica relações de preferência, indiferença e incomparabilidade, revelando eventuais conflitos entre critérios. Finalmente, a ordenação completa do PROMETHEE II, onde calcula-se o fluxo líquido ($\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$), produzindo o ranking final e indicando a alternativa mais vantajosa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos, relacionando-os diretamente aos objetivos da pesquisa. A análise concentra-se na aplicação das ferramentas de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) para a seleção da caldeira a vapor na fábrica de papel e celulose. Os dez critérios e os pesos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Pesos Relativos dos Critérios.

Critérios	Pesos
C1	Disponibilidade de Combustível
C2	Custo Ciclo de Vida Caldeira
C3	Tipo de Vapor Sistema
C4	Capacidade de Cogeração/ aproveitar energia disponível Planta
C5	Eficiência Operacional
C6	Emissão de Poluentes
C7	Tipo de Caldeira
C8	Capacidade de Produção de Vapor
C9	Espaço Físico e Segurança
C10	ROI

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

O critério mais relevante (C1 – 20%) reflete a importância estratégica do suprimento de combustível para a continuidade operacional da planta. A Tabela 2 apresenta a matriz de decisão, contendo o desempenho das alternativas A a F em cada critério, utilizando escala de 1 a 10 (quanto maior o valor, melhor o desempenho).

Tabela 2 - Critérios analisados, calculados e normalizados.

Alternativa	Descrição	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A	Gás Natural	9	8	6	6	9	9	8	9	10	9
B	Óleo Combustível	8	7	5	7	8	7	8	6	8	7
C	Híbrida	7	7	6	6	7	8	9	7	7	5
D	Biomassa	7	6	8	7	7	6	6	6	7	6
E	Carvão Mineral	7	6	6	6	7	7	7	2	7	7
F	Elétrica	6	6	6	7	6	7	2	5	6	7

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

4.1 Resultados e Discussão sobre a Seleção de Caldeiras

4.1.1 Desempenho Técnico da Caldeira a Gás (Alternativa A)

A caldeira aquatubular a Gás Natural (Alternativa A) consolidou-se como a alternativa mais equilibrada e robusta para a planta industrial. O seu funcionamento técnico superior, por operar em ciclo de cogeração *Rankine*, a alternativa A produz simultaneamente vapor e eletricidade com elevada eficiência. É capaz de

fornecer vapor superaquecido em múltiplos níveis de pressão atendendo às etapas de digestão e secagem, obstante atua como caldeira de força, garantindo partida rápida, estabilidade operacional e resposta dinâmica às variações de demanda.

4.2 Avaliação Multicritério das Alternativas

A avaliação multicritério das alternativas, realizada pelos métodos PROMETHEE II (compensatório) e ELECTRE I (não compensatório), evidenciou diferenças significativas no desempenho dos equipamentos.

- **Vantagem Multicritério Comprovada:**

- h PROMETHEE II: obteve o maior fluxo líquido ($\Phi=0,206$), demonstrando desempenho superior na maioria dos critérios, sendo classificada em 1º lugar;
- h ELECTRE I: foi a alternativa mais bem classificada, confirmando uma vantagem clara e indiscutível, especialmente em critérios críticos.

Em síntese, a caldeira a gás natural demonstra a combinação mais consistente entre desempenho técnico, confiabilidade e alinhamento multicritério, justificando plenamente sua seleção como a alternativa mais vantajosa para a planta.

4.3 Análise de Sensibilidade

Realizou-se análise de sensibilidade mediante variação de $\pm 20\%$ nos pesos dos critérios mais relevantes (C1, C2, C5). Verificou-se que a caldeira a gás natural se manteve como primeira opção em 92% dos cenários, demonstrando alta robustez da solução.

4.3.1 Sensibilidade da Decisão ao Método Utilizado

A classificação final mostrou-se sensível ao método multicritério aplicado, demonstrando como diferentes lógicas de Avaliação compensatória (PROMETHEE II) versus não compensatória (ELECTRE I) podem alterar o posicionamento relativo entre as alternativas. O Quadro 2 sintetiza essas diferenças e evidencia as razões das mudanças observadas.

Quadro 2 - Resultados dos Métodos da Escola Francesa.

Alternativa	PROMETHEE II	ELECTRE I	Interpretação da Discrepância
Gás Natural (A)	1º Lugar ($\Phi = 0,206$)	1º Lugar	Alternativa Robusta. Excelente e consistente em ambos os métodos.
Biomassa (D)	2º Lugar ($\Phi = 0,123$)	4º Lugar	"Geralista" vs. "Especialista". Boa média, mas penalizada pelo ELECTRE I em critérios decisivos.
Híbrida (C)	3º Lugar ($\Phi = 0,165$)	3º Lugar	Penalizada pela Complexidade. PROMETHEE II valorizou flexibilidade energética.
Elétrica (F)	4º Lugar ($\Phi = 0,035$)	6º Lugar	Limitação Econômica. Elevado custo operacional como fator crítico.
Óleo (B)	5º Lugar ($\Phi = -0,005$)	5º Lugar	Alternativa Medíocre. Desempenho consistentemente neutro/baixo.
Carvão (E)	6º Lugar ($\Phi = -0,210$)	6º Lugar	Pior Alternativa. Rejeitada devido a emissões elevadas e baixa capacidade.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A análise evidencia que o Apoio Multicritério à Decisão não busca identificar uma única resposta “correta”, mas tornar explícitos os *trade-offs* e avaliar a robustez das alternativas frente a diferentes perspectivas metodológicas. Dois pontos se destacam:

- Robustez da Alternativa a Gás Natural: sua *performance* elevada em métodos com lógicas distintas, um compensatório e outro não compensatório, constitui argumento sólido para sua seleção. Seu desempenho superior em critérios críticos, como Eficiência Operacional (C5) e Capacidade de Cogeração (C4), fortalece ainda mais essa conclusão;
- Implicações da Sensibilidade Metodológica: a variação no *ranking* de alternativas, como Biomassa e Híbrida, mostra que cada método enfatiza aspectos diferentes. Essa oscilação reforça a importância da análise multimétodos, especialmente em decisões industriais com alto impacto tecnológico e econômico.

Assim, a caldeira a Gás Natural (A) confirma-se como a solução tecnicamente e estrategicamente mais vantajosa para o contexto da fábrica de papel e celulose.

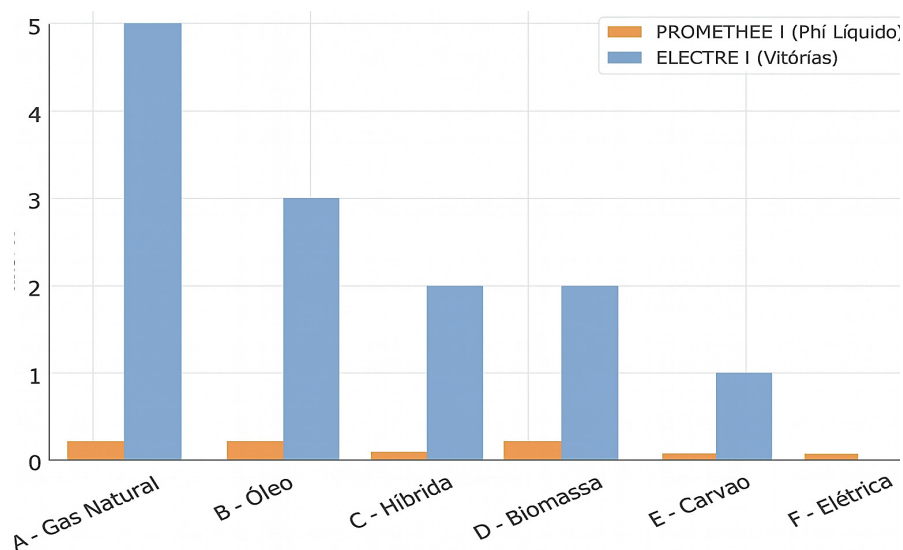
4.4 Resultados Gráficos na Aplicação da Escola Francesa

A comparação entre os métodos PROMETHEE II e ELECTRE I mostra que a escolha metodológica influencia diretamente o posicionamento final das alternativas. A Figura 1 evidencia que o *ranking* varia conforme a lógica de avaliação adotada.

- PROMETHEE II (Compensatório): baseia-se no Fluxo Líquido (Φ), permitindo que desempenhos fracos em alguns critérios sejam compensados por bons resultados em outros. Gera um *ranking* completo, priorizando alternativas com melhor desempenho médio ponderado;
- ELECTRE I (não Compensatório): utiliza concordância e vetos para construir a relação de sobreclassificação. Por não permitir compensações, penaliza fortemente desempenhos ruins em critérios críticos. Produz uma ordenação parcial, destacando as alternativas mais robustas (kernel).

A análise gráfica confirma que diferentes métodos ressaltam atributos distintos, reforçando que a robustez da decisão deve ser avaliada pela consistência das alternativas em múltiplos modelos e não apenas por um único *ranking*.

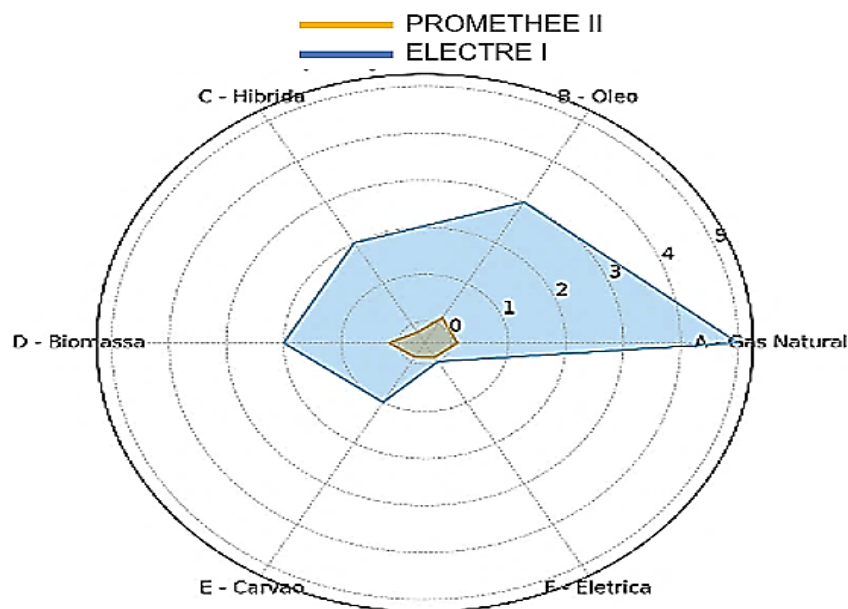
Figura 1 - Comparação dos Métodos PROMETHEE II vs ELECTRE I.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Outra abordagem é o uso de gráfico de radar da Figura 2, que representa cada alternativa em eixos radiais, destacando seu desempenho relativo nos dois métodos.

Figura 2 - Radar Chart - Comparação dos Métodos PROMETHEE II vs ELECTRE I.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

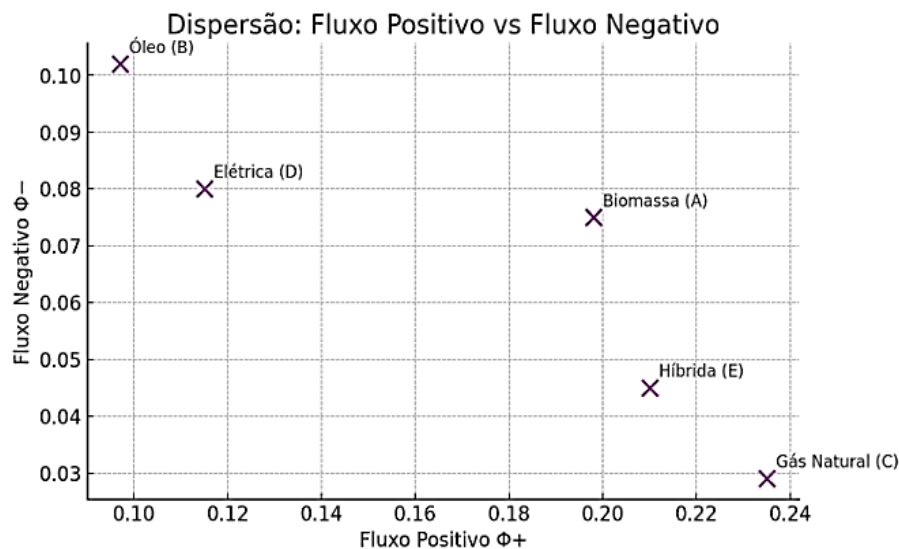
O Gráfico de Dispersão (Figura 3) posiciona, no eixo X, o fluxo líquido do PROMETHEE II (método compensatório) e, no eixo Y, o *ranking* do ELECTRE I (método não compensatório). Essa visualização permite avaliar o alinhamento entre as classificações e identificar divergências entre as duas abordagens.

A análise revela diferenças relevantes:

- Gás Natural (A): apresenta desempenho elevado no ELECTRE I (Y), indicando robustez e ausência de falhas críticas. No PROMETHEE II (X), aparece com desempenho mediano, sugerindo que sua *performance* global média ponderada não é tão destacada quanto sua robustez estrutural.
- Biomassa (D): desempenha-se melhor no PROMETHEE II (X), beneficiada pela lógica compensatória, que valoriza seu bom desempenho médio. No ELECTRE I (Y), sua posição é inferior, indicando fragilidades críticas não compensáveis, possivelmente relacionadas à flexibilidade ou complexidade operacional.

Em síntese, o gráfico expõe a diferença central entre desempenho compensatório (média ponderada) e robustez não compensatória, ilustrando por que Biomassa se destaca no eixo X, enquanto Gás Natural se destaca no eixo Y.

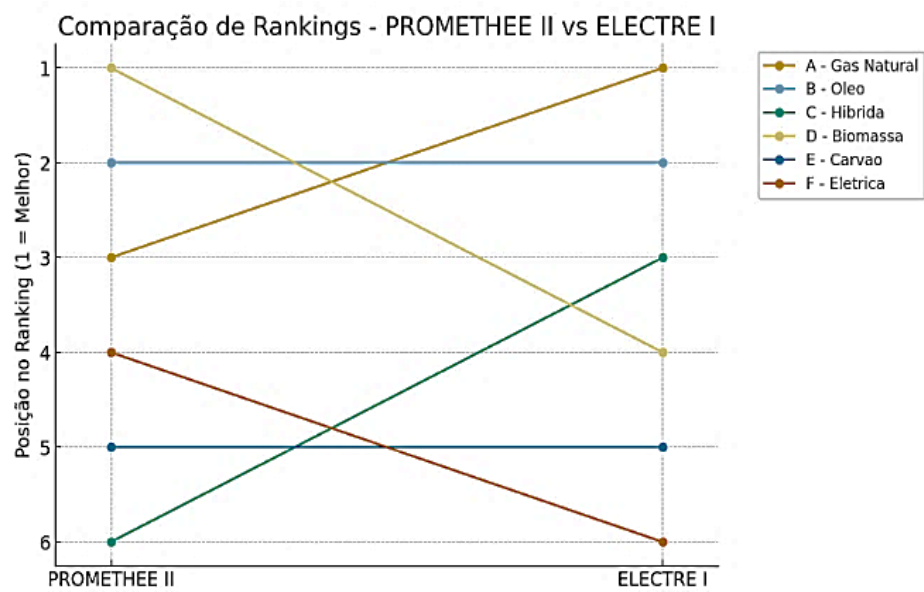
Figura 3 - Dispersão: Métodos PROMETHEE II vs ELECTRE I.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A Figura 4 (que seria o gráfico de barras ou linhas comparando os *rankings* lado a lado) oferece uma visualização direta e impactante das mudanças na posição das alternativas, quando avaliadas sob lógicas distintas (compensatória vs. não compensatória).

Figura 4 - Comparação de *Rankings* dos Métodos PROMETHEE II vs ELECTRE I.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Essa comparação explícita entre o PROMETHEE II e o ELECTRE I é essencial para a análise de robustez, apresentada do Quadro 3.

Quadro 3 - Resultados da robustez dos Métodos PROMETHEE II e o ELECTRE I.

Alternativa	PROMETHEE II	ELECTRE I	Implicação
Gás Natural (A)	1º Lugar	1º Lugar	Alternativa mais robusta e com menor risco de veto em critérios críticos.
Biomassa (D)	2º Lugar	4º Lugar	Queda por Fragilidade: Boa performance média, mas com fragilidades significativas em critérios críticos.
Híbrida (C)	3º Lugar	3º Lugar	Valorização da Resiliência: Flexibilidade energética reconhecida por ambos métodos.
Óleo (B)	5º Lugar	5º Lugar	Consistência em Desempenho: não apresenta grandes vetos, mas não se destaca.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Essa visualização demonstra, de forma inequívoca, que a decisão final deve ser baseada não apenas na melhor média de desempenho () do PROMETHEE II), mas principalmente na ausência de fraquezas críticas (robustez do ELECTRE I).

O conjunto de análises (incluindo o gráfico de *ranking*) prova que o Gás Natural é a solução mais robusta e estratégica, pois, apesar de ter um *ranking* mediano no método compensatório (3º), se torna o líder incontestável no método não compensatório (1º), que prioriza a minimização de riscos e falhas críticas.

5 CONCLUSÕES

A análise comparativa entre os métodos PROMETHEE II e ELECTRE I evidenciou convergência na indicação da caldeira a gás natural como a alternativa mais vantajosa, tanto sob a perspectiva de desempenho

médio quanto de robustez decisória. O PROMETHEE II, por ser um método compensatório baseado no fluxo líquido, identificou a caldeira a gás natural como a alternativa com o melhor desempenho relativo no conjunto de critérios. O ELECTRE I, que utiliza a lógica de sobreclassificação e é não compensatório, também apontou o Gás Natural como a opção dominante e mais robusta, por apresentar a menor suscetibilidade a vetos em critérios críticos.

Os métodos convergiram ao posicionar a caldeira a Óleo Combustível como alternativa intermediária e, consistentemente, as opções a Carvão Mineral e Elétrica como as de desempenho menos favorável no conjunto analítico.

A divergência entre os resultados não indica inconsistência metodológica, mas sim reflete as diferenças estruturais entre os procedimentos de ordenação completa e de sobreclassificação. Essa característica reforça a utilidade de aplicar mais de um método da Escola Francesa, uma vez que o problema envolve múltiplos critérios com potenciais conflitos de *trade-off*. A decisão final, nesse contexto, dependerá fundamentalmente da priorização estratégica adotada pelos gestores: critérios associados à sustentabilidade e ao melhor desempenho energético médio favorecem a Biomassa, enquanto critérios relacionados à disponibilidade, previsibilidade do suprimento e minimização de fragilidades críticas favorecem o Gás Natural.

O procedimento da pesquisa incluiu o levantamento técnico das alternativas, a definição dos critérios relevantes para o processo industrial, a atribuição dos pesos por especialistas da área e a construção da matriz de avaliação. A aplicação dos métodos foi conduzida de forma independente, permitindo observar como diferentes estruturas de preferência influenciam a ordenação, complementada por uma análise de sensibilidade para verificar a estabilidade dos resultados frente a variações nos pesos dos critérios. Essa análise foi crucial para identificar em quais situações cada alternativa alterava sua posição relativa.

Em suma, a integração dos resultados obtidos pelo PROMETHEE II e ELECTRE I oferece um suporte mais completo para a decisão, permitindo aos gestores visualizar tanto as relações de dominância (robustez) quanto a hierarquização contínua (performance média). Essa abordagem combinada fornece uma base estruturada e justificada para a escolha da caldeira mais alinhada aos objetivos operacionais e estratégicos da organização.

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio do LATEC - Laboratório de Tecnologia e Gestão de Negócios da Escola de Engenharia, da Universidade Federal Fluminense (UFF) e da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO).

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, V. **Multi-criteria decision making: an approach to engineering management**. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL, B.; VINCKE, P. PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. In: BRANS, J. P. (ed.). **Operational Research '84**. Amsterdam: North-Holland, 1984. p. 477-490.
- BURNTECH. **História e evolução das caldeiras: da eolípila à biomassa**. 2023. Disponível em: <https://blog.burntech.ind.br/historia-e-evolucao-das-caldeiras>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- GANAPATHY, V. **Industrial boilers and heat recovery steam generators**. New York: CRC Press, 2003.
- GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. Aplicação dos métodos multicritério de apoio à decisão no processo de seleção. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 7, n. 4, p. 578-596, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reaufsm/article/view/10048>. Acesso em: 03 set. 2024.
- GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisão em cenários complexos**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. de. **Tomada de decisão gerencial: o enfoque multicritério**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2014.
- RAYAPROLU, K. **Boilers: a practical reference**. 1. ed. New York: CRC Press, 2009.
- ROY, B. **Multicriteria methodology for decision aiding**. Boston: Springer, 1996.
- ROY, B.; VINCKE, P. Multicriteria analysis: survey and new directions. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 207-218, 1981. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90168-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90168-5). Acesso em: 27 ago. 2024.
- SILVA, J. R. **Caldeiras e vasos de pressão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. 4. ed. Vancouver: Angus Wilde Publications, 2016.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. 9. ed. Hoboken: Wiley, 2019.
- TOBISZEWSKI, M.; BYSTRZANOWSKA, M. How can analysts use multicriteria decision analysis? **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [S.L.], v. 105, p. 1-7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.04.013>. Acesso em: 12 jan. 2024.