

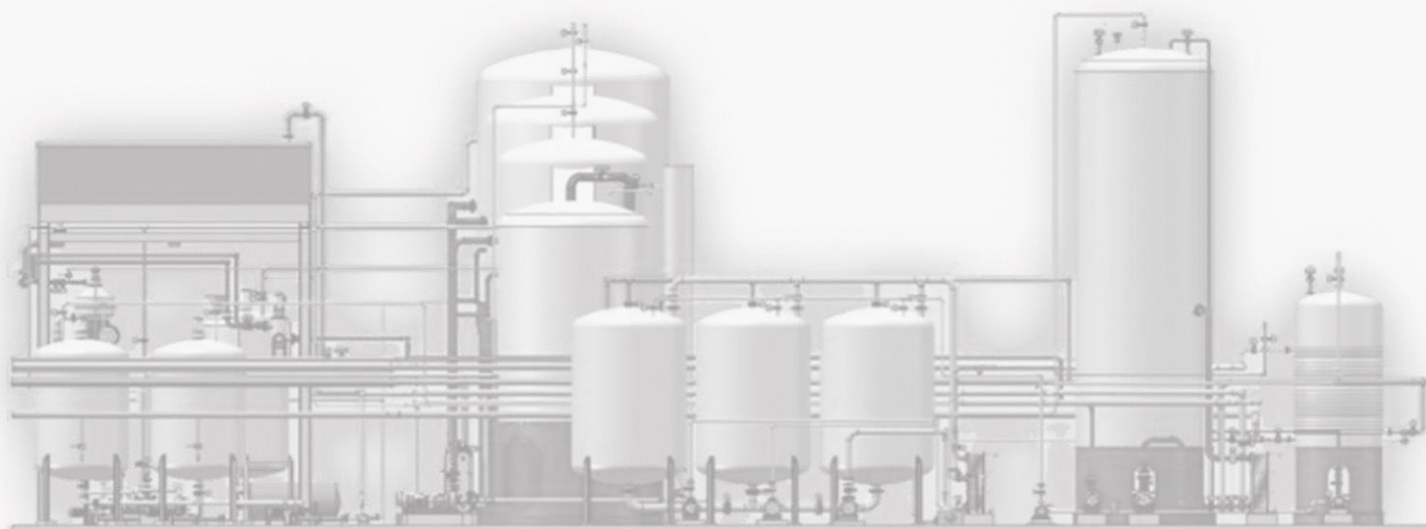


Andrietta
Soluções em Bioprocessos

SIMAD

SIMAD – Sistema Integrado de Monitoramento a Distância

ANDRIETTA – Tecnologia em Bioprocessos



Dr. Silvio Roberto Andrietta

SIMAD – SISTEMA INTEGRADO DE MONITORAMENTO A DISTÂNCIA

1. INTRODUÇÃO

Na indústria sucroenergética, a comparação do desempenho entre diferentes unidades industriais constitui uma tarefa complexa. A principal dificuldade está associada às diferenças tecnológicas entre as plantas, das quais se esperam níveis distintos de eficiência.

Como exemplo, destacam-se as unidades de extração, nas quais podem ser empregados difusores ou sistemas de moenda com diferentes números de ternos operando em série. Do ponto de vista técnico, é esperado que uma moenda com seis ternos apresente maior eficiência de extração em comparação a uma com quatro ternos. Caso essa diferença não seja devidamente considerada na avaliação de desempenho, a unidade equipada com menor número de ternos tenderá a apresentar menor eficiência industrial, mesmo operando em condições mais favoráveis. Nesse caso, a limitação observada é de natureza tecnológica, e não necessariamente operacional.

Outra dificuldade relevante decorre do fato de que as unidades sucroenergéticas operam, em geral, com duas rotas produtivas distintas — açúcar e etanol — sendo a eficiência industrial global diretamente influenciada pelo mix de produção adotado. Isso se deve às diferenças inerentes às eficiências de conversão associadas a cada produto. Em termos gerais, as perdas de ART (Açúcares Redutores Totais) tendem a ser menores na produção de açúcar e mais elevadas na produção de etanol. Consequentemente, quanto maior a participação do açúcar no mix produtivo, maior tende a ser a eficiência industrial observada.

Atualmente, diversos indicadores de desempenho buscam incorporar o efeito do mix de produção na avaliação da eficiência industrial, como o Rit-Stab, o RTC, entre outros. Entretanto, tais indicadores não consideram explicitamente as características tecnológicas dos equipamentos instalados na planta, o que pode resultar em favorecimento de unidades tecnologicamente mais avançadas, independentemente de sua qualidade operacional.

No contexto proposto pela Andrietta – Tecnologia em Bioprocessos, o aspecto central da avaliação de desempenho está na capacidade da unidade de extrair o máximo potencial dos equipamentos disponíveis. Para isso, define-se a eficiência industrial objetiva como aquela determinada em função das limitações tecnológicas da planta, representando o desempenho máximo esperado sob condições ideais de operação compatíveis com sua configuração. Por sua vez, a eficiência relativa expressa o desvio entre o desempenho real e esse potencial teórico, permitindo avaliar a qualidade da operação de forma independente da tecnologia instalada.

Adicionalmente, o rendimento fermentativo é determinado por meio de balanço de massa, sendo avaliado em conjunto com a eficiência industrial. A análise integrada desses parâmetros permite identificar, em situações de desempenho inferior, se as perdas estão predominantemente associadas ao processo fermentativo ou a outros setores da unidade industrial.

Essa abordagem confere ao sistema um caráter diagnóstico robusto, permitindo a identificação dos pontos críticos do processo e o direcionamento de ações operacionais para a redução de perdas acima do esperado.

2. METODOLOGIA

2.1. Determinação das eficiências industrial, industrial objetiva e relativa

A determinação dos parâmetros de avaliação da planta é realizada a partir de dados operacionais fornecidos pela unidade avaliada, por meio de uma planilha padrão estruturada. Previamente à análise, a unidade deve ser cadastrada no sistema mediante o preenchimento de um formulário específico contendo as informações relativas às tecnologias empregadas em cada setor do processo.

Com base nessas informações, são atribuídas as eficiências setoriais de referência da planta, as quais são utilizadas no cálculo da eficiência industrial objetiva. Os valores dessas eficiências, para cada tecnologia aplicada, estão apresentados na Tabela 1.

Para a determinação do rendimento fermentativo, quando as análises de ART do mosto são realizadas pelo método convencional baseado na redução do cobre (método de Fehling),

aplica-se uma correção empírica. Nessa condição, adota-se como valor base de rendimento 90%, sendo subtraído 0,6 ponto percentual para cada incremento de 0,1% de substâncias redutoras totais presentes no vinho.

Tabela 1. Valores de eficiências setoriais objetiva atribuída para cada setor segundo a tecnologia aplicada

VALORES DE EFICIÊNCIA SETORIAIS		
Tecnologia	Valor	Unidade
Recepção de cana		
Cana inteira ou picada sem lavagem	99,50	%
Cana inteira com lavagem	98,50	%
Cana picada com lavagem	98,00	%
Extração		
Difusor	97,5	%
Moenda com 6 ternos	96,5	%
Moenda com 5 ternos	96	%
Moenda com 4 ternos	95,5	%
Tratamento de caldo		
Difusor com reciclo de lodo	100	%
Difusor sem reciclo de lodo	99,8	%
Moenda	99,5	%
Fábrica de açúcar		
Retenção fábrica inferior a 70% (SJM)	99	%
Retenção fábrica inferior entre 70-75% (SJM)	98,5	%
Retenção fábrica maior que 75% (SJM)	98	%
Fermentação		
Mosto a base de caldo	90	%
Mosto a base de caldo e melaço (cromatográfica)	90	%
Mosto a base de caldo e melaço (Redução cobre)	90-(ARRT*6)	%
Destilação		
Convencional	99,5	%

A eficiência industrial objetiva é determinada por meio de um balanço global de massa de ART, realizado de forma inversa a partir dos produtos finais do processo. Esse procedimento utiliza as eficiências setoriais de referência associadas aos seis setores que compõem a unidade industrial, conforme apresentado na Tabela 1. As equações empregadas na determinação desse parâmetro são apresentadas a seguir:

1. Massa de ART recuperado em açúcar ($MA_{ART-RE-AC}$)

$$MA_{ART-RE-AC} = \frac{MA_{AC-PR-100}}{0,95}$$

$MA_{AC-PR-100}$ – Massa de açúcar produzido a 100% (contida planilha dado)

Fator de conversão de sacarose para ART – 0,95

2. Massa de etanol recuperado em etanol ($MA_{ART-RE-ET}$)

$$MA_{ART-RE-ET} = \frac{VO_{ET-PR-100} \times 0,79}{0,511}$$

VO_{ET-PR-100} – Volume de etanol produzido a 100% (contida planilha dado)

Densidade do etanol a 100% - 0,79

Fator estequiométrico – 0,511 gET/gART

3. Massa ART melão vendido (MA_{ART-MEL-VE})

$$MA_{ART-MEL-VE} = MA_{MEL-VE} \times \frac{ART_{MEL-VE}}{100}$$

MA_{MEL-VE} – Massa de melão vendido

ART_{MEL-VE} – Concentração de ART do melão vendido

4. Massa ART melão comprado (MA_{ART-MEL-CO})

$$MA_{ART-MEL-CO} = MA_{MEL-CO} \times \frac{ART_{MEL-CO}}{100}$$

MA_{MEL-CO} – Massa de melão comprada

ART_{MEL-VE} – Concentração de ART do melão comprado

5. Variação da massa de ART contido no melão em processo (CMELD)

$$CMELD = MA_{ART-TQ-MEL-D} - MA_{ART-TQ-MEL-DA}$$

MA_{ART-TQ-MEL-D} – Massa de ART no tanque de mel no dia de hoje

MA_{ART-TQ-MEL-DA} – Massa de ART no tanque de mel no dia anterior (ontem)

6. Massa de ART recuperado total (MA_{ART-RE-TOT})

$$MA_{ART-RE-TOT} = MA_{ART-RE-AC} + MA_{ART-RE-ET} + CMELD + MA_{ART-MEL-VE}$$

7. Massa ART entrada fábrica (MA_{ART-EN-FA})

$$MA_{ART-EN-FA} = \frac{MA_{ART-RE-AC} \times 100}{SJM}$$

SJM – Retenção fábrica

MA_{ART-RE-AC} – Massa de açúcar produzido a 100% (contida planilha dado)

8. Massa ART contido melaço ($MA_{ART-MEL}$)

$$MA_{ART-MEL} = MA_{ART-EN-FA} - \left(MA_{AC-PR-100} + MA_{ART-EN-FA} \times \left(1 - \frac{EF_{FA}}{100} \right) \right)$$

EF_{FA} – Eficiência fábrica (dependente do nível de esgotamento do mel – operação)

9. Massa ART entrada destilação ($MA_{ART-EN-DE}$)

$$MA_{ART-EN-DE} = \frac{MA_{ART-RE-ET}}{EF_{DE}} \times 100$$

EF_{DE} – Eficiência destilação (operação)

10. Massa ART entrada fermentação ($MA_{ART-EN-FE}$)

$$MA_{ART-EN-FE} = \frac{MA_{ART-EN-DE}}{EF_{FE}} \times 100$$

EF_{FE} – Eficiência fermentação (operação)

11. Massa ART entrada caldo fermentação ($MA_{ART-EN-CA-FE}$)

$$MA_{ART-EN-CA-FE} = MA_{ART-EN-FE} - MA_{ART-MEL} - MA_{ART-MEL-CO}$$

12. Massa ART saída do tratamento de caldo ($MA_{ART-SAI-TC}$)

$$MA_{ART-SAI-TC} = MA_{ART-EN-CA-FE} + MA_{ART-EN-FA}$$

13. Massa ART entrada tratamento de caldo ($MA_{ART-EN-TC}$)

$$MA_{ART-EN-TC} = \frac{MA_{ART-SAI-TC}}{EF_{TC}} \times 100$$

EF_{TC} – Eficiência tratamento caldo (operação)

14. Massa ART entrada extração ($MA_{ART-EM-EX}$)

$$MA_{ART-EM-EX} = \frac{MA_{ART-EN-TC}}{EF_{EX}} \times 100$$

EF_{EX} – Eficiência extração (operação)

15. Massa ART Entrada indústria objetiva ($MA_{ART-EN-IND-OBJ}$)

$$MA_{ART-EN-IND-OBJ} = \frac{MA_{ART-EN-EX}}{EF_{PA}} \times 100 + MA_{ART-MEL-CO} + CMELD$$

EF_{PA} – Eficiência Pátio (operação)

16. Eficiência industrial objetiva ($EF_{IND-OBJ}$)

$$EF_{IND-OBJ} = \frac{MA_{ART-RE-TOT}}{MA_{ART-EN-IND-OBJ}} \times 100$$

Para a obtenção dos valores de Eficiência Relativa, é necessário obter, além da eficiência Industrial objetiva a eficiência industrial real da planta, utilizando-se as seguintes equações:

1. Massa ART entrado indústria pela cana ($MA_{ART-EN-IND-CA}$)

$$MA_{ART-EN-IND-CA} = MOI_{CA} \times \frac{ART_{CA}}{100}$$

MOI_{CA} – Massa de cana moída

ART_{CA} – Concentração de ART cana

2. Massa ART entrado indústria total ($MA_{ART-EN-IND}$)

$$MA_{ART-EN-IND} = MA_{ART-EN-IND-CA} + MA_{ART-MEL-CO}$$

3. Eficiência industrial (EF_{IND})

$$EF_{IND} = \frac{MA_{ART-RE-TOT}}{MA_{ART-EN-IND}} \times 100$$

Com os valores de eficiência industrial objetiva e eficiência industrial, pode-se obter o valor de eficiência relativa (EF_{REL}).

$$EF_{REL} = \frac{EF_{IND}}{EF_{IND-OBJ}} \times 100$$

2.2. Determinação do rendimento fermentativo e rendimento fermentativo relativo

Para a avaliação do processo fermentativo, utiliza-se o parâmetro rendimento fermentativo relativo, definido como a razão entre o rendimento fermentativo real e o rendimento fermentativo objetivo. Este último é determinado considerando-se a natureza da matéria-prima empregada e o método analítico utilizado na quantificação de ART.

Essa diferenciação é necessária devido à presença de substâncias redutoras não açúcares no vinho, em especial melanoidinas formadas durante o processo de fabricação de açúcar. Tais compostos, presentes em maior concentração em mostos à base de melaço, são quantificados como açúcares redutores quando se utiliza o método analítico baseado na redução de cobre (licor de Fehling), levando à superestimação da concentração de açúcares fermentescíveis.

Dessa forma, para garantir uma avaliação comparativa adequada entre unidades, torna-se necessário corrigir o rendimento fermentativo objetivo em função da presença de compostos não fermentescíveis. Para unidades que operam exclusivamente com caldo ou que utilizam cromatografia líquida para determinação dos açúcares, adota-se como referência um rendimento fermentativo de 90% do valor teórico, equivalente a 0,46 g de etanol por g de ART. Para unidades que processam melaço e utilizam métodos baseados na redução de cobre, aplica-se uma correção empírica, descontando-se 0,6 ponto percentual do rendimento base (90%) para cada 0,1% de substâncias redutoras não açúcares presentes no vinho fermentado.

A determinação do rendimento fermentativo real é realizada conforme a metodologia desenvolvida pela Andrietta – Tecnologia em Bioprocessos. Nesse procedimento, a produção de etanol na fermentação é estimada a partir da produção real de etanol (100%), acrescida das perdas de etanol na vinhaça e na flegmaça, as quais são calculadas com base na eficiência real de destilação da unidade avaliada.

A massa de ART alimentada à fermentação é determinada a partir do volume de mosto, medido por sistemas de vazão integrados ao longo de 24 horas, e da concentração de ART no mosto, obtida por meio de análises em amostras compostas, ponderadas em função da

vazão. A determinação desses parâmetros é realizada conforme as equações apresentadas a seguir:

1. Massa de etanol produzido na fermentação ($MA_{ET-PR-FE}$)

$$MA_{ET-PR-FE} = \frac{VO_{ET-PR-100}}{EF_{DER}} \times 100 \times 0,79$$

$VO_{ET-PR-100}$ – Volume de etanol produzido a 100% (produção)

EF_{DER} – Eficiência de destilação real (medida na unidade)

Densidade do etanol a 100% - 0,79

2. Massa de ART entrado na fermentação para concentração de ART com unidade %(p/v)

$$MA_{ART-EN-FE-R} = VO_{MO} \times \frac{ART_{MO}}{100}$$

$MA_{ART-EN-FE-R}$ – Massa de ART real entrada fermentação (medidores de vazão)

VO_{MO} – Volume de mosto

ART_{MO} – Concentração de ART no mosto em %(p/v)

3. Massa de ART entrado na fermentação para concentração de ART com unidade %(p/p)

$$MA_{ART-EN-FE-R} = VO_{MO} \times \frac{ART_{MO}}{100} \times DE_{MO}$$

$MA_{ART-EN-FE-R}$ – Massa de ART real entrada fermentação (medidores de vazão)

VO_{MO} – Volume de mosto

ART_{MO} – Concentração de ART no mosto em %(p/p)

DE_{MO} – Densidade do mosto

4. Rendimento fermentativo (RE_{FE})

$$RE_{FE} = \frac{MA_{ET-PR-FE-R}}{MA_{ART-EN-FE-R}} \times \frac{100}{0,511}$$

Fator estequiométrico = 0,511

5. Rendimento fermentativo relativo (RE_{FE-REL})

$$RE_{FE-REL} = \frac{RE_{FE}}{RE_{FE-OBJ}} \times 100$$

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados de desempenho das unidades são apresentados por meio de relatórios técnicos estruturados, contendo tabelas com valores médios mensais e acumulados de safra, gráficos de média móvel para eficiência industrial e rendimento fermentativo, além de análises comparativas com outras unidades cadastradas no sistema SIMAD.

A metodologia desenvolvida pela Andrietta – Tecnologia em Bioprocessos tem como objetivo central avaliar o desempenho de uma unidade industrial em relação ao seu potencial intrínseco, considerando explicitamente a tecnologia empregada, o mix de produção e a retenção de açúcares na fábrica. Nesse contexto, os indicadores eficiência relativa e rendimento fermentativo relativo são definidos de forma a isolar os efeitos das condições estruturais e operacionais da planta, permitindo uma avaliação comparativa baseada exclusivamente na qualidade da operação.

Dessa forma, tais parâmetros possibilitam uma análise consistente do desempenho operacional, eliminando vieses associados às diferenças tecnológicas entre unidades e às variações no mix produtivo, conferindo maior robustez à interpretação dos resultados.

A Figura 1 apresenta um exemplo de gráfico com o perfil temporal da eficiência industrial e do rendimento fermentativo ao longo dos dias de safra, calculados com base em médias móveis, permitindo a identificação de tendências operacionais e desvios de desempenho.

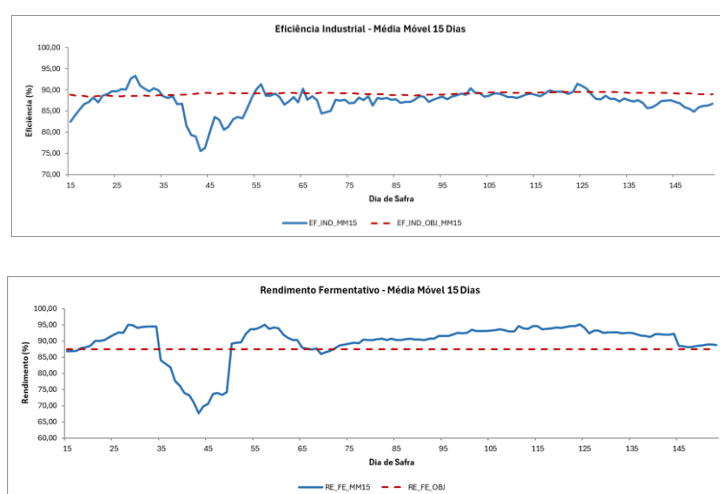


Figura 1. Perfis dos parâmetros avaliados

A Figura 1 apresenta a evolução dos parâmetros de desempenho — eficiência industrial e rendimento fermentativo — ao longo dos dias de safra. As linhas tracejadas representam os valores de referência correspondentes à eficiência industrial objetiva e ao rendimento fermentativo objetivo.

A análise conjunta desses perfis permite a identificação de períodos de operação atípica, caracterizados por desvios em relação aos valores de referência, os quais estão associados à redução de desempenho da unidade. Adicionalmente, a correlação entre os comportamentos da eficiência industrial e do rendimento fermentativo possibilita inferir se tais perdas estão predominantemente relacionadas ao processo fermentativo ou a outros setores da planta.

Essa abordagem confere elevado poder diagnóstico à metodologia, permitindo a identificação dos pontos de perda ao longo do processo e o direcionamento de ações corretivas nos setores responsáveis pelos desvios observados.

4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADO

Os valores de eficiência relativa obtidos permitem avaliar o desempenho da unidade em relação ao seu potencial tecnológico, considerando as eficiências setoriais de referência e as condições operacionais assumidas no modelo.

Valores de eficiência relativa iguais a 100% indicam que o desempenho real da unidade está em conformidade com o desempenho esperado, ou seja, as eficiências setoriais atribuídas foram efetivamente atingidas. Em determinadas situações, podem ser observados valores superiores a 100%, o que é admissível e reflete condições operacionais favoráveis, nas quais o desempenho de determinados setores supera os valores de referência adotados.

Entretanto, valores de eficiência relativa superiores a 103% não são considerados fisicamente consistentes no contexto da metodologia proposta, sendo geralmente indicativos de inconsistências nos dados de entrada, tais como erros de medição, amostragem ou registro de informações operacionais.

Com base nesse critério, propõe-se a seguinte classificação de desempenho da unidade:

- **Muito satisfatório:** valor médio de safra da eficiência relativa $\geq 100\%$
- **Satisfatório:** valor médio de safra da eficiência relativa entre 98% e 100%
- **Insatisfatório:** valor médio de safra da eficiência relativa $< 98\%$

A comparação de desempenho entre diferentes unidades é realizada com base na eficiência relativa, a qual permite posicionar a unidade avaliada em relação a um conjunto de plantas com distintas configurações tecnológicas, eliminando os efeitos associados à tecnologia e ao mix de produção.

A Tabela 2 apresenta, a título de exemplo, a classificação de uma unidade em um conjunto de 15 plantas avaliadas. A unidade em análise encontra-se destacada, permitindo a visualização de seu posicionamento relativo em termos de desempenho operacional.

Tabela 2. Comparação de desempenho de unidades avaliadas (safra 2025)

COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DAS UNIDADES							
Safra: 2025							
Ranking	Código da Unidade	Eficiência Industrial (%)	Eficiência Industrial Objetiva (%)	Eficiência Industrial Relativa (%)	Rendimento Fermentativo (%)	Rendimento Fermentativo Objetivo (%)	Rendimento Fermentativo Relativo (%)
1	UN-64-003	90,43	88,71	101,93	90,32	87,48	103,25
2	UN-19-004	90,90	90,82	100,10	87,09	89,40	97,42
3	UN-67-004	87,87	88,58	99,20	87,38	90,00	97,09
4	UN-67-005	88,04	88,79	99,16	90,08	90,00	100,09
5	UN-18-005	89,74	90,91	98,72	83,06	85,00	97,72
6	UN-14-003	88,02	89,26	98,61	89,50	90,00	99,45
7	UN-18-006	88,55	90,51	97,84	81,31	85,08	95,57
8	UN-18-007	87,14	89,08	97,82	89,94	87,48	102,81
9	UN-67-003	86,21	88,21	97,73	106,48	88,20	120,72
10	UN-19-001	84,52	87,25	96,86	87,22	87,48	99,71
11	UN-19-003	87,44	90,53	96,59	81,15	90,00	90,16
12	UN-19-002	85,72	89,19	96,11	82,65	87,48	94,48
13	UN-14-002	85,01	89,58	94,90	86,49	90,00	96,10
14	UN-19-005	86,14	91,42	94,23	84,11	90,00	93,46
15	UN-16-001	82,13	89,99	91,26	85,32	90,00	94,80

A Figura 2 apresenta o desempenho das 15 unidades avaliadas no ano de 2025, com base no parâmetro de eficiência relativa. As unidades são classificadas por meio de codificação de cores, de acordo com a faixa de desempenho obtida: verde para desempenho muito satisfatório, amarelo para desempenho satisfatório e vermelho para desempenho insatisfatório.

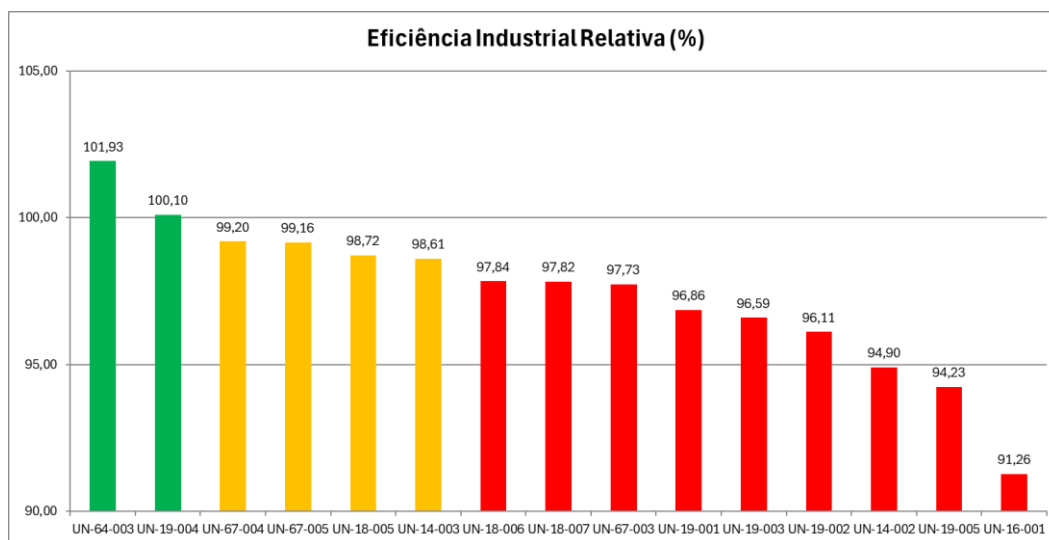


Figura 2 – Classificação de desempenho das unidades avaliadas