

Prof. Marcus Ennes
Prof. Felipe Garcia

Química geral

UNIDADE 20: Estequiometria – Rendimento reacional

As indústrias e laboratórios que se utilizam de reações químicas enfrentam um grande desafio desde seu surgimento. Os processos químicos não são perfeitos, ocorrendo em grande parte com perdas, e devido à isso todo tipo de otimização é bem-vinda. As perdas são consequências naturais das imperfeições do processo. Fatores que vão desde a pureza dos reagentes, até o uso de equipamentos menos sofisticados podem impactar significativamente a produtividade em termos de rendimento.

Na indústria farmacêutica diversas rotas de síntese de medicamentos são testadas, não só para avaliação em termos de rendimento, mas também em termos de tempo de produção e questões ambientais. O captopril por exemplo, fármaco amplamente utilizado para o tratamento de doenças cardiovasculares como a hipertensão arterial, foi descoberto na década de 70. Na primeira rota sintética, proposta em 1977, o rendimento global era de apenas 19%. Desde então diversos tipos alternativos de metodologia sintética vem sido descritos, com destaque para um proposto em 1982, que conseguia aumentar o rendimento para próximo de 80%, que é considerado um alto rendimento para o meio.



Rendimento reacional

Como já visto anteriormente, no capítulo de pureza dos reagentes, dificilmente, no cotidiano, as reações químicas irão ocorrer de maneira ideal. Grande parte dos processos ocorre com perdas, o que pode ser justificado por alguns fatores como impurezas junto dos reagentes, perdas de massa ao longo do processo e outros diversos fatores.

Nesse capítulo, o foco será em reações que, por diversos motivos como impureza dos reagentes, perda de massa ou colisões inefetivas ao longo do processo, ocorram com um rendimento inferior a 100%. Desta forma a quantidade de produto que será formado, de fato, será inferior à quantidade prevista estequiometricamente.

Num processo industrial hipotético de produção de alumínio, por exemplo: suponha que a quantidade prevista de alumínio a ser formado é de 1 tonelada, porém, na realidade, foi obtida uma quantidade de 700 kg desse metal, o que equivale a 70% do total esperado inicialmente. Assim, podemos afirmar que o processo em questão ocorreu com um rendimento de 70% com relação ao esperado.

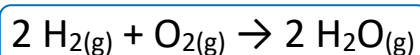
Os problemas poderão trabalhar de duas maneiras, ou fornecem o rendimento para ser utilizado nos cálculos, ou pedem o valor do rendimento a partir das informações de quanto foi produzido.

Descontando o valor do rendimento

No primeiro caso, o percentual relativo ao rendimento reacional já é conhecido. Então, todo o cálculo estequiométrico será feito normalmente, sendo necessário que o desconto do rendimento reacional seja feito apenas em um último momento.

O raciocínio em questão será abordado nos próximos dois exemplos:

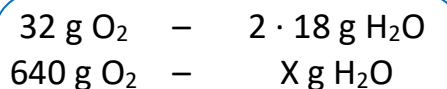
Exemplo 1: Sabe-se que a reação de formação da água pode ser representada pela seguinte equação a seguir:



Determine a massa de $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ formada após a reação de 640g de O_2 com hidrogênio suficiente, supondo que o processo ocorra com um rendimento reacional de 60%.

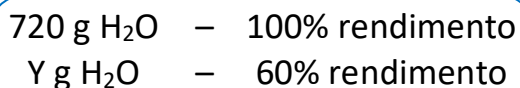
Dados: Massas Molares (g/mol) $\text{O}_2 = 32$; $\text{H}_2\text{O} = 18$.

Resolução: Como as massas molares já foram fornecidas, o primeiro passo a se fazer é a estequiometria, porém supondo o rendimento teórico, isto é, de 100%. Assim, teremos:



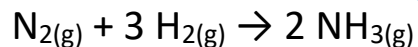
$$X = \frac{640 \cdot 2 \cdot 18}{32} = 720 \text{ g H}_2\text{O}$$

Essa quantidade considera que o processo ocorra com 100% de rendimento. No enunciado, foi informado que o rendimento real é de 60%. Assim, o segundo e último passo será relativo à determinação da quantidade formada considerando-se o rendimento real:



$$X = \frac{60 \cdot 720}{100} = 432 \text{ g H}_2\text{O}$$

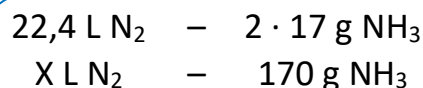
Exemplo 2: A reação de síntese de amônia, também conhecida como processo Haber-Bosch, pode ser representada a partir da seguinte equação:



Assim, determine qual será o volume de N_2 necessário, medido nas CNTP, para que seja possível a formação de 170g de amônia (NH_3).

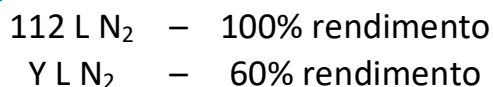
Dado: Massa molar $\text{NH}_3 = 17\text{g/mol}$

Resolução: O primeiro passo é determinar, considerando-se a proporção estequiométrica fornecida na equação, qual será o volume de nitrogênio (N_2) necessário à produção de 170 g de amônia (NH_3). Assim, teremos:



$$X = \frac{170 \cdot 2 \cdot 17}{22,4} = 112 \text{ L N}_2$$

Sabemos, porém, que o rendimento da reação é de 60%, conforme informado no enunciado. Assim, para finalizar a resolução, fazemos:



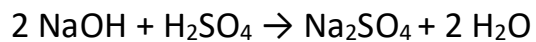
$$X = \frac{60 \cdot 112}{100} = 67,2 \text{ L N}_2$$

Determinação do rendimento

No segundo caso possível, a quantidade de produto final será previamente fornecida, porém, não se saberá o valor do percentual do rendimento da reação, assim, o procedimento adotado será o seguinte: primeiro, faremos a estequiometria normalmente, supondo o rendimento teórico, ou seja, de 100%. Em seguida, basta que se faça uma comparação do valor obtido considerando-se o rendimento teórico com o valor fornecido pelo enunciado, que será, certamente, relativo ao rendimento

real. O raciocínio em questão será desenvolvido nos dois exemplos a seguir:

Exemplo 1: Em um laboratório, titulou-se uma solução de ácido sulfúrico utilizando-se uma solução de NaOH. A reação ocorre de acordo com a seguinte equação:



Durante o processo, foram empregados 16g da base em questão. Ao final do procedimento, a massa de Na_2SO_4 formado foi pesada, constatando-se a formação de 14,2g do respectivo sal. De posse dos dados em questão, determine qual será o percentual de rendimento do processo em questão.

Massas Molares (g/mol): $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 142$; $\text{NaOH} = 40$.

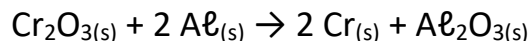
Resolução: O primeiro passo é determinar, inicialmente, qual seria a quantidade teórica de Na_2SO_4 que poderia ser produzida, isto é, considerando-se o rendimento de 100% do processo em questão. Considerando-se a proporção estequiométrica fornecida pela equação (2 mols de NaOH consumido para cada 1 mol de Na_2SO_4 formado), teremos a seguinte relação:

$$\begin{array}{r} 2 \cdot 40 \text{ g NaOH} - 142 \text{ g Na}_2\text{SO}_4 \\ 16 \text{ g NaOH} - X \text{ g Na}_2\text{SO}_4 \end{array}$$
$$X = \frac{16 \cdot 142}{2 \cdot 40} = 28,4 \text{ g Na}_2\text{SO}_4$$

Essa seria a quantidade de Na_2SO_4 obtida de acordo com o rendimento teórico (100%), logo, para descobrir qual o rendimento real da reação, devemos descobrir o percentual relativo à quantidade de 14,2g de Na_2SO_4 formado de fato. Assim, teremos:

$$\begin{array}{r} 28,4 \text{ g Na}_2\text{SO}_4 - 100\% \text{ rendimento} \\ 14,2 \text{ g Na}_2\text{SO}_4 - Y\% \text{ rendimento} \end{array}$$
$$Y = \frac{14,2 \cdot 100}{28,4} = 50\% \text{ rendimento}$$

Exemplo 2: O cromo é um metal empregado na produção do aço inox e no revestimento (cromação) de algumas peças metálicas. Esse metal é produzido por meio da reação abaixo:



Uma amostra contendo 456kg de Cr_2O_3 puro reagiu com alumínio suficiente, e gerou uma massa de Al_2O_3 igual a 214,2 kg. De posse dessas informações, determine o percentual relativo ao rendimento do processo em questão.

Massas Molares (g/mol) - $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 152$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 102$.

Resolução: O primeiro passo a se fazer é a determinação de qual seria a quantidade de Al_2O_3 que seria formado, supondo um rendimento de 100%. Assim, teremos:

$$\begin{array}{r} 152 \text{ g Cr}_2\text{O}_3 - 102 \text{ g Al}_2\text{O}_3 \\ 456 \text{ kg Cr}_2\text{O}_3 - X \text{ g Al}_2\text{O}_3 \end{array}$$
$$X = \frac{456 \cdot 102}{152} = 306 \text{ kg Al}_2\text{O}_3$$

De posse desse valor, que corresponde à quantidade de produto formado supondo 100% de rendimento reacional, podemos agora então fazer a comparação com o valor fornecido, e saber qual é o valor do rendimento real do processo. Assim, teremos:

$$\begin{array}{r} 306 \text{ kg Al}_2\text{O}_3 - 100\% \text{ rendimento} \\ 214,2 \text{ kg Al}_2\text{O}_3 - Y\% \text{ rendimento} \end{array}$$
$$Y = \frac{214,2 \cdot 100}{306} = 70\% \text{ rendimento}$$

Rendimento e pureza simultaneamente

Para fins de aprofundamento, esse caso irá tratar de situações em que teremos o percentual da pureza da amostra e o rendimento reacional no mesmo enunciado. Cabe a nós adotar o seguinte raciocínio:

1) Descontamos as impurezas da amostra e determinamos a quantidade de reagente puro que irá participar do processo;

2) Procedemos com o cálculo estequiométrico normalmente;

3) Descontamos a quantidade relativa ao rendimento real do processo reacional.

Exemplo: Sabe-se que o calcário é constituído, em sua maior parte, por carbonato de cálcio (CaCO_3). Uma amostra contendo 400g de calcário com 75% de pureza foi titulada com ácido sulfúrico (H_2SO_4) suficiente, gerando o sal sulfato de cálcio (CaSO_4) como produto principal. A reação em questão pode ser representada pela seguinte equação química, já balanceada:



De posse dessas informações, determine qual será a massa total do sal formado, supondo que o processo apresente um rendimento reacional de 60%.

Massas Molares (g/mol) $\text{CaCO}_3 = 100$ $\text{CaSO}_4 = 136$

Resolução: O primeiro passo a se fazer é determinar qual será a quantidade de CaCO_3 que de fato participou do processo reacional, então, vamos ao desconto das impurezas:

400 g amostra – 100% pureza
X g CaCO_3 – 75% pureza

$$X = \frac{75 \cdot 400}{100} = 300 \text{ g CaCO}_3$$

Assim, de posse da quantidade de CaCO_3 puro na amostra, basta determinar qual será a quantidade de CaSO_4 que será formado, ainda supondo o rendimento teórico (100%). Assim, teremos:

100 g CaCO_3 – 136 g CaSO_4
300 g CaCO_3 – Y g CaSO_4

$$Y = \frac{300 \cdot 136}{100} = 408 \text{ g CaSO}_4$$

Então, de posse dessa quantidade, que se trata da massa de CaSO_4 formada supondo-se um rendimento reacional de 100%, podemos agora determinar qual será a massa formada considerando-se o rendimento real. Finalmente, teremos:

408 g CaSO_4 – 100% rendimento
W g CaSO_4 – 60% rendimento

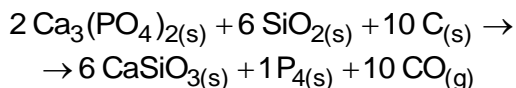
$$X = \frac{60 \cdot 400}{100} = 244,8 \text{ g CaSO}_4$$

NOTAS:



ATIVIDADES PROPOSTAS

1) O fósforo branco, de fórmula P_4 , é uma substância bastante tóxica. É utilizado para fins bélicos como arma química de guerra em granadas fumígenas. Pode ser obtido a partir do aquecimento do fosfato de cálcio, areia e coque em um forno especial, conforme mostrado na equação balanceada da reação:

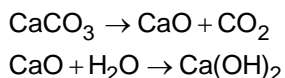


A massa de fósforo branco obtida quando se aquece 1860 g de fosfato de cálcio com rendimento de 80% é de ?

Dados: Ca = 40; P = 31; O = 16.

- a) 270,4
- b) 315
- c) 297,6
- d) 400
- e) 180,8

2) Uma reação bastante comum que sugere como ocorre a transformação da matéria é a que transforma o calcário obtido a partir das explorações dos depósitos em hidróxido de cálcio. A reação ocorre em duas etapas conforme equações químicas apresentadas a seguir:



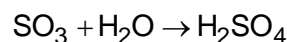
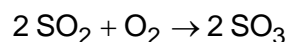
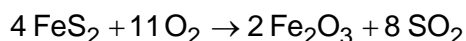
Considerando que na primeira etapa o calcário utilizado tenha 65% de pureza em carbonato de cálcio e que a segunda reação ocorre com 80% de rendimento, qual é a massa aproximada de hidróxido de cálcio produzida a partir de uma tonelada de calcário?

Dados: Ca = 40; C = 12; O = 16; H = 1.

- a) 364 kg.
- b) 385 kg.
- c) 481 kg.
- d) 650 kg.
- e) 800 kg.

3) Na busca por ouro, os garimpeiros se confundem facilmente entre o ouro verdadeiro e o chamado ouro de tolo, que tem em sua composição 90% de um minério chamado pirita (FeS_2). Apesar do engano, a pirita não é descartada, pois é utilizada na produção do ácido sulfúrico, que ocorre com rendimento global de 90%, conforme as equações químicas apresentadas.

Considere as massas molares: FeS_2 (120 g/mol), O_2 (32 g/mol), Fe_2O_3 (160 g/mol), SO_2 (64 g/mol), SO_3 (80 g/mol), H_2O (18 g/mol), H_2SO_4 (98 g/mol).



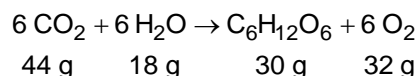
Qual é o valor mais próximo da massa de ácido sulfúrico, em quilograma, que será produzida a partir de 2,0 kg de ouro de tolo?

- a) 0,33
- b) 0,41
- c) 2,6
- d) 2,9
- e) 3,3

4) O ano de 2010 foi o Ano Internacional da Biodiversidade: um alerta ao mundo sobre os riscos da perda irreparável da biodiversidade do planeta; um clamor mundial para a destruição deste imenso patrimônio quimiobiológico. A vida na Terra é uma sequência de reações químicas diversas, com ênfase para as oxidações.

<<https://tinyurl.com/y6qvrjyy>> Acesso em: 05.02.2019. Adaptado.

A incorporação do gás carbônico (CO_2), na fotossíntese representada, é um exemplo, onde as substâncias interagem numa proporção constante.

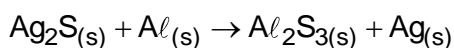


De acordo com essa proporção e admitindo

rendimento de 50%, se uma planta absorver 66 g de CO_2 , a quantidade de glicose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) produzida, em gramas, será

- 22,5.
- 25.
- 30.
- 36,5.
- 45.

5) Objetos de prata sofrem escurecimento devido à sua reação com enxofre. Estes materiais recuperam seu brilho característico quando envoltos por papel alumínio e mergulhados em um recipiente contendo água quente e sal de cozinha. A reação não balanceada que ocorre é:



Dados da massa molar dos elementos (g mol^{-1}):
 $\text{Ag} = 108$; $\text{S} = 32$.

Utilizando o processo descrito com 80% de rendimento, a massa aproximada de prata metálica regenerada na superfície de um objeto que contenha 7,44 g de Ag_2S , será

- 0,54 g.
- 1,08 g.
- 1,91 g.
- 2,16 g.
- 5,18 g.

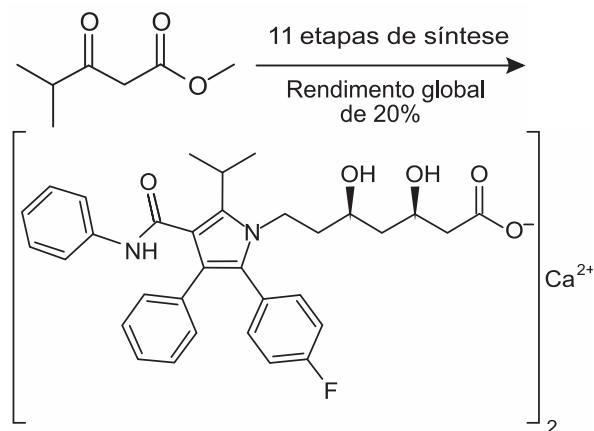
6) Pesquisadores desenvolveram uma nova e mais eficiente rota sintética para produzir a substância atorvastatina, empregada para reduzir os níveis de colesterol. Segundo os autores, com base nessa descoberta, a síntese da atorvastatina cálcica ($\text{CaC}_{66}\text{H}_{68}\text{F}_2\text{N}_4\text{O}_{10}$, massa molar igual a 1154 g/mol) é realizada a partir do éster 4-metil-3-oxopentanoato de metila ($\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_3$, massa molar igual a 144 g/mol).

Unicamp descobre nova rota para produzir medicamento mais vendido no mundo.

Disponível em: www.unicamp.com.br. Acesso em: 26 out. 2015 (adaptado).

Considere o rendimento global de 20% na síntese de atorvastatina cálcica a partir desse éster, na proporção de 1:1. Simplificadamente,

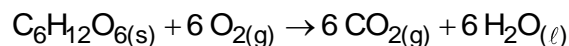
o processo é ilustrado na figura.



Considerando o processo descrito, a massa, em grama, de atorvastatina cálcica obtida a partir de 100 g do éster é mais próxima de

- 20.
- 29.
- 160.
- 202.
- 231.

7) Por meio de reações químicas que envolvem carboidratos, lipídeos e proteínas, nossas células obtêm energia e produzem gás carbônico e água. A oxidação da glicose no organismo humano libera energia, conforme ilustra a equação química, sendo que aproximadamente 40% dela é disponibilizada para atividade muscular.



$$\Delta_{\text{C}}\text{H} = -2.800 \text{ kJ}$$

Considere as massas molares (em g mol^{-1}): $\text{H} = 1$; $\text{C} = 12$; $\text{O} = 16$.

LIMA, L. M.; FRAGA, C. A. M.; BARREIRO, E. J. *Química na saúde*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2010 (adaptado).

Na oxidação de 15 gramas de glicose com um rendimento de 80%, a massa de CO_2 obtida é de?

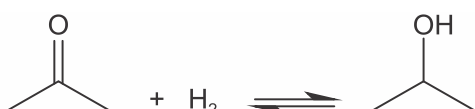
- 6,20
- 4,98
- 17,6.

d) 10,7

e) 21

TEXTO PARA A PRÓXIMA QUESTÃO:

O isopropanol (massa molar = 60 g/mol) é um álcool muito utilizado como solvente para limpeza de circuitos eletroeletrônicos. A produção mundial desse álcool chega a 2,7 milhões de toneladas por ano. A indústria química dispõe de diversos processos para a obtenção de isopropanol, entre eles, o que envolve a reação de acetona (massa molar = 58 g/mol) com hidrogênio. A equação dessa reação é



8) Se toda a produção mundial de isopropanol fosse feita somente por meio dessa reação de acetona com hidrogênio, supondo rendimento de 75%, a massa de acetona necessária para a produção anual de isopropanol seria de

a) 1,95 milhão de toneladas.

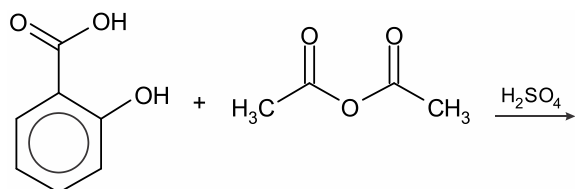
b) 2,1 milhões de toneladas.

c) 2,6 milhões de toneladas.

d) 3,1 milhões de toneladas.

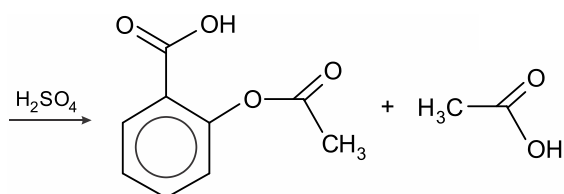
e) 3,5 milhões de toneladas.

9) O ácido acetilsalicílico, AAS (massa molar igual a 180 g/mol), é sintetizado a partir da reação do ácido salicílico (massa molar igual a 138 g/mol) com anidrido acético, usando-se ácido sulfúrico como catalisador, conforme a equação química:



Ácido salicílico

Anidrido acético



Ácido acetilsalicílico

Ácido acético

Após a síntese, o AAS é purificado e o rendimento final é de aproximadamente 50%. Devido às suas propriedades farmacológicas (antitérmico, analgésico, anti-inflamatório, antitrombótico), o AAS é utilizado como medicamento na forma de comprimidos, nos quais se emprega tipicamente uma massa de 500 mg dessa substância.

Uma indústria farmacêutica pretende fabricar um lote de 900 mil comprimidos, de acordo com as especificações do texto. Qual é a massa de ácido salicílico, em kg, que deve ser empregada para esse fim?

a) 293

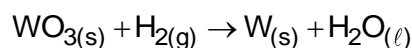
b) 345

c) 414

d) 690

e) 828

10) As lâmpadas incandescentes tiveram a sua produção descontinuada a partir de 2016. Elas iluminam o ambiente mediante aquecimento, por efeito Joule, de um filamento de tungstênio (W, Z = 74). Esse metal pode ser obtido pela reação do hidrogênio com o trióxido de tungstênio (WO_3), conforme a reação a seguir, descrita na equação química não balanceada:



Se uma indústria de produção de filamentos obtém 31,7 kg do metal puro a partir de 50 kg do óxido, qual é o rendimento aproximado do processo utilizado?

(Dados: H = 1 g/mol; O = 16 g/mol; W = 183,8 g/mol)

a) 20%

b) 40%

c) 70%

d) 80%

e) 90%

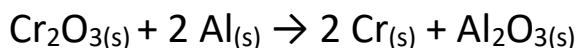
11) O óxido nitroso é usado como anestésico em partos. A sua obtenção é dada pela reação apresentada na equação química abaixo:



Se foram usados 6 gramas de nitrato de amônio e foram obtidos 2,97 g de óxido de dinitrogênio, qual o rendimento da reação?

- a) 91%
- b) 110%
- c) 97%
- d) 90%
- e) 80%

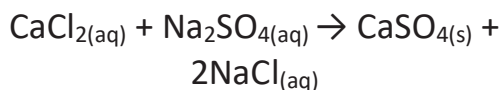
12) O cromo é um metal empregado na produção do aço inox e no revestimento (cromação) de algumas peças metálicas. Esse metal é produzido por meio da reação abaixo:



Partindo-se de 15,2 gramas de Cr_2O_3 e admitindo-se que este processo tem um rendimento de 75 %, a massa produzida de cromo é igual a:

- a) 11,8 g.
- b) 10,4 g.
- c) 13,8 g.
- d) 15,2 g.
- e) 7,8g.

13) O sulfato de cálcio (CaSO_4) é matéria-prima do giz e pode ser obtido pela reação entre soluções aquosas de cloreto de cálcio e de sulfato de sódio (conforme reação abaixo). Sabendo disso, calcule a massa de sulfato de cálcio obtida pela reação de 2mols de cloreto de cálcio com excesso de sulfato de sódio, considerando-se que o rendimento da reação é igual a 75 %.



- a) 56 g.
- b) 136 g.
- c) 272 g.
- d) 204 g.
- e) 102 g.

14) A redução do óxido de zinco por alumínio metálico é conhecido por aluminotermia, processo que tem como produto final o zinco metálico e o óxido de alumínio correspondente.

Qual a massa de zinco produzido a partir de 972 kg de óxido de zinco com 50% de pureza? Considere que o processo tenha 50% de rendimento.

(Dado: $\text{Zn}=65 \text{ g/mol}$, $\text{O}=16 \text{ g/mol}$, $\text{Al}=27 \text{ g/mol}$)

- a) 390 kg
- b) 195 kg
- c) 780 kg
- d) 243 kg
- e) 81 kg

15) Queimando-se um saco de carvão de 4 kg, supondo que apenas 75% do total dessa massa seja equivalente à carbono puro, com rendimento de 90%, quantos quilogramas de CO_2 serão formados?

Dados: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$

- a) 2,7
- b) 3,0
- c) 4,4
- d) 9,9
- e) 11

16) A decomposição térmica do calcário pode ser representada pela seguinte equação:

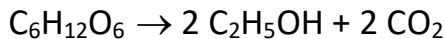


Trata-se de uma reação usada há muito tempo. Tal decomposição permite obter a cal, utilizada também como argamassa: uma espécie de cola para pedras e/ou tijolos. A Grande Muralha da China foi construída com argamassa de cal.

Suponha que uma indústria possua 8000 kg de calcário com 95% de pureza em CaCO_3 e quer obter cal virgem (CaO) por decomposição térmica desse calcário. Que massa de cal virgem obterá se o processo apresentar um rendimento de 95%?

- a) 4043,2 kg.
- b) 4256 kg.
- c) 4480 kg.
- d) 7600 kg.
- e) 7220 kg.

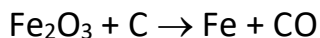
17) O etanol (C₂H₅OH) pode ser produzido por fermentação da glicose (C₆H₁₂O₆), conforme a reação:



Se 360 g de glicose produzem 92 g de etanol, o rendimento deste processo é:

- a) 92%
- b) 100%
- c) 50%
- d) 75%
- e) 25%

18) Num processo de obtenção de ferro a partir da hematita (Fe₂O₃), considere a equação não-balanceada:

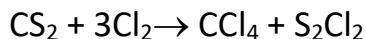


Utilizando-se 4,8 toneladas de minério e admitindo-se um rendimento de 80% na reação, a quantidade de ferro produzida será de:

Pesos atômicos: C = 12; O = 16; Fe = 56

- a) 2688 kg
- b) 3360 kg
- c) 1344 t
- d) 2688 t
- e) 3360 t

19) Tetracloreto de carbono foi preparado reagindo-se dissulfeto de carbono suficiente para consumir 21,3 gramas de cloro. Calcule o rendimento percentual, sabendo-se que foram obtidos 7,70g de CCl₄



- a) 70%
- b) 50%
- c) 75%
- d) 80%
- e) 95%

20) Uma das maneiras de se produzir cal viva é através da pirólise do calcário. Uma amostra de 20,0g de calcário produziu 10,0g de cal viva. O rendimento da reação foi de:



Dados: CaCO₃ =100; CaO =56.

- a) 100%
- b) 90%
- c) 85%
- d) 80%
- e) 75%



GABARITOS

1) C

2) B

3) C

4) A

5) E

6) C

7) C

8) E

9) D

10) D

11) D

12) E

13) D

14) B

15) D

16) A

17) C

18) A

19) B

20) B