1. **Reacciones Químicas**

Muchos problemas de la Termodinámica se relacionan con reacciones químicas. Entre las más comunes, está la combustión de hidrocarburos, ya que este .proceso se utiliza corrientemente en la generación de energía. Sin embargo, podríamos enumerar muchos otros procesos' que implican reacciones químicas, incluso aquellos que ocurren en el cuerpo humano.

Es nuestra intención en este capitulo analizar los problemas que impliquen reacciones químicas, teniendo en cuenta la primera y la segunda ley es de la Termodinámica. En muchos conceptos, este capítulo es una extensión de nuestras primeras consideraciones sobre dichas leyes. Hemos de introducir, sin embargo, términos nuevos y también será necesario que tengamos en cuenta la tercera ley de la Termodinámica.

En este capítulo consideraremos detalladamente el proceso de la combustión. Hay dos razones para ello; la primera, es que el proceso de la combustión tiene gran importancia en multitud de problemas y aparatos con los que el ingeniero tiene' que enfrentarse. La segunda, es que el proceso de la combustión constituye un medio excelente para estudiar los principios básicos de la Termodinámica de las reacciones químicas. El estudiante debe tener presentes ambos objetivos en el estudio de este capítulo.

* 1. **Combustibles**

Ciertamente, un texto sobre Termodinámica no es el Jugar adecuado para tratar en detalle todo lo relativo a los combustibles; sin embargo, es indispensable cierto conocimiento de ellos para emprender- el estudio de la combustión y, por lo tanto, esta sección está dedicada al estudio de algunos hidrocarburos combustibles. La mayoría de los combustibles que empleamos como tales, pueden clasificarse en alguna.' de estas categorías: Carbones minerales, hidrocarburos líquidos e hidrocarburos gaseosos.

La mayoría de los hidrocarburos combustibles líquidos y gaseosos, son mezclas de varios hidrocarburos diferentes; por ejemplo, las gasolinas .son mezclas de aproximadamente cuarenta hidrocarburos principales y multitud de otros en pequeñas cantidades.

TABLA 1.1

Características de algunas familias de hidrocarburos

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Familia** | **Formula** | **Estructura** | **Saturado** |
| ParafinaOlefinaDiolefinaNaftenoAromáticosBencenoNaftaleno | CnH2n+2CnH2nCnH2n-2CnH2nCnH2n-6CnH2n-12 | CadenaCadenaCadenaAnilloAnilloAnillo | SiNoNoSiNoNo |

Al discutir los hidrocarburos combustibles, hemos de hacer algunas breves consideraciones sobre las más importantes familias de hidrocarburos que están resumidas en la tabla 1.1

Debemos definir tres términos. El primero se refiere a 1 estructura de la molécula; los tipos principales son las estructuras en anillo y en cadena; la diferencia entre los dos se muestra en la figura 1.1. La misma figura muestra las diferencias entre los hidrocarburos saturados y los no saturados; un hidrocarburo no saturado, tiene dos o más átomos de carbono adyacentes, unidos por una doble o triple ligadura; mientras que en los hidrocarburos saturados, todos los átomos de carbono, están ligados entre sí por ligaduras sencillas. El tercer término que debemos definir, es que es un isómero. Dos hidrocarburos que tengan los mismos átomos de carbono e hidrógeno, pero distintas estructuras, son isómeros. Así, existen varios octanos (C8H18), que tienen cada uno 8 átomos de carbono y 18 de hidrógeno, pero que tienen diferentes estructuras.



Estructura en cadena Estructura en cadena Estructura en anillo

saturada no saturada saturada

Fig. 1.1 Estructura molecular de algunos hidrocarburos.

Las diversas familias de hidrocarburos se distinguen entre sí por un sufijo; los nombres de los compuestos que pertenecen a la familia de las parafinas, terminan todos en "ano" (como propano y octano); de un modo .semejante, los nombres de los compuestos de la .familia de las olefinas, terminan en "ileno" o "eno" (como propeno y octileno o propeno y octeno); y la familia de las diolefinas, cuyos .compuestos tienen nombres que terminan en "dieno" (como butadieno). La familia del nafteno tiene las mismas fórmulas que la familia de las olefinas, pero tiene estructuras en anillo en lugar de estructuras en cadena que tienen los de esta última. Los hidrocarburos de la familia del nafteno se designan añadiendo el prefijo "ciclo" (como ciclopentano). La familia de los aromáticos, incluye la serie del benceno (CnH2n-6) y la serie del naftaleno (CnH2n-12). La serie del benceno tiene estructura en anillo y no es saturada.

Los alcoholes se usan a veces como combustibles en las máquinas de combustión interna. La característica principal de la familia de los alcoholes, es que uno de los átomos de hidrógeno está substituido por un radical OH; así, el alcohol etílico, llamado también metanol, es CH3OH

La mayoría de los hidrocarburos combustibles, son mezclas de hidrocarburos derivados del petróleo crudo, ya sea por procesos de destilación o de rompimiento de moléculas (cracking) así, que de un petróleo crudo dado, pueden obtenerse varios combustibles diferentes, siendo los más comunes, gasolina, kerosina, aceite diesel y combustóleo.

 Dentro de estas clasificaciones existen variedades de grados y cada uno de ellos, está constituido por un gran número de hidrocarburos diferentes. La diferencia principal entre ellos estriba en sus curvas de destilación, figura 1.2.

La curva de destilación se obtiene calentando lentamente una muestra del combustible, hasta hacerlo vaporizar; el vapor se condensa luego y la cantidad condensada se mide; los hidrocarburos más volátiles vaporizan primero y la temperatura de las fracciones que aún no vaporizan aumenta durante el proceso. La curva de destilación es, pues, una gráfica de las temperaturas de las fracciones que no han vaporizado, .como ordenadas, contra la cantidad de vapor condensado como abscisas; y es por lo tanto una indicación de la volatilidad del combustible. Al tratar de la combustión de hidrocarburos combustibles líquidos, es conveniente expresar la composición en términos de un hidrocarburo solamente, aun cuando el combustible sea realmente una mezcla de varios hidrocarburos. Así, por ejemplo, la gasolina, se considera un octano y el combustible diesel dodecano, C8H18 y C12H26, respectivamente. La composición de un hidrocarburo combustible, puede también expresarse en términos de porcentajes de carbono e hidrógeno.



Fig. 1.2 Curvas de destilación características de algunos hidrocarburos combustibles

TABLA 1.2

Análisis volumétrico de varios combustibles gaseosos típicos

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Componente** | **Varios Gases Naturales** | **Gas de hulla producido en retortas** | **Gas de agua** | **Gas de hornos de coke** |
| **A** | **B.** | **C** | **D** |
|  Metano | 93.9 | 60.1 | 67,4 | 54.3 | 3.0 | 10.2 | 32.1 |
|  Etano | 3.6 | 14.8 | 16.8 | 16.3 |  |  |  |
|  Propano | 1.2 | 13.4 | 15.8 | 16.2 |  |  |  |
|  Butano. | 1.3 | 4.2 |  | 7.4 |  |  |  |
|  Eteno |  |  |  |  |  | 6.1 | 3.5 |
|  Benceno |  |  |  |  |  | 2.8 | 0.5 |
|  Hidrógeno |  |  |  |  | 14.0 | 40.5 | 46.5 |
|  Nitrógeno |  | 7.5 |  | 5.8 | 50.9 | 2.9 | 8.1 |
|  Oxígeno |  |  |  |  | 0.6 | 0.5 | 0.8 |
|  Monóxido de carbono |  |  |  |  | 27.0 | 34.0 | 6.3 |
|  Dióxido de carbono |  |  |  |  | 4.5 | 3.0 | 2.2 |

Las dos fuentes principales de hidrocarburos combustibles gaseosos, son los pozos de gas natural y procesos artificiales de manufactura. La tabla 1.2, da la composición de varios combustibles gaseosos. El principal componente del gas natural es el metano; lo cual lo distingue de los gases producidos artificialmente.

* 1. **Proceso de la combustión**

El proceso de la combustión implica la oxidación de los componentes en el combustible capaces de ser oxidados y puede, por lo tanto, ser representado por una ecuación química. Durante el proceso de la combustión, la masa de cada elemento permanece inalterable, así, al escribir ecuaciones químicas y resolver problemas que comprendan las cantidades de varios componentes, el asunto se reduce básicamente a considerar la conservación de la masa de cada elemento.

Consideremos, primero, la reacción del carbono con el oxígeno.

Reactivo Producto

C + O2 → CO2

Esta ecuación nos dice que un mol de carbono reacciona con un mol de oxígeno, para formar un mol de dióxido de carbono. Esto también significa que 12 kg m de carbono reaccionan con 32 kg m de oxígeno para formar 44 kg m de dióxido de carbono. Las substancias que figuran al principio del proceso de .la' combustión se llaman .reactivos y las que resultan de dicho proceso Se llaman productos.

Cuando un hidrocarburo combustible se quema, ambos, el carbono y el hidrógeno, se oxidan. Consideremos la combustión del metano como ejemplo:

CH4 + 2O2 → CO2 + 2H2O (1.1)

En este caso, los productos de la combustión consisten en dióxido de carbono y agua. El agua puede estar en las fases vapor, líquido o sólido, según sean la temperatura y la presión de los productos de la combustión.

Debemos señalar que, en los procesos de combustión, puede haber varios productos intermedios formados durante la reacción. En este libro; nos interesarán solamente las substancias al principio y al final de la reacción y no nos preocuparemos por los productos intermedios for­mados durante la misma; aunque la consideración de estos últimos sea muy importante en un estudio detallado de la combustión.

En la mayoría de los procesos de combustión, el oxígeno está presente como uno de los constituyentes del aire, más bien que como oxígeno puro. La composición del aire en base molal, es aproximadamente 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 1 % de argón. El nitrógeno y el argón no sufren cambio alguno durante la reacción salen a la misma temperatura que los otros productos, sin embargo y, por consiguiente, sufren un cambio de estado si la temperatura de los productos de la combustión es distinta de la del aire antes de entrar en reacción.

En cálculos de combustión empleando aire, el argón se desprecia de ordinario y se considera el aire constituido simplemente por 21 % de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen: Al considerar las cosas de este, modo, al nitrógeno se le dice "nitrógeno atmosférico”. Al nitrógeno atmosférico se le considera un peso molecular de 28.16 en lugar de 28.016 que le correspondería como nitrógeno puro (con lo cual. compensa haber despreciado el argón). Sin embargo, en este curso, lo consideraremos como nitrógeno puro, en proporción de 79%.

Suponer que el aire es una mezcla de 21 % de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen, nos conduce a la conclusión de que por cada mol de oxígeno entran en la reacción 79/21 = 3.76 moles de nitrógeno. Por consiguiente, cuando el oxígeno para la combustión del metano se suministra del aire, la reacción puede escribirse así:

CH4 + 2 O2 + 2(3.76) N2 → CO2 + 2 H2O + 7.52 N2 ( 1.2)

La cantidad mínima de aire capaz de proporcionar el oxígeno suficiente para la combustión completa del carbono, hidrógeno y cualesquiera otros elementos en el combustible susceptibles de ser oxidados, se denomina "aire teórico". Cuando se obtiene la combustión completa con el aire teórico, no puede haber oxígeno entre los productos de la combustión. En la práctica, no es posible obtener una combustión absolutamente completa, salvo empleando aire en cantidad mayor que la teóricamente necesaria. La cantidad de aire efectivamente empleada en una combustión, se expresa en forma de Porcentaje con relación al aire teórico; así, 150% de aire teórico, significa que el aire suministrado es 1.5 veces la cantidad del aire teórico necesario. La combustión del metano empleando 150% de aire teórico se escribe así:

CH4 + 2(1.5) O2 + 2(3.76) (1.5) N2 → CO2 + 2 H2O + O2 + 11.28 N2. (1.3)

La cantidad de aire efectivamente suministrada, puede también expresarse en términos de porcentaje de exceso de aire. El exceso de aire, es la cantidad de aire suministrada sobre el aire teórico necesario. Así, 150% de aire teórico, es equivalente a 50% de aire en exceso. Es el lenguaje corriente, se usan indistintamente ambos términos, aire teórico o aire en exceso.

Dos parámetros importantes que se aplican en los procesos .de combustión, son relación aire-combustible (que se expresa como AC) y su recíproco combustible-aire (que será CA). La relación aire-combustible, se expresa generalmente en masa, aunque algunos la expresan también en base molar. La razón teórica aire-combustible, es la relación entre la masa o moles de aire teórico y la masa o moles del combustible.

Cuando la cantidad de aire suministrada en una combustión es menor que el aire teórico necesario, la combustión es incompleta; si el faltante es pequeño, el resultado es, que parte del carbono se une al oxígeno para formar monóxido de carbono (CO) en lugar de dióxido de carbono (CO2). Si el aire proporcionado a una combustión de hidrocarburos es bastante menor del teórico necesario, entre los productos de la combustión encontraremos algunos hidrocarburos.

Aun cuando en una combustión haya aire en exceso del teórico, entre los productos de la combustión puede haber algo de monóxido de carbono presente, la cantidad depende de la agitación y de la turbulencia durante la combustión, entre otros factores.

Así, la combustión del metano con 110% de aire teórico, puede ser como sigue:

CH4 + 2(1.1) O2 + 2(1.1) (3.76) N2 →+ 0.95 CO2 + 0.05 CO + 2 H2O + 0.225 O2 + .8.27 N2

 (1.4)

Lo que hasta aquí hemos tratado en esta sección, se ilustra con los ejemplos siguientes.

Ejemplo 1.1

- Calcúlese la relación teórica aire-combustible, para la combustión del octano C8H18

La ecuación de la combustión es:

C8H18 + 12.5 O2 + 12.5 (3.76) N2 → 8CO2 + 9 H2O + 47.0 N2

La relación aire-combustible en base molar es:

AC = = 59.5 moles de aire/mol de combustible.

La relación aire-combustible en masa, la, obtenemos poniendo los pesos moleculares del aire y del combustible,

AC = = 15.0 kgm de aire/kgm de combustible.

Ejemplo 1.2

Determínese el análisis molal de los productos de la combustión cuando el octano C8H18 se quema con 200% de aire teórico y el punto de rocío de los productos, si la presión es 1.035 kgf/cm2.

La ecuación de la combustión para el octano con 200% de aire teórico es:

C8H18 + 12,5(2) O2 + 12.5 (2) (3.76) N2 → 8 CO2 + 9 H2O + 12.5 O2 + 94.0 N2

El total de moles del producto es: 8 + 9 + 12.5 + 94 = 123.5

Análisis molal de los productos:

 CO2 = 8/123.5 = 6.47%

 H2O = 9/123.5 = 7.29%

 O2 = 12.5/123.5 = 10.12%

 N2 = 76.12/123.5 = 76.12%

La presión parcial del H2O, es 1.035(0.0729) = 0.0755 kgf/cm2.

La temperatura de saturación correspondiente a esta presión es 400 ºC; que es también la temperatura del punto de rocío.

El agua condensada de los productos de la combustión, frecuentemente tiene gases disueltos y puede ser muy corrosiva; por esta razón, se procura muchas veces mantener la temperatura de los gases de la combustión por arriba del punto de rocío, hasta su descarga en la atmósfera.

Ejemplo 1.3

Se quema gas de hulla de retortas (ver tabla 1.2.), con 20% de exceso de aire. Calcúlese la relación aire combustible, primero en volumen, y luego en masa.

Para calcular el aire teórico necesario, escribamos la ecuación de la combustión de las substancias combustibles, para un mol del combustible.

0.14H2 + 0.07002 → 0.14H2O

0.27CO + 0.135O2 → 0.27C02

0.03CH4 + 0.06O2 → 0.03CO2 + 0.06H2O

 0.265 = moles de oxígeno necesario/mol de combustible

 - 0.006 = oxígeno en el combustible/mol de combustible

 0.259 = moles de oxígeno requerido del aire/mol de combustible

Por consiguiente, la ecuación para la combustión completa de un mol del combustible es:

Combustible Aire

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

0.14 H2 + 0.27 CO + 0.03 CH4 + 0.006O2 + 0.509N2 + 0.045CO2 + 0.259O2 + 0.259 (3.76) N2 →

→ 0.20H2O + 0.345CO2 + 1.482 N2

 Moles de Aire

Moles de combustible Teórico

 = 

Si el aire y el combustible están a la misma temperatura y presión también representa la relación en volumen

Para 20% de exceso de aire: \_\_\_moles de aire\_\_\_ = 1.233 x 1.2 = 1.48

Moles de combustible

La relación aire-combustible en masa es:

AC = 

AC = 1.73 kgm de aire/kgm de combustible.

* 1. **Análisis de los Productos de la Combustión**

El análisis de los productos de la combustión proporciona un método muy simple para calcular la cantidad de aire efectivamente suministrada a una combustión. En algunos casos, sirve también para obtener el análisis de un combustible, partiendo del análisis de los productos de la combustión.

El aparato de Orsat, ver la figura 1.3, es un dispositivo para efectuar .el análisis de los productos de la combustión; en la actualidad, se dispone de medios más modernos y que se usan profusamente

En el aparato de Orsat, se hace pasar sucesivamente por varias soluciones, un volumen medido de los productos de la combustión; cada solución absorbe determinado componente, de manera que si se mide el volumen antes y después de pasar por cada solución, la diferencia representará el volumen, absorbido por ella, que corresponde al componente que la solución en cuestión es capaz de absorber. De esta, .manera podemos determinar el análisis volumétrico de los gases de la combustión.



1.3

El gas se introduce o se extrae del aparato, subiendo y bajando la botella de nivelar, que contiene agua y en determinadas ocasiones, mercurio o salmuera.

En detalle, el aparato funciona como sigue:

1. La bureta medidora se llena con los productos de la combustión y su volumen se determina cuidadosamente.
2. Se pasa luego el gas a la pipeta A que contiene ***hidróxido de potasio*** que absorbe el dióxido de carbono; el gas remanente se regresa a la bureta medidora y se determina su volumen; la diferencia con el volumen original representa el dióxido de carbono absorbido.
3. De un modo semejante, se va haciendo pasar el resto por las pipetas B y C; la pipeta B contiene solución de ***ácido pirogálico*** que absorbe el oxígeno y la pipeta C contiene solución de ***cloruro cuproso*** para absorber el CO. Si fuera necesario conocer otros productos, se dispondrían pipetas adicionales con los productos adecuados para absorberlos.
4. El gas que no se absorbe, se supone que es nitrógeno.

El análisis volumétrico obtenido usando el aparato de Orsat, es en base seca; esto es, el agua formada durante la combustión no aparece en .el análisis; esto es así, porque la determinación se hace a la temperatura ambiente, que es considerablemente inferior a la del punto de rocío de los productos de la combustión de la mayoría de los hidrocarburos combustibles; además, el gas permanece saturado durante el análisis y éste tiene lugar a presión y temperatura constantes.

Al utilizar el análisis de los productos de la combustión para determinar la relación combustible-aire efectiva, el principio básico que se tiene en cuenta es el de la conservación de la masa de cada uno de los elementos, así, al hacerse el cambio de reactivos a productos, podemos hacer balances de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno y de otros elementos que pudieran encontrarse. Puede advertirse, además, que existen relaciones definidas entre las cantidades de varios de esos elementos; de modo que la relación entre el oxígeno y el nitrógeno suministrados con el aire, es fija; y también lo es la relación entre el carbono y el hidrógeno si conocemos la composición del hidrocarburo combustible.

Estos principios relacionados con el análisis de los productos de la combustión, se ilustran con los ejemplos que siguen:

Ejemplo 1.4

Se quema metano CH4 con aire atmosférico. El análisis de los productos de la combustión determinado con un aparato de Orsat, es el siguiente:

 CO2 10.00%

 O2 2.37

 CO 0.53

 N2 87.10

Calcúlense la relación aire-combustible, el porcentaje de aire teórico y determínese la ecuación de combustión.

La solución implica escribir la ecuación de la combustión para 100 moles de productos secos, introduciendo coeficientes literales como incógnitas y resolver estas incógnitas.

Según el análisis de Orsat, podemos escribir la siguiente ecuación, teniendo presente que el análisis de Orsat es en base seca:

a CH4 + b O2 + c N2 → 10.0 CO2 + 0.53 CO + 2.37 O2 + d H2O + 87.1N2

El balance para cada uno de los elementos comprendidos, nos permitirá resolver todos los coeficientes desconocidos:

Balance del nitrógeno: c= 87.1

Puesto que todo el, nitrógeno proviene del aire,

  

Balance del carbono: a = 10.00 + 0.53 = 10.53

Balance del hidrógeno: d = 2a = 21.06

Hemos determinado ya todos los coeficientes; el balance del oxígeno nos proporciona un medio de comprobación de nuestro cálculo; determinemos, pues, b haciendo el balance del oxígeno:

b = 10.00 + + 2.37 +  = 23.16

Substituyendo estos valores .por a, b, c, d y e tenemos

10.53 CO2 + 23.16 O2 + 87.1 N2 →.10.00 CO2 + 0.53 CO + 2.37 O2 + 21.06 H2O + 87.1 N2

Dividiendo todo por 10.53, obtenemos la ecuación por mol de combustible:

CH4 + 2.2 O2 + 8.27 N2 → 0.95 CO2 + 0.05 CO + 2 H2O + 0.225 O2 + 8.27 N2

La relación aire-combustible en base molar es:

 2.20 + 8.27 = 10.47 moles de aire/mol de combustible

La relación aire-combustible en base de masa, la obtenemos aplicando los pesos moleculares:

AC = =18.9 kgm de aire/ kgm de combustible

La relación teórica aire-combustible, la obtenemos escribiendo la ecuación para el aire teórico:

CH4 + 2 O2 + 2(3,76) N2 → CO2 + 2 H2O + 7.52 N2

AC teórico = = 17.23 kgm de aire/ kgm de combustible

El porcentaje de aire teórico es, pues, = 1.1 = 110%

Ejemplo 1.5

Los productos de la combustión de un hidrocarburo combustible de composición desconocida, dan el siguiente análisis en un aparato de Orsat

 CO2 8.0%

 CO 0.9

 O2 8.8

 N2 82.3

Calcúlense:

a) la relación aire-combustible,

b) la composición del combustible en base de masas,

c) el porcentaje de aire teórico en base de masas.

Escribamos la ecuación de la combustión para 100 moles del producto seco:

CaHb + d O2 + c N2 → 8.0 CO2 + 0.9 CO + 8.8 O2 e H2O + 82.3 N2

Balance del nitrógeno: c = 82.3

de la composición del aire:  = 3.76; d =  = 21.9

Balance del oxígeno: 21.9 = 8.0 + + 8.8 + ; *e* = 9.3

Balance del carbono: a = 8.0 + 0.9 = 8.9

Balance del hidrógeno: b = 2e = 2 x 9.3 = 18.6

Así que podemos escribir la composición del combustible:

C8.9H18.6

La relación aire-combustible, la determinamos con los pesos moleculares,

*AC = * = 24.1 kgm de aire/kgm de combustible.

En base de masas, la composición del combustible es:

 Carbono =  = 85.2%

 Hidrógeno =  = 14.8%

El aire teórico lo determinamos escribiendo la' ecuación teórica de la combustión:

C8.9H18.6 + 13.5 O2 + 13.5 (3.76) N2 → 8.9 CO2 + 9.3 H2O + 50.8 N2

*AC* teórico =  = 14.9 kgm de aire/kgm de combustible.

 % de aire teórico =  = 1.62 = 162%

Ejemplo 1.6

Quemamos con aire gas de hulla de retortas. (Tabla 1.2.). La composición de los productos de la combustión, según análisis en un aparato de Orsat, es la siguiente

 CO2 11.9%

 CO 1.8

 O2 6.5

 N2 79.8

Calcúlense la relación aire-combustible efectiva en base molar y el porcentaje de aire teórico.

Escribimos la ecuación de la combustión para 100 moles del producto seco, usando coeficientes literales para los componentes desconocidos.

a (O.14 H2 + 0.27 CO + 0.03 CH4 + 0.006 O2 + 0.509 N2 + 0.045 CO2) + b O2 + 3.76 (b) N2 →

11.9 CO2 + 1.8 CO + 6.5 O2 + c H2O + 79.8 N2

Balance del carbono: a (0.27 + 0.03 + 0.045) = 11.9 + 1.8

 a = 39.7

Balance del nitrógeno: 0.509 a + 3.76 b = 79.8

 0.509(39.7) + 3.76 b = 79.8

 b = 15.85

Balance del hidrógeno: a (0.14 + 0.06) = c

 c = 39.7 (0.2) = 7.94

El balance del oxígeno nos permite comprobar nuestro trabajo.

 a (.135 + 0.006 + 0.045) + b = 11.9 +  + 6.5 + 

 39.7 (0.186) + 15.85 = 11.9 + 0.9 + 6.5 + 3.97

 23.24 = 23.27

*AC* efectivo = 

 = 1.903 moles de aire/moles de combustible.

*AC* teórico = 1.233 (Resultado tomado del ejemplo 12.3)

Porcentaje de aire teórico = 1.903/1.233 = 1.55 = 155%