APENDICE I
CIRCUITOS ELECTRICOS

Primera Parte: Cicuitos de CC

INTRODUCCION Este apéndice, como se indicó en el prefacio, está dedicado a los lectores que necesitan reveer o aprender las nociones básicas relacionadas con el funcionamiento de los circuitos de corriente continua (CC) y de corriente alterna (CA). El material presentado hace hincapié en los conocimientos más elementales de la teoría de estos circuitos. Cada tópico es acompañado por ejemplos, para facilitar la comprensión del tema. Como la mayoría de los circuitos usados en los sistemas FVs son de CC, éstos recibirán mayor atención en este apéndice. Afortunadamente este tipo de circuito requiere un conocimiento matemático más elemental, ya que la resolución de circuitos de CA implica, en general, operar con cantidades vectoriales y números imaginarios. La única excepción la constituyen los circuitos de CA con carga puramente resistiva.

NOTA Al final de este apéndice se ha agregado una revisión del concepto de porcentaje, redondeo de cantidades y diodos.

BLOQUES FUNCIONALES Un circuito eléctrico, sea éste de CC ó CA, está formado por tres bloques básicos. Estos son: el Generador, el Medio Conductor y la Carga Eléctrica. La Figura A1.1 muestra estos tres bloques fundamentales.

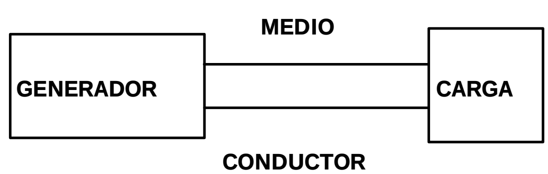


Fig. A1.1- Bloques que Forman un Circuito Eléctrico

El generador crea la energía eléctrica que será utilizada por la carga. El medio conductor permite el transporte de la energía generada a la carga. Una lámpara incandescente que emite luz o una batería que está siendo cargada, representan dos ejemplos de cargas eléctricas.

VOLTAJE CORRIENTE Y RESISTENCIA Para poder definir un circuito de CC se necesita conocer los tres parámetros que lo definen: el *voltaje*, la *corriente* y la *resistencia*. El voltaje del generador, medido en ***volts*** (V), dá la medida de la capacidad que éste tiene para establecer una corriente en el circuito. Esta corriente, medida en ***amperes*** (A), permite la transferencia de energía del generador a la carga. La oposición a la circulación de la corriente en el circuito es la resistencia eléctrica del mismo. Su valor se mide en ***ohms*** (Ω). El símbolo Ω corresponde a la letra griega ómega.

Es común designar al voltaje con la letra V, a la corriente con la letra I y a la resistencia con la letra R.

POLARIDAD

En un circuito de CC el voltaje del generador ***no varía su polaridad*** con respecto al tiempo. Como el positivo del generador nunca cambia de polaridad, el sentido de circulación de la corriente permanece inalterado. Es importante observar que la variación de la polaridad con respecto al tiempo, y no la constancia del valor del voltaje, es la que determina si un voltaje es de CC o de CA. Si el voltaje de un circuito varía entre cero y un máximo, en forma rítmica, continúa siendo un voltaje de CC. Voltajes de este tipo se llaman pulsantes, y serán tratados en detalle en este apéndice.

LEY DE OHM

Para un dado circuito de CC, los tres valores que lo definen entán relacionados por la ***ley de Ohm***, cuya expresión es:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Resistencia}} = \text{Corriente} \qquad (1)$$

Esta fórmula establece una proporcionalidad entre dos de las variables, cuando la tercera se mantiene constante. Por ejemplo, si mantenemos fijo el valor de la resistencia, y duplicamos el voltaje, la corriente se duplica. Si el voltaje se mantiene fijo y la resistencia se triplica, la corriente se reduce a un tercio del valor inicial. Una expresión matemática de este tipo se la conoce como una relación lineal.

ELEMENTOS LINEALES Y NO-LINEALES

Si un elemento de circuito (resistor), obedece la ley de Ohm, al elemento se lo denomina lineal. Si no obedece esta ley, como en el caso de una celda FV o un diodo, se lo denomina un elemento no-lineal. Una simple manipulación algebraica permite establecer que:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2) \qquad \text{y} \qquad V = R \times I \quad (3)$$

Las expresiones (1), (2) y (3) representan distintas formas para la ley de Ohm. Su uso depende de cuáles son los dos valores conocidos. Por ejemplo, si se conocen los valores para V e I la (2) resulta la más conveniente. Si el valor de la resistencia en el circuito permanece constante cuando la corriente se incrementa, la representación gráfica de la expresión (3) es una línea recta, como lo muestra la Figura A1.2. Se cumple entonces que para cualquier punto de la curva, si asumimos un pequeño cambio (Δ) en el valor de la corriente ΔI (delta I), el correspondiente cambio de voltaje, ΔV (delta V), será siempre el mismo, vale decir:

$$\Delta V / \Delta I = R = \text{constante}$$

Por el momento consideraremos circuitos lineales.

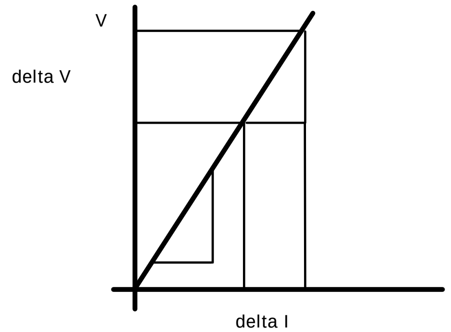
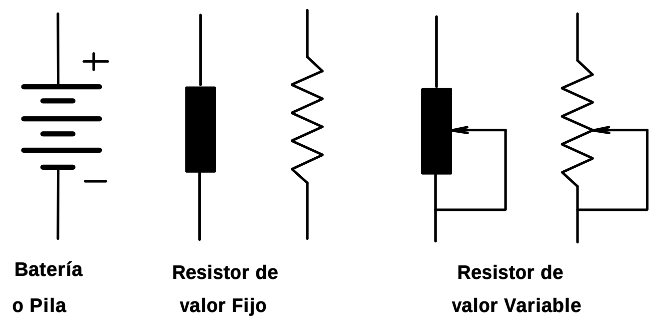


Fig. A1.2- Circuito de CC Lineal

SIMBOLOS ELECTRICOS

A fin de poder introducir ejemplos de circuitos de continua, definiremos a continuación los símbolos usados para una batería (o pila) y para un resistor cuya resistencia es fija o variable.



NOTAS

Deberá observarse que el trazo más alargado en el símbolo para la batería corresponde al positivo. Varios trazos, con polaridad alternada, simbolizan las coneccción en serie de las celdas que forman la batería (pila). Por conveniencia en la reproducción, el símbolo para un resistor usado en este apéndice será el de un rectángulo. El resistor es el elemento que tiene resistencia eléctrica. En común que el término resistencia sea usado, erróneamente, por el de resistor.

CIRCUITO DE CC BASICO

El circuito de CC de la Figura A1.3 está formado por un generador de continua (batería de 12V) y un resistor con una resistencia de 12Ω. La resistencia del medio conductor será considerada nula en los primeros ejemplos. Más adelante, al tratar la disipación de potencia, daremos ejemplos en donde este valor no es nulo.

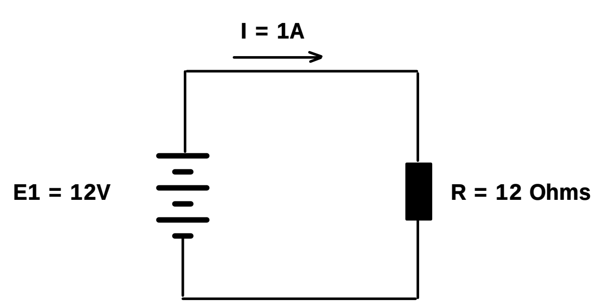


Fig. A1.3- Circuito de CC básico

CIRCUITO CERRADO

En este circuito se conocen el voltaje y la resistencia, de manera que podemos calcular la corriente usando la expresión (1) para la ley de Ohm. Por convención, la corriente sale del lado positivo de batería, atraviesa el resistor, y entra por el lado negativo de batería. El circuito se “cierra” a través de la batería, alcanzando el lado positivo. El concepto de circuito “cerrado” es muy importante. Por ejemplo, el terminal negativo de batería puede ser conectado a tierra, como muestra en la Fig A1.4 (nuevos símbolos eléctricos). Si no hay otra conección a tierra, no puede establecerse otra corriente. Si, accidentalmente, el positivo de batería es connectado a tierra (línea punteada), se establecerá un nuevo circuito cerrado (positivo-tierra-tierra-negativo). Este nuevo circuito, de resistencia cero, cortocircuitaría la batería. *Una conección a tierra no altera un circuito cerrado*. Sólo sirve para fijar un voltaje de referencia, el que, por convención, tiene cero volts.

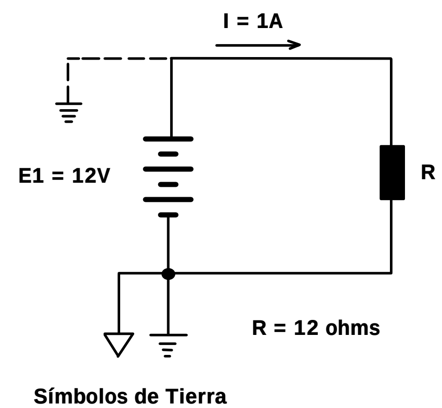


Fig. A1.4- Circuito de CC con un Punto a Tierra

DIFERENCIA DE VOLTAJE

La teoría de circuitos muestra que sólo puede hablarse de “diferencias de voltaje”. Cuando se dice que el voltaje en una batería es de 6V volts, este valor representa la *diferencia de voltaje* entre los extremos de la misma.

RESISTENCIAS EN SERIE

Pasaremos ahora a explicar el concepto de resistencias en serie. El circuito de la Figura A1.5 muestra dos resistores conectados uno a continuación del otro. En este caso se dice que las resistencias de cada uno de los resistores están conectadas en “serie”.

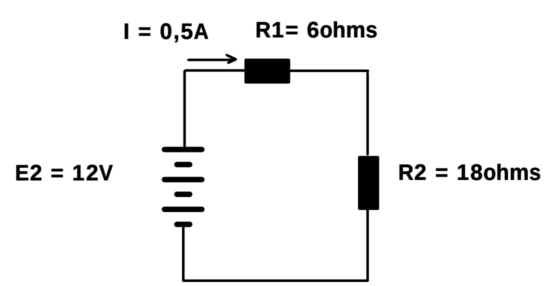


Fig. A1.5- Resistencias en Serie

Como los dos resistores están en el ***único*** paso que tiene la corriente, las dos resistencias se oponen a la circulación de la corriente. El valor de la resistencia total del circuito está dado, en este caso, por la suma de sus valores, vale decir:

$$Rs = R1 + R2$$

De existir más de dos resistencias en serie, el valor de la resistencia total en serie (Rs) estará dado por la suma de las resistencias parciales, vale decir:

$$Rs = R1 + R2 + R3 + ... + Rn$$

En nuestro ejemplo:

$$Rs = R1 + R2 = 6 + 18 = 24\Omega$$

El valor de la resistencia equivalente en serie es ahora el doble del ejemplo anterior. Como el voltaje no ha variado, el valor de la corriente será la mitad, es decir, 0,5 A. Como la resistencia total en serie es igual a la suma de todas las resistencias, *el valor de la resistencia equivalente en serie siempre supera el más alto valor resistivo de una de ellas.*

CAIDA DE VOLTAJE Y FEM

Cuando la corriente encuentra una resistencia, se produce una caída de voltaje, que se mide en volts. Conviene aclarar que el voltaje de un generador es una fuerza electromotriz (FEM). Esto significa que es capaz de forzar una corriente en el circuito. La caída de voltaje es una pérdida de voltaje. Es usual que la letra E esté asociada con el voltaje de una FEM, y la letra V con una caída de voltaje, para diferenciar a dos valores que usan la misma unidad de medida. En este apéndice usaremos este tipo de nomenclatura. En el circuito de la Figura A1.3, el valor de la única caída de voltaje está dado por:

$$V = R \times I = 12\Omega \times 1A = 12V$$

En el circuito la Figura A1.5, hay dos caídas de voltaje, V1 a través de R1 y V2 a través de R2. Sus respectivos valores son:

$$V1 = R1 \times I = 6\Omega \times 0{,}5A = 3V$$

$$V2 = R2 \times I = 18\Omega \times 0{,}5A = 9V$$

En ambos casos se verifica que en un circuito serie, la suma de las caídas de voltaje es siempre igual al valor de la FEM en el circuito. Por lo tanto:

$$E1 = V; \qquad E2 = V1 + V2$$

y, en general:

$$E = V1 + V2 + V3 + ... + Vn$$

1ra LEY DE KIRCHOFF

A esta igualdad se la conoce como la ***primera ley de Kirchoff, o ley de Kirchoff para los voltajes***.

SIGNO PARA EL VOLTAJE

Si en lugar de una sola batería hubiere dos (o más), la FEM equivalente está dada por la suma algebraica (con su signo) de todas ellas. En la Figura A1.6 esto implica la diferencia entre los dos valores, mientras que en la Figura A1.7 la FEM total está dada por la suma de los dos valores.

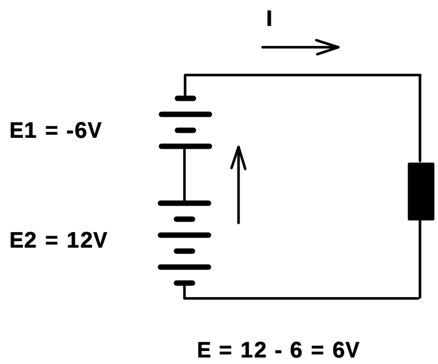


Fig. A1.6- Baterías en Oposición

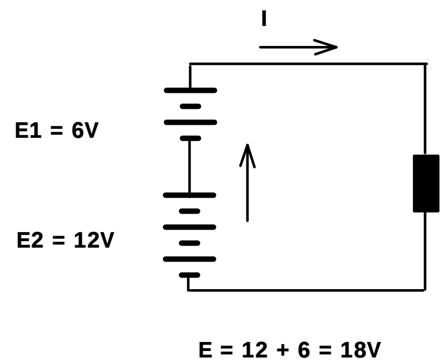


Fig. A1.7- Baterías en Serie

La batería de 6V en la Figura A1.6 está conectada en oposición porque su voltaje trata de sostener una corriente **en el sentido opuesto al de la convención adoptada**. Es por ello que se le asigna el valor -6V.

RESISTENCIAS EN PARALELO

Ahora analizaremos la conección de dos resistores en paralelo. En el circuito de la Figura A1.8, los dos resistores en el circuito tienen conectados los dos extremos entre sí. A este tipo de conección se lo conoce como “paralelo”, porque la corriente tiene dos pasos diferentes, que corren en paralelo. Los valores resistivos de R1 y R2, en la Figura A1.8, son los mismos que los de la Figura A1.5.

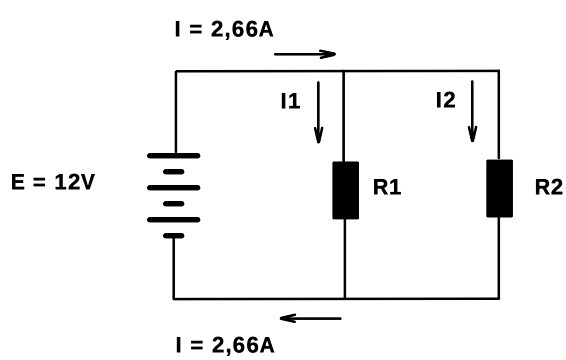


Fig. A1.8- Resistencias en Paralelo

La corriente total (I) se divide en el punto de unión de los dos resistores (nodo de entrada). Los valores de las corrientes I_1 e I_2 que circulan a través de R1 y R2 respectivamente, no son iguales, pues los valores de las resistencias no lo son. A menor resistencia, mayor valor de corriente a través de ella. En el nodo de salida, las dos corrientes vuelven a unirse.

Como hay *un solo valor para el voltaje y un solo valor para la resistencia equivalente en paralelo*, la ley de Ohm determina que sólo existe *un solo valor para la corriente*. Por lo tanto, el valor de la corriente que entra el nodo de entrada debe ser el mismo que el sale del nodo de salida. Por lo tanto:

$$I = I_1 + I_2$$

2da. LEY DE KIRCHOFF

A esta expresión se la conoce como la ***segunda ley de Kirchoff o ley de Kirchoff para las corrientes***. Reemplazando los valores de I1 e I2 en función del voltaje y las resistencias (únicos valores conocidos) se tendrá:

$$I = V/ R1 + V/ R2 = V / (1/ R1 + 1/R2) = V/Rp$$

El valor de la resistencia total en paralelo es entonces:

$$Rp = \frac{1}{(1/ R1) + (1/ R2)} \qquad (4)$$

$Rp = 1/(1/6 + 1/18) = 1/(0,16666 + 0,05555)\Omega$ ó $Rp = 1/ 0,22222 = 4,5\Omega$

La corriente en el circuito puede ser calculada usando la ley de Ohm:

$$I = 12V/4,5\Omega = 2,66A$$

Como verificación, y práctica, calcularemos los valores de las corrientes I1 e I2. El valor de la corriente I1 está dado por:

$$I1 = 12V/ 6\Omega = 2A$$

El valor de la corriente I2 está dado por:

$$I2 = 12V/18\Omega = 0,66A$$

La corriente total (I) está dada por la suma de las dos corrientes (2da ley de Kirchoff), es decir:

$$I = 2 + 0,66 = 2,66A$$

Este valor, como era de esperar, es igual al calculado anteriormente.

DOS RESISTENCIAS EN PARALELO

Cuando se tienen sólo dos resistencias en paralelo, el valor de la resistencia equivalente está dado por la expresión:

$$Rp = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2} = \frac{\text{Producto}}{\text{Suma}}$$

En nuestro ejemplo:

$$Rp = \frac{108}{24} = 4{,}5\Omega$$

Usando esta fórmula, el lector puede verificar que el valor equivalente a dos resistencias en paralelo es *siempre menor que el menor de los valores conectados*.

VARIAS RESISTENCIAS EN PARALELO

Cuando se conectan más de dos resistores en paralelo, el valor de la resistencia equivalente en paralelo (Rp) estará dado por una expresión similar a la (4), donde el denominador contiene la suma de los valores recíprocos (1/R) de cada una de las resistencias conectadas en paralelo. Aquellos lectores que posean un conocimiento algebraico, pueden verificar que el valor de la resistencia equivalente en paralelo para tres o más resistencias está dado por la expresión:

$$Rp = \frac{R1R2R3R4 \ldots\ldots Rn}{R2R3R4..Rn + R1R3R4..Rn + R1R2R4..Rn + R1R2R3..Rn + \ldots} \qquad (5)$$

Si esta expresión es difícil de recordar, el problema puede reducirse al de dos resistencias en paralelo. Para ello se comienza tomando dos de ellas, calculándose su valor equivalente en paralelo. Este valor se combina con el de otra resistencia, calculándose el nuevo valor equivalente en paralelo. El procedimiento se repite hasta agotar el total de resistencias en paralelo.

EJEMPLO

Como ejercicio consideraremos cuatro (4) resistencias en paralelo, cuyos valores son 10Ω, 5Ω, 3Ω y 2Ω, respectivamente. El valor equivalente en paralelo será calculado usando los tres métodos descriptos con anterioridad.

Método 1- Aplicando la fórmula generalizada (5) se tendrá:

$$Rp = \frac{10.5.3.2}{5.3.2 + 10.3.2 + 10.5.2 + 10.5.3} = \frac{300}{30 + 60 + 100 + 150} = 0{,}882\Omega$$

Método 2- Combinando dos valores a la vez. Los dos primeros valores en paralelo dan un valor de 3,3333Ω. Este valor, en paraleo con 3Ω, dá un valor equivalente de 1,5789Ω, que en paralelo con 2Ω dá un valor de 0,882Ω.

Método 3- Suma de valores recíprocos. Estos valores son, respectivamente: 0,1; 0,2; 0,33333 y 0,5. Su suma: 1,1333333 1/Ω. La inversa de este valor, 0,882Ω, es el resultado buscado. La inversa de la resistividad (1/Ω) se denomina la conductividad. La unidad se denomina el mho (ohm invertido). El símbolo es una letra ómega cabeza abajo.

POTENCIA ELECTRICA

La potencia generada, consumida o disipada en un circuito de CC (medida en watts) está dada por la expresión:

$$W \text{ (watts)} = V \text{ (volts)} \times I \text{ (amperes)} \qquad (6)$$

Volviendo al circuito de la Figura A1.4, la potencia disipada por los resistores R1 y R2 serán:

$$W1 = 3V \times 0,5A = 1,5W$$
$$W2 = 9V \times 0,5A = 4,5W$$

NOTA

La potencia entregada por la batería es de 6 W (12 x 0,5). El valor de la potencia entregada en cada instante debe ser igual a la potencia disipada (ley de conservación de la energía). En nuestro ejemplo:

$$6W = 1,5W + 4,5W.$$

Reemplazando el valor del voltaje V por el producto R x I (ley de Ohm) en la expresión (6), se obtiene otra expresión para la potencia que es útil cuando sólo se conocen los valores de R e I.

$$W \text{ (watts)} = (R \times I) \times I = R \times I^2 \qquad (7)$$

Reemplazando el valor de I (V/R) en la expresión anterior se tendrá que:

$$W \text{ (watts)} = V^2/R \qquad (8)$$

La expresión (8) para la potencia permite el cálculo de la disipación de calor en un resistor conectado en paralelo, ya que para este coneccionado se conocen el valor de R y V. De esta misma expresión se deduce que:

$$V = \sqrt[2]{W \times R} \qquad (9)$$

Esta fórmula permite calcular el máximo valor de voltaje que puede tolerar un resistor cuya resistencia es R (Ω) y su máxima capacidad de disipación de potencia es W (watts).

VERIFICACION DE LAS ASUNCIONES DE DISEÑO

Durante el proceso de diseño de un sistema FV (Capítulo 10) se asume un valor para las pérdidas del cableado que une los paneles y el banco de baterías. Esta asunción es el primer paso que nos permite determinar el calibre del conductor. Usando los resultados del ejemplo dado en ese capítulo, verificaremos si el valor de la potencia disipada en el cable elejido está dentro del valor asumido (2%). Para nuestro ejemplo este valor porcentual representa una disipación máxima de 0,88W (2% de 43,8W).
El calibre elejido es un AWG14 y la distancia entre el panel y la batería es de 4m. De la Tabla 8.7 se sabe que 100m de este cable representan una resistencia de 0,8432Ω. La longitud del cable es de 8m (un cable + y otro -). La resistencia de estos 8m es de 0,067456Ω. Como la corriente máxima de carga es de 3,5A, la disipación en el mismo ($R \times I^2$) es de 0,83W. Este valor representa un 1,9% del total generado.

PERDIDAS A ALTA TEMPERATURA

Sin embargo, el cable estará expuesto a la temperatura exterior. Durante el verano su temperatura se incrementará, y, consequentemente, su resistencia y disipación de potencia. Asumiendo que la temperatura del cable alcanza la del ambiente, podemos preguntarnos: ¿cuál es el máximo valor de temperatura ambiente para el cual no se excede el 2% (0,88W)?. La expresión (7) nos permite calcular el máximo valor tolerable para la resistencia (0,071836Ω). La Tabla 8.7 proporciona valores resistivos a 25°C. En el Capítulo 8 hemos visto que a otra temperatura la resistencia se obtiene usando la expresión:

$$Rt = R25\ (1 + \alpha.\Delta t)$$

De ella se duce que:

$$\Delta tmáx = (Rt - R25) / \alpha.R25$$

En nuestro ejemplo, Rt = 0,071836Ω y R25 = 0,067456Ω. Por lo tanto:

$$\Delta tmáx = 0{,}004380 / (0{,}0043\ 0{,}067456) = 15{,}1°C$$

La máxima temperatura ambiente no deberá sobrepasar los 40°C (25+15). Si se anticipa temperaturas en exceso de este máximo, deberá elegirse un calibre de mayor diámetro (AWG12).

CIRCUITO EQUIVALENTE

En una batería de Pb-ácido "ideal", como la usada en los ejemplos anteriores, el voltaje de salida de la misma permanece constante para cualquier valor de la corriente en el circuito. En la práctica éste disminuye sensiblemente cuando la corriente aumenta. Para poder tener en cuenta esta variación de voltaje, se necesita usar un "circuito equivalente". Este circuito refleja el comportamiento "real" de la batería. La Figura A1.9 muestra el circuito equivalente de una batería que alimenta una carga. La diferencia entre el voltaje a circuito abierto (I = 0), y el de salida con carga, es igual a la caída de voltaje en la resistencia ri. A esta resistencia se la denomina ***resistencia interna***. Esta explicación describe un método experimental que puede emplearse para determinar el valor de la resistencia interna de un generador. Los círculos marcados + y - en la Figura A1.9 representan los terminales de la "batería real".

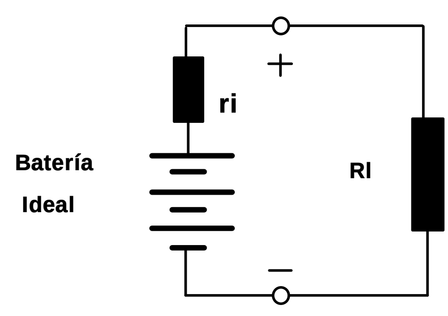


Fig. A1.9- Circuito Equivalente de una Batería

NOTA

El concepto de circuito equivalente se aplica, asimismo, a otros componentes del circuito (diodos, paneles FVs, etc). La validez del circuito equivalente, desde el punto de vista **cuantitativo**, depende del valor asignado a la resistencia interna. Para una batería de Pb-ácido, éste ***varía*** dependiendo del valor de la corriente de carga, el estado de carga y la temperatura del electrolito. Desde un punto de vista ***funcional***, la introducción del concepto de resistencia interna facilita el entendimiento de las variaciones del voltaje de salida de un generador, o la caída de voltaje en un diodo.

CALCULO DE LA RESISTENCIA INTERNA

Un método ha sido descripto: variación del voltaje de salida entre dos valores de carga: circuito abierto y con carga. Podemos, asimismo, determinar la resistencia interna de un componente no-lineal usando las curvas I/V que definen al mismo para una dada condición de trabajo. Consideremos, por ejemplo, las curvas I/V para un panel FV. Un pequeño cambio de voltaje (ΔV) dentro de la zona plana produce un muy pequeño cambio en el valor de la corriente (ΔI), lo que significa que la resistencia interna es elevada. La misma variación de voltaje, considerada ahora en la zona que sigue al “codo”, produce un cambio apreciable en ΔI (baja resistencia interna). Si conocemos los valores de ΔV y ΔI, la relación ΔV/ΔI proporciona el valor de la resistencia interna alrededor de ese punto de trabajo. Esta metodología puede extenderse a las baterías de Pb-ácido, usando la curva de descarga que refleja las condiciones de uso.

MAXIMA TRANSFERENCIA DE ENERGIA

La teoría muestra que la máxima transferencia de potencia entre un generador y su carga ocurre cuando el valor de la resistencia de la carga iguala el de la resistencia interna del generador. En los sistemas de bombeo activados con paneles FV, durante las primeras horas del amanecer la resistencia interna del panel es muy alta y la del motor de la bomba es muy baja (motor parado). Valores tan dispares no permiten una efectiva transferencia de potencia. Es por ello que se usa el llamado Incrementador Lineal de Corriente (ILC). Este actúa como un conversor de resistencias. A la entrada presenta un alto valor de resistencia y a la salida un valor mucho más bajo. De esta manera se consigue, tanto a la entrada (panel-ILC) como a la salida (ILC-motor eléctrico) optimizar la transferencia de potencia, lo que permite el arranque del motor a horas más tempranas.

CIRCUITO CON BATERIA "REAL"

El circuito de la Figura A1.10 toma en consideración no sólo la resistencia interna de la batería (ri), a la que asignaremos un valor de 0,01Ω, pero la del cable de conección (Rc). El calibre de este último es un AWG2. La distancia entre la batería y la carga es de 2,5 m, y la corriente medida en el circuito es de 10A. La temperatura ambiente es cercana a los 25°C. Utilizaremos este ejemplo para reveer el material presentado, calculando todas las caídas de voltaje y disipaciones que toman lugar.

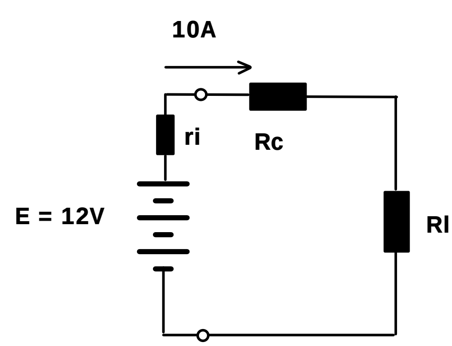


Fig. A 1.10- Circuito de CC con Batería Real y Resistencia en el Cableado

RESISTENCIAS Y CAIDAS DE VOLTAJE

Puede verse que la resistencia de los dos cables está concentrada en un solo resistor (Rc). Esto es posible porque la resistencia de cada tramo representa un valor en serie con el restante. Para calcular Rc la longitud del cable deberá ser de 5 m (2,5 m por rama). Como la temperatura ambiente es cercana a los 25°C, la Tabla 8.7 nos permite calcular la resistencia de los 5m, estableciendo una proporcionalidad.

$$Rc = (5 /100) \times 0,05314 = 0,002657\Omega$$

La caída de voltaje en los cables (Vc) es de:

$$Vc = 0,002657 \times 10 = 0,02657V$$

La caída de voltaje dentro de la batería (vi) es de:

$$vi = 10 \times 0,01 = 0,1V$$

El voltaje de salida de batería (Vb) es de:

$$Vb = 12 - 0,1 = 11,9V$$

El voltaje en la carga (Vl) puede calcularse usando la ley de Kirchoff para los voltajes. Se tiene que:

$$Vl = Vb - Vc = 11,9 - 0,02657 = 11,87343V$$

Usando la ley de Ohm, se puede calcular el valor de la resistencia de la carga (Rl).

$$Rl = 11,87343/10 = 1,187343\Omega$$

NOTA

Obsérvese que el valor de la resistencia de carga es más de 100 veces mayor que el de la resistencia interna de la batería y más de 400 veces el de la resistencia de los cables de conección. Esta observación muestra que la corriente en el circuito va a ser “dominada” por el valor de la resistencia de la carga, el que representa el mayor valor resistivo en serie. Es importante que el lector se acostumbre a hacer este tipo de observación, pues aunque todos los valores son pequeños, la relación de uno con respecto al resto puede ser muy significativa.

DISIPACIONES DE POTENCIA

La potencia consumida en el cableado de conección (disipada como calor) está dada por:

$$Wc = Rc \times I^2 = 0,002657 \times (10)^2 = 0,2657W$$

o, si se prefiere:

$$Wc = Vc \times I = 0,02657 \times 10 = 0,2657W$$

La potencia disipada por la carga será de:

$$Wl = 11,87343 \times 10 = 118,7343W$$

La batería “real” entrega una potencia de:

$$Wb = 11,9 \times 10 = 119W$$

La potencia disipada dentro de la misma estará dada por:

$$Wi = 0,01 \times (10)^2 = 1W$$

NOTAS

Puede apreciarse que si la batería es accidentalmente cortocircuitada, el valor del cuadrado de la corriente tomará valores peligrosamente altos. La potencia entregada por la batería **ideal** es de:

$$12 \times 10 = 120 \text{ W}$$

BALANCE DE POTENCIAS

Se verifica entonces que la potencia entregada por el generador (120W) es igual a la consumida ***dentro y fuera del mismo***. Es decir:

$$120 = 1 + 0,2657 + 118,7343$$

NOTAS

Los cálculos se llevaron a cabo con varios decimales para poder verificar la ley de conservación de la energía. En la práctica uno o dos decimales son suficientes. Si la batería de Pb-ácido se reemplaza por una de Ni-Cd de igual voltaje, como ésta tiene una resistencia interna diez (10) veces menor, la caída interna de voltaje (y la potencia disipada en la batería) resultarían ser diez veces menor.

RESISTENCIA INTERNA DE UN BANCO DE BATERIAS

La Figura A1.11 muestra un banco de baterías de 6 V, conectadas en serie/paralelo para dar una salida de 12 V, con amplia capacidad de descarga. La corrriente de salida (ley de Kirchoff para las corrientes) es igual a la suma de las corrientes en cada rama. Cada batería está representada por su circuito equivalente. En el diagrama asumimos que todas las baterías tienen el mismo valor de resistencia interna.

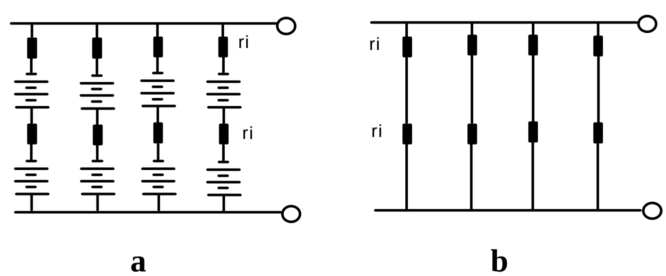


Fig. A1.11- Banco de Batería Serie-Paralelo

Como las baterías de la Figura A1.11a son “ideales”, desde un punto de vista puramente resistivo, el circuito equivalente de cada rama consiste de dos resistencias en serie, con un valor equivalente igual a 2ri (Figura A1.11b). Dependiendo del número de “pares” en paralelo, la resistencia equivalente del banco de baterías estará dada por la tabla dada a continuación:

No de pares	ri del banco
1	2 ri
2	1 ri
3	2/3 ri
4	1/2 ri
5	2/5 ri

El lector deberá verificar estos cálculos como práctica. La tabla muestra que un banco de baterías integrado por un solo "par" de baterías de 6 V tiene la resistencia equivalente más elevada (mayor disipación interna y caída de voltaje). Esta es una razón más para usar una batería de 12 V, en lugar de dos de 6V en serie en un sistema pequeño, ya que el valor de ri para una batería de 12V es similar al de la de 6V.

VOLTAJES PULSANTES

El voltaje ilustrado en la Figura A1.12 es un voltaje pulsante de CC.

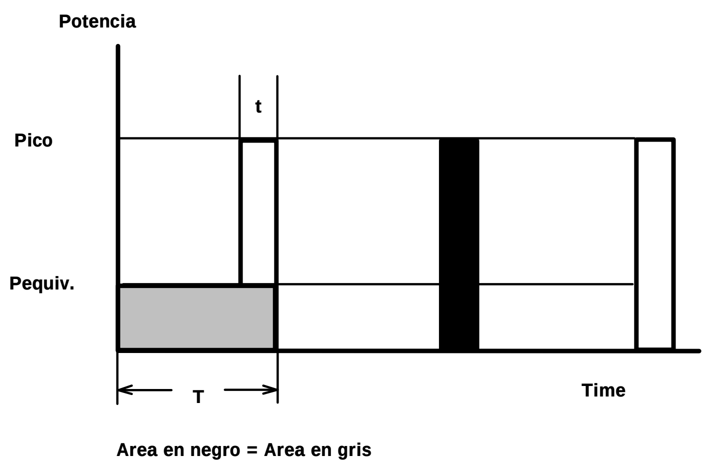


Fig. A1.12- Voltaje Pulsante de CC

Las variaciones del voltaje se repiten al final de un tiempo T, el que representa el período de repetición. Al aplicar este tipo de voltaje a un circuito, durante el tiempo t éste consumirá potencia, pero durante el tiempo T-t el consumo será nulo. El prendido y apagado rítmico de una luz de boya o un cartel luminoso de precaución en una carretera en reparación, son dos ejemplos prácticos de esta forma de onda.

CICLO ACTIVO (CA)

La relación t/T, expresada en forma porcentual, recibe el nombre de ciclo activo (*duty cycle*, en inglés). Si t tiene un valor igual a la mitad de T el ciclo activo (CA) es del 50%; si t es un décimo de T, el CA es del 10%.

POTENCIA EQUIVALENTE

¿Cómo se calcula la energía consumida durante todo el período?. El área del pulso activo (área en negro en la Figura A1.12) representa el valor de la energía entregada al circuito durante el tiempo T, ya que energía es el producto de potencia por tiempo. Esta área es igual a la de un rectángulo con base T y una altura igual a Pequiv. Se cumple entonces que:

t x Pmáx. = Pequiv. x T

De esta igualdad se deduce que el valor de Pequiv está dado por la expresión:

Pequiv = Pmáx. x t/T = Pmáx. x CA

El valor Pequiv se llama potencia equivalente y representa el valor de potencia que el circuito consumiría si trabajara en forma continua durante el tiempo T. La expresión para Pequiv muestra que este valor disminuye cuando el valor del CA disminuye (menor período activo). La determinación del valor de Pequiv permite reducir el funcionamiento intermitente a uno continuo.

EJEMPLO

Supongamos que la luz de una boya permance 1 segundo prendida y 3 segundos apagada (T = 4 seg, t = 1seg). El CA de esta forma de onda es del 25% (1/4). Si la luz consume un valor pico de 20W cuando está prendida, el valor para Pequiv es de 5W. Esto equivale a 0,00555Wh por ciclo (5W x 4/3.600h). Si la noche más larga es de 13 horas, tendremos 11,700 períodos por noche (13 x 3.600/4), o un consumo nocturno para la boya de 65Wh.

CALCULO MAS DETALLADO

Cuando se analiza el problema de la boya con más detalle se advierte que el circuito de control introduce un consumo adicional de 5W durante 0,1seg del período activo. La Fig.A1.13 muestra la forma del nuevo pulso de consumo (área en blanco), el que puede ser interpretado como el del pulso anterior (área en negro) más un pulso de menor valor y duración (área en gris). Este último representa la contribución del circuito de control.

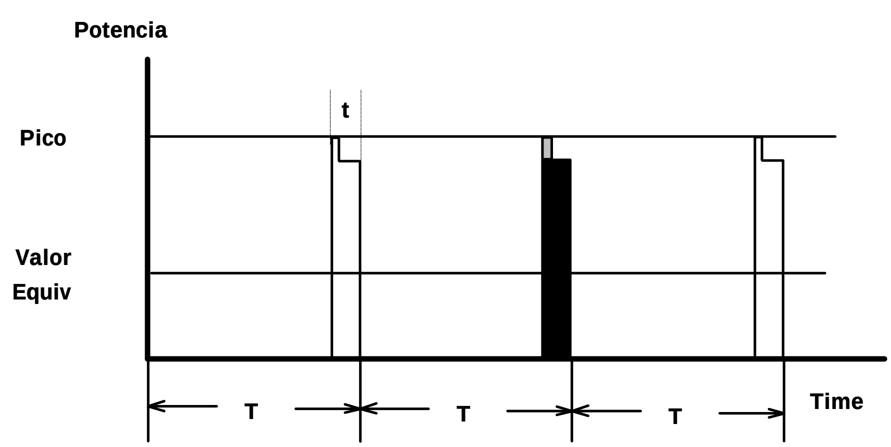


Fig. A1.13- Voltaje Pulsante al Accionar una Boya

El nuevo valor para Pequiv está dado por la suma del valor anterior más el valor de la potencia equivalente introducido por el nuevo valor pulsante, el que tiene el mismo período T. Como t = 0,1seg, el CA de este pulso es de 2,5%. El valor para su potencia equivalente es entonces de 0,125W. El nuevo valor de Pequiv se incrementa a 5,125W. El resto del cálculo sigue los mismos pasos del ejemplo anterior. El nuevo número de Wh/ciclo es de 0,005694Wh, y el del consumo total 66.625Wh por noche.

RADIO-TELEFONO

Otro caso práctico de potencia pulsante se presenta al usar un radio-teléfono. Este equipo permanece en escucha consumiendo un nivel mínimo. Al transmitir, la potencia se incrementa. En este caso no existe un período de repetición, ya que el transmisor permanece activo (tanto en escucha como transmitiendo) durante tiempos variables y su uso no es continuo.

ENERGIA REQUERIDA (Wh/d)

Para estimar el número de Wh/d deberá estimarse un tiempo "promedio" para los dos períodos y un número "promedio" de horas de uso para el radio-teléfono. El valor de la energía consumida durante el tiempo activo "promedio" multiplicado por el número de veces que se usa, dará un valor de Wh/d. El período de transmisión promedio de nuestro ejemplo es de 15' y el de escucha de 5'. Si el consumo en escucha es de 1W y el de transmisión de 10W, la energía consumida en escucha es de 0,083Wh (1Wx 5/60h) y de 2,5Wh en transmisión (10W x 15/60h). La energía requerida por un período activo será de 2,583Wh. La duración del período activo es de 20'. Si el promedio de uso es de 4hr/d, habrá 12 ciclos activos (4 x 60/20). La energía requerida por el radio-teléfono será de 31Wh/d.

DIODO

Este semiconductor es muy usado porque actúa como un interruptor unidireccional, permitiendo el paso de la corriente en una sola dirección. La juntura N-P descripta en el capítulo 3 es, básicamente, un diodo de juntura. Si en lugar de exponer el diodo a la luz solar se le aplica un voltaje externo, dependiendo de la polaridad del mismo, el voltaje de equilibrio se verá incrementado o disminuído. Cuando el ánodo es positivo con respectoa al cátodo, el diodo conduce. Una polaridad opuesta no permite el paso de la corriente. La Figura A1.14 muestra el símbolo usado para el diodo.

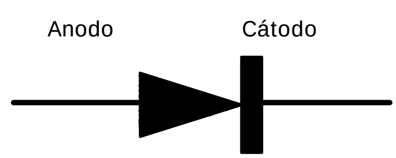


Fig. A1.14- Símbolo para el Diodo

El triángulo del lado de ánodo puede interpretarse como una flecha que marca el sentido de conducción. El uso más común para un diodo en un sistema FV es el de aislar eléctricamente dos partes de un circuito, como se vió al tratar los sistemas híbridos (Capítulo 11). Su unidireccionalidad permite protejer circuitos de CC que no pueden tolerar ser conectados con la polaridad invertida.

APENDICE I
CIRCUITOS ELECTRICOS
Segunda Parte: Cicuitos de CA

CORRIENTE ALTERNADA

A diferencia del de corriente continua, el voltaje de corriente alternada (CA) varía su polaridad en función del tiempo, alcanzando dos máximos de igual valor (uno positivo y el otro negativo), durante el período de repetición, como lo muestra la Figura A1.15.

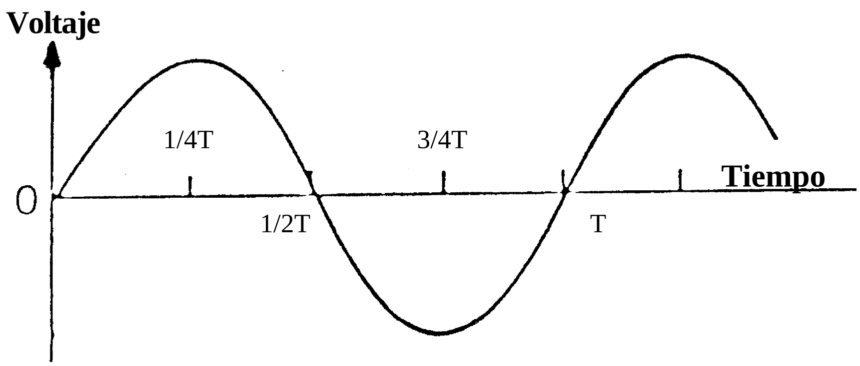


Fig. A1.15- Voltaje Sinusoidal de CA

PERIODO Y FRECUENCIA

Las variaciones son cíclicas. Esto significa que un determinado valor se repite luego de un cierto tiempo (T), denominado período. La inversa del período (1/T) es la frecuencia (f). Esta representa el número de veces por segundo que el valor elejido para el voltaje se repite durante esa unidad de tiempo. En cada instante (t), el valor del voltaje del generador está dado por la expresión:

$$v = Vp \times \text{sen}\,(2.\pi.t\,/T)$$

Donde v es el valor instantáneo que tiene el voltaje del generador en el instante t, Vp es el valor máximo de ese voltaje (valor pico), T es el período y π es una constante, cuyo valor aproximado es 3,1416. A cada valor de t corresponde un ángulo eléctrico dado por el producto $2.\pi.t\,/T$. Cuando t toma los valores 0, T/2 y T, el ángulo eléctrico toma los valores 0, π y 2π respectivamente. El valor del seno para estos ángulos es cero y, por lo tanto, el voltaje es nulo. Cuando t = T/4 el seno toma el valor +1. Cuando t = 3/4T el seno toma el valor -1. Para cada uno de estos valores el valor instantáneo de v alcanza el valor pico positivo y negativo, respectivamente. Para generadores de CA basados en la tecnología de los EEUU, la frecuencia de repetición es de 60 ciclos por segundo. Como el valor del período es igual a la inversa de la frecuencia, se tiene que:

$$T = 1/f = 1 / 60 = 0{,}01666 \text{ s} = 16{,}666 \text{ ms}$$

Para los equipos de generación basados en la tecnología europea, el valor de la frecuencia es de 50 ciclos por segundo. El período es de:

$$T = 1 / 50 = 20 \text{ ms}$$

NOTA El cambio de polaridad en el voltaje de CA implica que el voltaje debe pasar por el valor cero durante el período. Es por ello que un interruptor de CA no puede sostener un arco al abrir un circuito, simplificando el diseño y reduciendo el tamaño de estos interruptores.

VALOR EFICAZ El valor más usado para el voltaje de CA es el valor eficaz (*rms*, en inglés). En lugar de dar una definición matemática del mismo daremos su significado físico. Para ello imaginaremos un simple experimento. Un resistor (R) es conectado a un voltaje constante de CA. La potencia disipada en el mismo (calor) es medida con un calorímetro. Reemplazando el voltaje de CA por uno variable de CC, podemos ajustar su valor hasta alcanzar el valor que produce ***la misma disipación de potencia***. El valor del voltaje de CC que permite alcanzar esta igualdad es, por definición, el valor del voltaje eficaz de CA (Vef)

NOTA ***El valor eficaz de CA es el que permite calcular la potencia (generada o disipada) en un circuito de CA.*** El valor de corriente que circula por el resistor de nuestro experimento es el valor eficaz de la corriente en el circuito.

RELACION ENTRE Vp y Vef La relación entre el valor pico (máximo) y el eficaz está dada por la expresión:

$$Vp = Vef \times \sqrt{2} = Vef \times 1{,}4142$$

El valor pico para un sistema de 120Vef es de:

$$Vp = 120 \times 1{,}4142 = 169{,}7V$$

En sistemas con tecnología europea el valor efectivo del voltaje es de 220V. El correspondiente valor pico es de 311,13V.

NOTA Deberá tenerse presente que esta simple relación ***sólo es válida*** si la forma de onda es puramente sinusoidal.

VOLTAJES NO-SINUSOIDALES Cuando la forma de onda del voltaje no es sinusoidal, la teoría muestra que ésta puede ser considerada como la suma de varias ondas sinusoidales de diferentes frecuencias y amplitudes pico. La componente que tiene la misma frecuencia que la de la onda no-sinusoidal es la ***fundamental.*** Las restantes se denominam ***armónicas***. Estas últimas se caracterizan por tener frecuencias más altas, las que son múltiplos de la fundamental (x2, x3, x4, xn), y amplitudes picos que decrecen al incrementarse la frecuencia. El valor efectivo de una onda no-sinusoidal está dado por la expresión:

$$Vef = \sqrt{V^2ef_1 + V^2ef_2 + V^2ef_3 + ... + V^2ef_n}$$

donde Vef_1, Vef_2, Vef_3, Vef_n son los valores efectivos de las armónicas de la onda analizada. Por definición, el valor eficaz está relacionado con la potencia disipada. Voltajes no-sinusoidales inducen pérdidas a frecuencias más elevadas que la fundamental.

NOTA

El valor efectivo de una onda no-sinusoidal es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores efectivos de cada una de sus armónicas.

DISTORSION PORCENTUAL

Usando filtros eléctricos que eliminan la fundamental, se puede medir el valor efectivo de las armónicas (Vef_h). La relación entre este valor y el valor efectivo de la onda no-sinusoidal, dado en forma porcentual, es lo que se conoce por el factor de distorción (D) de esa forma de onda. Se tiene entonces que:

$$(Vef_h / Vef) \times 100 = \%D$$

Este valor es importante cuando se evalúa la pureza de la forma de onda sinusoidal a la salida de un inversor. Cuanto el valor de D aumenta, la distorsión es más pronunciada. El valor de Vef_h es cero para una onda sinusoidal pura.

NOTA

La medición del valor eficaz de voltaje de una onda no-sinusoidal requiere el uso de voltímetros de CA especiales, los que toman en cuenta las armónicas. Estos instrumentos reducen la medida de un voltaje de CA a una de calor, y reciben el nombre de voltímetros efectivos de CA (*true rms voltmeter*, en inglés).

IMPEDANCIA

Los circuitos de CA obedecen la ley de Ohm y las dos leyes de Kirchoff. El concepto de “resistencia a la circulación de la corriente” toma un caracter más complejo en los circuitos de CA, dado que la oposición al paso de la corriente puede ser *independiente* de la frequencia (resistencia) o *dependiente* de la frequencia (reactancia). La acción combinada (resistencia y reactancia) se denomina **impedancia**.

REACTANCIAS

Existen dos tipos de reactancia: la **inductiva** y la **capacitiva**. Si una carga de CA tiene bobinados (motores, balastros de luces fluorescentes, etc) la carga es del tipo inductiva, ya que éstos constituyen la que se denomina *inductores*. La presencia de capacitores no es común, aunque a veces son introducidos para compensar el efecto detrimental de los inductores, como veremos más adelante.

CANTIDADES VECTORIALES

Cuando la carga de CA sólo contiene elementos resistivos, el cálculo del valor de la corriente se reduce a dividir el valor del voltaje efectivo por el de la resistencia del circuito. Si, en cambio, el circuito tiene una impedancia, el cálculo del valor de la corriente requiere trabajar con vectores. Estas cantidades se caracterizan por tener dos valores asociados con ellos: magnitud y dirección. Operaciones vectoriales requieren el uso de números complejos.

EN FASE Y EN CUADRATURA

La introducción de una impedancia significa que el voltaje y la corriente no están “en fase”. Para un determinado valor de t, el valor del ángulo que alcanza uno de ellos puede ser mayor (adelantado), o menor (atrasado), que el de la otra variable. Si la carga es puramente capacitiva, la corriente está adelantada (90°) con respecto al voltaje.

Si la carga es puramente inductiva, la situación es la opuesta. Cuando la impedancia es resistiva pura, el desfasaje es cero.

COMPONENTES DE UN VECTOR

La teoría muestra que un vector que tiene un ángulo +Φ (letra griega fi) respecto al eje x, como se muestra en la Figura A1.16, puede ser considerado como la suma (vectorial) de dos componentes, una "en fase" (dirección x) y la otra en "cuadratura" (dirección y). Si el vector V, en lugar de estar en el cuadrante Q1 (Φ positivo) estuviere en el cuadrante Q4 (Φ negativo) , la componente en cuadratura sería negativa.

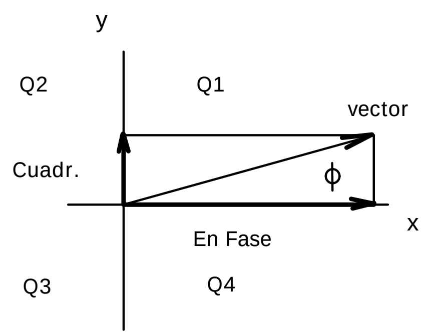


Fig. A1.16- Componentes de un Vector

POTENCIA EN CIRCUITOS DE CA

Para calcular la potencia en circuitos de CA debemos tener en consideración el ángulo de desfase relativo entre el voltaje y la corriente. Si arbitrariamente le asignamos al voltaje la fase 0, el vector corriente tendrá un ángulo +/-Φ con respecto al voltaje. La Figura A1.17 muestra un circuito de CA cuya carga es una impedancia que tiene una parte resistiva y otra inductiva (típica de un motor de CA).

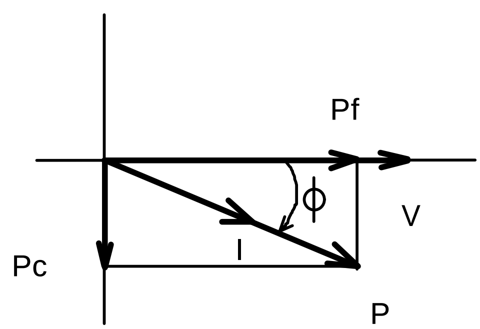


Fig. A1.17- Corriente y Voltaje en un Circuito de CA

POTENCIA UTIL Y REACTIVA

El cálculo vectorial muestra que el vector corriente (I) tiene un ángulo -Φ respecto al voltaje. El valor de este ángulo crece cuando lo hace la componente inductiva de la impedancia. El vector potencia (P) tiene una magnitud dada por el producto vectorial V x A y forma el mismo ángulo que la corriente respecto al vector V. El vector potencia puede descomponerse en un vector en fase (Pf), que representa la ***potencia útil*** de CA (capaz de mover un motor, por ejemplo), y un vector en cuadratura (Pc) el que representa la ***potencia reactiva***, la que sólo genera pérdidas de calor. Es por ello que las especificaciones para la potencia de trabajo de algunos inversores están dadas por el producto del voltaje y amperaje (VA), en lugar de un valor en watts (W).

COSENO F

Si se tienen cargas inductivas, el valor de la potencia en fase es siempre menor que el del valor en volt-amperes (VA). Esto explica porqué al elejir un inversor agregamos 25% al valor de la potencia calculada. La componente en fase de la potencia está dada por:

$$Pf = P \times \cos(-\Phi)$$

Si el ángulo es cero, su coseno es igual a la unidad y la potencia en cuadratura se anula. Lo ideal es que la corriente tenga un ángulo de desfasaje pequeño respecto del voltaje. Un método de reducción consiste en agregar una carga capacitiva. Esta introduce una componente cuadrática de la corriente que es positiva, disminuyendo las pérdidas reactivas.

RED DE DISTRIBUCION DOMICILIARIA

La distribución domiciliaria de la energía eléctrica de CA se efectúa utilizando lo que se denomina un sistema trifásico, el que consiste de tres voltajes, cuyas fases están separadas 120° eléctricos (como el símbolo de la Mercedes Benz). Al llegar al punto de alimentación para una casa, se utilizan dos de estas fases, como se ilustra Figura A1.18.

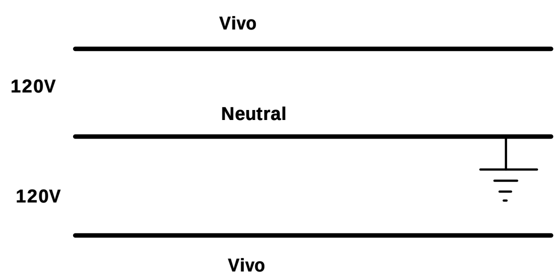


Fig. A1.18- Distribución de la Energía Eléctrica en Sistemas de CA (EEUU)

En esta configuración existe un neutral y dos “vivos” (uno por fase). Cada combinación de un “vivo” con el neutral corresponde a una fase del transformador de distribución.

NOTA

En los sistemas que obedecen a la tecnología de los EEUU, el neutral está conectado a tierra. En sistemas vinculados con la tecnología europea el neutral no está conectado a tierra.

VOLTAJE ENTRE FASES

La entrada de CA en una casa usa dos de las fases. Cada uno de los voltajes “vivos” proveen un voltaje efectivo de 120V con respecto al neutral. Si se conecta entre dos vivos, el voltaje está dado por la expresión:

$$V = \sqrt{3} \times Vef$$

Este valor es de 207,8V en un sistema norteamericano y alcanza 381.05V en un sistema con tecnología europea. Cuando se usa un inversor en un sistema FV mixto, sólo se tiene una fase, es decir, un vivo y un neutral. Estos sistemas se denominan monofásicos. Si se agrega otro inversor, el voltaje entre los vivos no obedece el dado por la expresión anterior. Su valor está dado por la suma de los dos voltajes, la que dependerá del desfase entre los dos (cero o el doble).

CONVENCION DE COLORES Por convención, en sistemas relacionados con la tecnología de los EEUU, el cable asociado con el "vivo" es el negro, el del neutral, el blanco. Es importante recordar este código, ya que en sistemas de CC el color negro corresponde al negativo, el que suele ser conectado a tierra.

PORCENTAJES El concepto de porcentaje es muy importante, y es usado extensivamente en este libro. Es por ello que he incluúdo este tema como parte de este apéndice.
Un porcentaje es una relación de un número con respecto a 100. Si en 100 bolillas hay 2 unidades de color negro, y el resto son blancas, el porcentaje de bolillas negras estará dado por la relación:

$$\frac{2}{100} \times 100 = 0,02 \times 100 = 2\ \%$$

Si en lugar de 100 bolillas sólo se tienen 46, el porcentaje de bolillas negras estará dado por la expresión:

$$\frac{2}{46} \times 100 = 0,043478.... \times 100 = 4,378...\%$$

El segundo valor porcentual es más alto porque las dos bolillas negras representan una mayor proporción del número total.

REDONDEO DE CANTIDADES Si tomamos una cantidad cualquiera, por ejemplo 2,57 y queremos calcular que porcentaje representa la parte decimal respecto de la entera, tendremos que:

$$(0,57/2,57) \times 100 = 22,17...\%$$

Tomemos ahora el mismo número (2,57), el que redondeamos a 3,0. ¿Cuál es el porciento de incremento?. Hemos agregado 0,43 al redondear a 3,0. Este valor (0,43) representa un porcentaje de:

$$(0,43/2,57) \times 100 = 16,73....\%$$

ACUMULACION DE ERRORES El uso de porcentajes permite establecer el impacto en la variación de una cantidad. Si el número 2,57 representa el número de paneles calculados y optamos por 3 paneles, el incremento en la potencia a generase será del 16,73%. Si optamos por 2 paneles, perderemos 22,17%.

Es importante tener en cuenta que si un proceso de cálculo tiene varios pasos, el redondeo debe hacerse con la cantidad final y no ***con cada una de las cantidades parciales***, ya que cada redondeo agrega o disminuye un porciento de error, que es acumulativo. El uso de un modesto calculador electrónico hace posible, hoy día arrastrar varias cifras decimales sin problema.