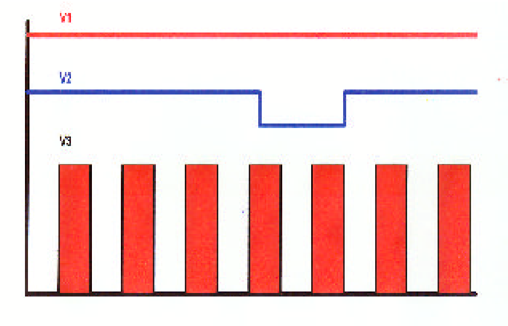
APENDICE I



CIRCUITOS DE CONTINUA

Introducción

Asumo, al comenzar este apéndice, que quien lo lea, tiene un limitado conocimiento sobre circuitos eléctricos, de manera que comenzaré por definir las partes que componen un circuito eléctrico de distribución, para continuar con la introducción de los parámetros (variables) que lo definen, y las leyes físicas que permiten calcular los valores de esos parámetros. El Apéndice II describe los circuitos de Corriente Alternada (**CA**)

Circuito eléctrico de

Un circuito eléctrico de este tipo, tiene tres bloques que lo componen: el **Generador**, el **Medio Conductor** y la **Carga**. La Figura AI.1 ilustra estos tres bloques.

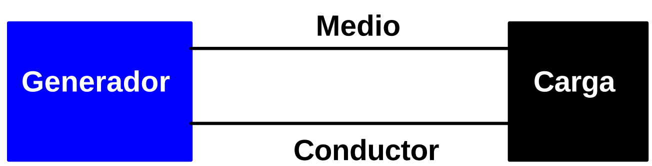


Figura AI.1- Bloques que forman un circuito de distribución

El Generador crea la energía eléctrica que será utilizada por la Carga. Este término genérico se emplea para describir un aparato que consume o transforma la energía eléctrica. Un foco de luz incandescente consume energía eléctrica, la que se transforma en calor en el filamento, produciendo la emisión de luz visible. Un motor eléctrico transforma la energía eléctrica que consume en energía mecánica (rotación de un eje). Ambos representan ejemplos de cargas eléctricas.

El Medio Conductor (cables) permite el transporte de esta energía, con bajas pérdidas.

Notas: *Un sistema de distribución de energía de CA, del tipo usado para distribuír energía eléctrica a una ciudad o a grandes distancias, incorpora dos bloques adicionales: un transformador a la salida del generador, el que incrementa el voltaje que alimenta al medio conductor, y un transformador reductor al otro extremo, para reducir el voltaje a un valor compatible con la seguridad de los usuarios.*

La elevación del voltaje de salida del generador disminuye enormemente las pérdidas en la línea, ya que las pérdidas aumentan con el cuadrado de la la corriente.

Circuito de CC

El conocimiento de un circuito de Corriente Continua (**CC**) es imprescindible, ya que el panel FV es un generador de este tipo. Tanto el diseñador, como el instalador, deben familiarizarse con las leyes que gobiernan el comportamiento de estos circuitos. Si el consumidor adquiere un conocimiento básico, ello siempre contribuye a un mejor uso del sistema instalado.

Por definición, en un circuito de continua la **polaridad** del generador es **independiente del tiempo**, o dicho de otra forma, no cambia con el tiempo. Es importante destacar que la ***polaridad***, y no la constancia en el valor del voltaje o la corriente, es lo que define este tipo de circuito.

La Figura AI.2 muestra, en forma gráfica, tres generadores de continua. Se puede observar que los voltajes de salida pueden o no ser constantes, pero la polaridad nunca cambia con el tiempo.

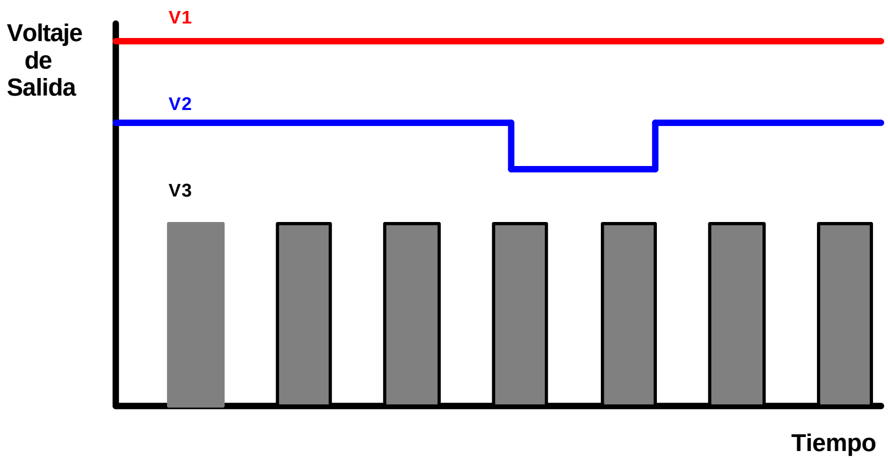


Figura AI.2- Tres voltages de CC

El primero (V1) representa el voltaje de salida de una batería capaz de sostener una corriente constante a una carga de valor fijo.

El segundo (V2) representa el voltaje de salida de un panel FV, el que se vé afectado cuando una nube se interpone en el camino de los rayos solares por un corto tiempo. El gráfico muestra una transición abrupta del voltaje de salida, para simplificar la presentación. En la práctica la transición no es tan abrupta.

El tercero (V3) representa la salida de un generador de **CC pulsante**. Las áreas sombreadas representan los tiempos de conducción. El voltaje ilustrado corresponde a un generador de pulsos de amplitud constante, donde los períodos de conducción y no-conducción (ancho de tiempos en la gráfica) tienen la misma duración.

Al describir los controles de carga hemos mencionado una variación de este tipo de generador, donde el período de conducción es variable. Abordaré este tema, con más detalle, en este apéndice.

Voltaje, corriente y resistencia

Para poder definir un circuito de CC se necesita conocer tres variables (parámetros eléctricos): el ***voltaje***, la ***corriente*** y la ***resistencia*** del mismo. El voltaje del generador es el que fuerza la circulación de la corriente en el circuito, el que tiene una resistencia eléctrica que comprende los valores dentro del generador, dentro de la carga y la de los cables de conducción.

Dado que el consumo de la carga, o las pérdidas en los cables cambian el voltaje en el circuito, se hace necesario diferenciar el voltaje del generador de los otros voltajes. Al generador se lo conoce como la Fuerza Electro Motriz, o, en forma abreviada **FEM**.

Valores de voltajes asociados con una FEM usan la abreviatura **Vfem**. Esta nomenclatura facilita, como veremos, la expresión e interpretación de una de las leyes que rigen estos circuitos. Los valores de voltajes utilizan la letra **V** para indicar este tipo de valor. Los de corriente la letra **I**, y los de resistencia eléctrica la letra **R**. Estas letras pueden ser mayúsculas o minúsculas, aunque es tradicional usar las mayúsculas y reservar las minúsculas para valores pequeños respecto del resto del circuito, o para identificar valores especiales.

Unidades

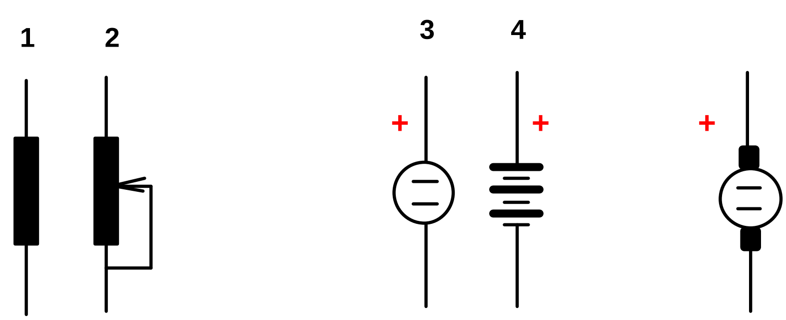
Los voltajes se miden en **Volts**, la corriente en **Amperes** y la resistencia eléctrica en **Ohms** **(**W) Dependiendo del rango de valores, estos parámetros pueden ser dados como submúltiplos (m**A**, miliamperes; m**V**, milivolts; milliohms, mW) o múltiplos (**KΩ**, kilo-ohms; **MΩ**, mega-ohms) de la unidad de medida. El amper representa un valor substantial para la corriente, de manera que en los sistemas FVs que se describen en este manual no superan los 100 A.

Leyes de CC

Afortunadamente, la determinación de los valores de corriente, resistencia y voltaje sólo requieren el conocimiento de ***una ley física***: la **ley de Ohm**. Esta ley es complementada con las **dos leyes de Kirchhoff**, una para los voltajes, y la otra para las corrientes, las que permiten calcular el valor equivalente de resistencias conectadas en serie o paralelo, como veremos de inmediato.

Representación simbólica

Los componentes de un circuito usan representaciones simbólicas que, con pequeñas variaciones, adquieren un caracter internacional. Las más usadas en circuitos de CC se muestran a continuación.



1- Resistor de valor fijo

2- Resistor de valor variable

3- Generador de CC

4- Batería de acumulación

5- Motor de CC

Un resistor de valor variable se llama potenciómetro. Para representar a una batería se acostumbra mostrar varias células en serie, donde el trazo más grueso y ancho corresponde al positivo de una célula. A veces el símbolo de la batería se reduce al de una célula. El valor del resistor acompaña a su símbolo. En la literatura de EEUU un valor de 1.200 Ω se escribe 1.2KΩ. En Europa es común expresar este valor como 1K2 Ω.

Ley de Ohm

Esta ley vincula las tres variables de un circuito de CC. Como sólo existe una expresión (fórmula), en la práctica se necesita conocer **dos de los tres valores** para poder calcular el tercero. Eso es, precisamente lo que dice la ley de Ohm, donde:

$$I = V / R \qquad (1.1)$$

$$V = I \times R \qquad (1.2)$$

$$R = V / I \qquad (1.3)$$

Cualquiera de estas expresiones representa la ley de Ohm. Cuál de ellas se debe usar está determinado por los dos valores que se conocen.

Esta ley establece que en un circuito existe una relación lineal (***proportional***) entre los valores de V, I y R. Esta proporcionalidad se extiende a los voltajes entre los extremos de un resistor, o entre los terminales de carga.

Por ejemplo, para mantener un valor **constante** para **I** en (**1.1**), si el valor de V se duplica, el de R debe duplicarse. Si el valor de I **no es constante**, pero el de R lo es, al duplicar el valor de V, el valor de I se duplicará. Razonamientos similares pueden hacerse con las restantes expresiones.

Si en la expresión (**1.2**) el valor de R es constante, la gráfica que relaciona los valores de V e I forman una línea recta (relación lineal), cuya ***inclinación*** depende del valor de R, como lo muestra la Figura AI.3. Para un valor de corriente (**I_1**), el circuito que ofrece más resistencia demanda un más alto valor de voltaje (V2 > V1) para establecer ese valor de corriente. El símbolo > significa mayor que.

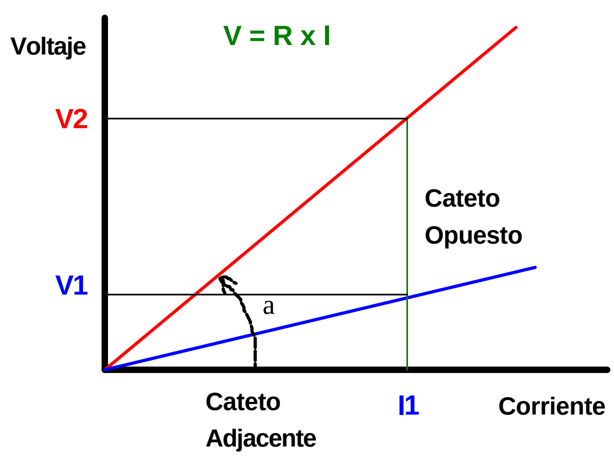


Figura AI.3- Gráfica V-I en un circuito lineal

Si dividimos el valor V_2 / I_1 obtenemos el valor de R_2 en el circuito. Como el valor de V_2 representa, asimismo, el valor del cateto opuesto del ángulo a , y el de I_1 el del cateto adjacente, el valor de la resistencia R_2 resulta ser la tangente del ángulo a (tang a).

Componentes no lineales

Cuando el voltaje a través de un componente o un generador no puede ser representado por una variación lineal (elementos **no lineares**), es evidente que la resistencia no permanence constante.

Este es el caso del voltaje a través de un diodo semiconductor o el de un panel FV. ¿Qué pasa con la ley de Ohm en estos casos? La respuesta es que **sólo es válida** en pequeños trozos de la curva. Pequeñas variaciones de voltaje y corrientes se expresan como Dv y Di, respectivamente, donde la letra griega D (delta) tiene el significado de "***pequeña variación de***".

En cada fragmento de la curva V-I (o I-V) el valor de la resistencia para esa pequeña zona está dado por:

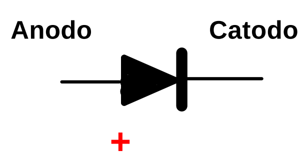
r = D**v** / D**i** **(1.4)**

Panel FV

Si analizamos la curva I-V para un panel FV considerando, en distintos puntos de la misma, la variación que experimenta la corriente para un valor **constante** de Dv, observamos que en la zona donde la corriente se mantiene prácticamente constante, los valores de Di son muy pequeños. La resistencia equivalente, o resistencia interna del panel, de acuerdo con la expresión 1.4 tiene un valor muy elevado. Al llegar al codo, y a partir de este punto, para el mismo valor de Dv corresponderán valores crecientes para Di, es decir, la resistencia interna del generador disminuye rápidamente.

Un análisis similar para la curva I-V de un diodo, en la zona de conducción, muestra que al incrementarse el voltaje, la corriente crece en forma no lineal, mostrando una fuerte reducción de la resistencia interna. Por ello se utilizan los diodos como interruptores serie.

El símbolo usado para un diodo semiconductor es el ilustrado. Consiste en una flecha, que marca la dirección de la corriente cuando el ánodo tiene un voltaje más alto que el cátodo (0,6 V aprox.), y de una barra que indica el bloqueo de la corriente a través del diodo si la polaridad se invierte.



Resistencia interna

Mencioné este término en el párrafo anterior. Pasaré ahora a describirlo en más detalle. La mejor forma de considerar los valores de resistencia dentro del generador (o batería) es agrupar un generador ideal (sin resistencia alguna y voltaje constante) con una resistencia externa cuyo valor es igual al de la resistencia interna del generador real. Esta combinación representa el circuito **equivalente** del generador (o batería), ya que el voltaje entre los bornes de salida del circuito equivalente son iguales a los medidos a la salida del generador (o batería). Este voltaje puede calcularse usando la ley de Ohm:

Voltaje de salida = Voltaje ideal - (ri x I)

Al producto **ri x I** se lo conoce como la **caída interna de voltaje.**

Circuito cerrado

Este concepto es importante porque la resolución de circuitos está asociada, como veremos pronto, con la circulación de la corriente en el mismo. Un circuito se dice que es cerrado si, partiendo de un determinado punto en el mismo, al asumir un ***sentido de circulación arbitrario***, la corriente vuelve al punto de salida.

Conecciones serie y paralelo

Es evidente que sólo puede establecerse una corriente en un circuito cerrado.

Se dice que un elemento de circuito está conectado en serie, cuando por él circula **toda la corriente del circuito**. Se dice que un elemento de circuito está en paralelo **cuando sólo una porción de la corriente** total circula por el mismo. Como veremos a continuación para el caso de los resistores, la porción de la corriente total que circula en un resistor conectado en paralelo con otro, es ***inversamente proporcional a su valor resistivo***.

1ra ley de Kirchhoff

Esta ley establece que un circuito cerrado la suma total de los voltajes es igual a cero. Esta ley física implica que existen voltajes positivos y negativos, los que se cancelan entre sí.

Para establecer el signo del voltaje se necesita establecer un sentido de circulación para la corriente. El adoptado por este manual es el más aceptado en la literatura técnica: la corriente sale del positivo de la FEM y regresa a este punto, como se muestra en el circuito de la Figura A.I.4.

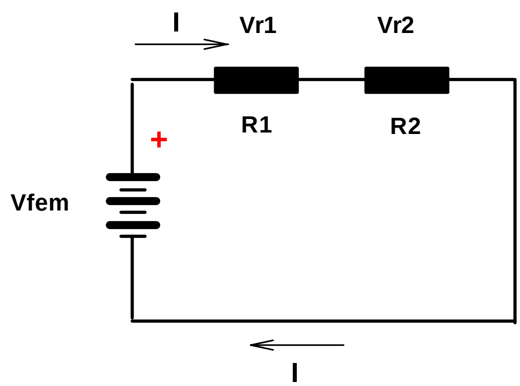


Figura AI.4- Circuito de continua

Si recorremos imaginariamente el circuito, comenzando por el negativo (mínimo voltaje), al ir al positivo por dentro de la batería el voltaje se incrementa, ya que la batería representa la FEM del circuito. A este voltaje creciente le asignaremos el signo positivo.

Al pasar la corriente por R_1 y R_2, el voltaje disminuye hasta igualar al del negativo de batería. En cada resistencia se produce una **caída de voltaje**, cuyo valor estará dado por el producto de la corriente (I) por el valor de la respectiva resistencia. Como el voltaje cae, le asignaremos un signo negativo.

La ley de Kirchhoff para los voltajes puede escribirse como:

$$\mathbf{FEM - (Vr_1 + Vr_2) = 0} \qquad \mathbf{(1.5)}$$

o, pasando las cantidades en paréntesis al otro lado de la ecuación:

$$\mathbf{FEM = Vr_1 + Vr_2} \qquad \mathbf{(1.6)}$$

Esta expresión significa que la FEM es igual a la caída total de voltajes en el circuito. Ambas expresiones representan la ley de Kirchhoff para los voltajes.

Substituyendo los valores de $\mathbf{Vr_1}$ y $\mathbf{Vr_2}$ por los respectivos productos, la expresión (1.6) se convierte en:

$$\mathbf{FEM = I\,(R_1 + R_2)} \qquad (1.7)$$

La suma de las dos resistencias representa la resistencia total del circuito. En este ejemplo se asume que la resistencia interna de la batería es nula, por simplicidad. Más adelante se incorpora este valor en un ejemplo.

La expresión 1.5 no está limitada a la presencia de dos resistencias, de manera que la expresión 1.7 puede contener la suma de varias resistencias en serie. Esto nos permite generalizar los resultados y concluír que:

El valor de la resistencia equivalente serie en un circuito es igual a la suma de los valores de las resistencias en serie en el circuito.

Ejemplo

Tomemos en consideración el circuito de la Figura AI.5, en donde consideramos que la FEM (batería) tiene una resistencia interna (ri), que los dos valores R_1 y R_2 representan las resistencias ómhicas de los cables que unen la carga con el generador, y que los cables están conectados a una carga, cuyo valor resistivo es rc.

Como los dos tramos de cable que unen el generador a la carga son del mismo tipo y largo, se deduce que $R_1 = R_2$. Como sabemos que la resistencia serie (total o parcial) es igual a la suma de las resistencias en serie, la resistencia del cable estará dada por $R_{cable} = 2R_1 = 2R_2$. Esta igualdad muestra que para el cálculo de la resistencia en el cableado debe considerarse una distancia igual al doble de la real.

La resistencia **ri** representa la resistencia interna de la batería. El circuito equivalente de batería en la Figura AI.5 se muestra en azul.

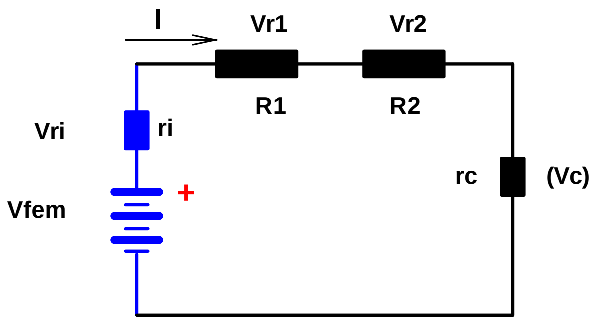


Figura AI.5- Circuito de CC con carga

Asignaremos valores a los componentes del circuito.

Vfem = 12 V
ri = 0,01 Ω
R1 = **R2** = 0,1 Ω
rc = 7 Ω

La resistencia del cable será de 0,2 Ω. Como el voltaje de salida de la FEM depende del valor de la corriente, debemos primero calcular este valor.

$$\mathbf{I = 12 / (0{,}01 + 0{,}2 + 7) = 12 / 7{,}21 = 1{,}66\ A}$$

En este ejemplo puede apreciarse que el valor de **ri** representa el 0,14 % del valor del valor de la resistencia del resto del circuito, reduciendo el voltaje de batería (**Vb**) a:

$$\mathbf{Vb = 12 - (0{,}01 \times 1{,}66) = 11{,}9834\ V,}$$

lo que representa un 0,14% de reducción en el voltaje de salida.

El voltaje a través de la carga será de:

$$\mathbf{7 \times 1{,}66 = 11{,}62\ V}$$

La caída de voltaje en los cables puede calcularse de dos maneras diferentes: como el producto de su resistencia por la corriente, o como la diferencia entre el voltaje de salida de batería menos el de la carga (1ra ley de Kirchhoff). Es decir:

$$\mathbf{Vcable = 0{,}2 \times 1{,}66 = 0{,}332\ V \quad o \quad = 11{,}9834 - 11{,}62 = 0{,}3634\ V}$$

La diferencia entre las dos cantidades (menos del 1%) se debe al redondeo hecho en los cálculos. En la práctica dos decimales son suficientes para los cálculos, pero he considerado más de dos para obtener una mínima diferencia en los valores.

2da ley de Kirchhoff

Esta es la ley de Kirchhoff para las corrientes. Se aplica cuando en alguna parte del circuito se crean pasos múltiples para la corriente, como en el caso de la Figura AI.6, donde se adiciona otra carga al circuito considerado anteriormente.

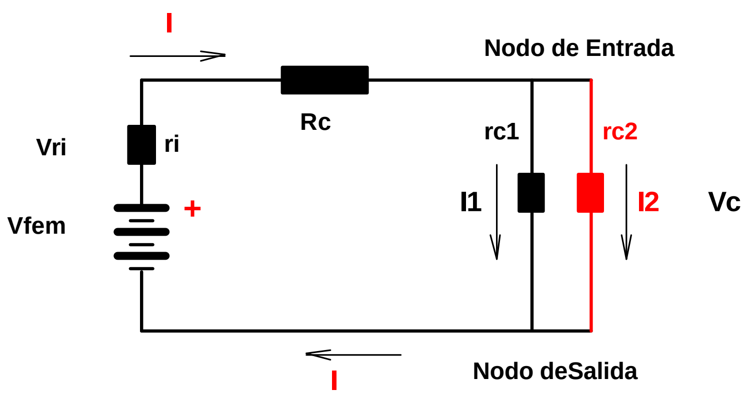


Figura AI.6- Resistencias en paralelo

Cuando dos (o más) resistencias en un circuito tienen conectados sus extremos entre sí (rc1 y rc2 en nuestro ejemplo), se dice que entán en paralelo. Al compartir el mismo potencial en cada extremo, las resistencias tienen la **misma diferencia de potencial** **(Vc)** entre sus extremos**.**

La segunda ley de Kirchhoff establece que la **corriente que entra a la bifurcación** (**I**) tiene el mismo valor que la que sale de la bifurcación ($\mathbf{I_1}$ + $\mathbf{I_2}$). Al punto de entrada se lo llama ***nodo de entrada***. Al de salida, ***nodo de salida***. Como la ley de Ohm establece un solo valor para la corriente (V/Rt), es obvio que no se puede perder o ganar corriente Por lo tanto:

$$\mathbf{I = I_1 + I_2} \qquad \mathbf{(1.8)}$$

Reemplazando los valores de $\mathbf{I_1}$ e $\mathbf{I_2}$ por los correspondientes en función de Vc, rc_1 y rc_2 se tiene que:

$$I = Vc / rc_1 + Vc / rc_2 = \mathbf{Vc\ (1/rc_1 + 1/rc_2)} = Vc / St \qquad \mathbf{(1.9)}$$

Los términos $\mathbf{1/rc_1}$ y $\mathbf{1/rc_2}$ representan los valores de conductancias Sc_1 y Sc_2, en Siemens (unidad de conductancia). Por simplicidad en la presentación, la Figura AI.6 sólo considera la existencia de dos resistencias, pero si hubiere un número mayor de ellas, la expresión **(1.9)** tendría términos adicionales correspondientes a las conductancias de las nuevas resistencias. Esto nos permite generalizar los resultados y concluír que:

La conductancia total (St) de dos (o más) resistencias en paralelo es igual a la suma de las conductancias parciales.

La expresión en negrita en **(1.9)** proporciona una forma de calcular el valor de la conductancia total en paralelo. En la práctica resulta más práctico determinar el valor de la resistencia equivalente en paralelo, el que está dado por el valor de 1/St. Para dos resistencias en paralelo la suma de las conductancias, luego de reducir la suma a un denominador común, se convierte en la expresión:

$$\mathbf{Rp = \frac{rc_1 \times rc_2}{rc_1 + rc_2}} \qquad \mathbf{(1.10)}$$

Se deduce que el valor equivalente de dos resistencias en paralelo está dado por el **producto** de sus valores individuales **dividido** por el valor de su **suma**. Si se desea calcular el valor de varias resistencias en paralelo puede reducirse el problema a un cálculo repetitivo, agrupando las resistencias en pares y luego los valores equivalentes entre sí.

Si el número de resistencias es impar, el cálculo se reduce al valor equivalente del último par en paralelo con una resistencia. El lector puede verificar, usando dos valores arbitrarios, que el valor equivalente de dos resistencias en paralelo es siempre ***menor*** que el menor de los valores individuales. Esto se debe a que el valor del denominador en la expresión **(1.10)** es siempre **mayor que la mayor de ellas**.

En particular, el valor equivalente en paralelo para dos resistencias **de igual valor** es la mitad del valor de una de ellas.

Resolveremos ahora el circuito de la Figura AI.6. Para ello asumimeros que:

Rc = 0,2 Ω **ri =** 0,01 Ω

Vfem = 12 V **rc1 =** 7 Ω **rc2 =** 5 Ω

El primer paso es calcular la resistencia equivalente en paralelo, **rcp**, el que permitirá considerar a todas las resistencias en serie. Este valor está dado por:

rcp = **(rc1 x rc2) / (rc1 + rc2) = 2,92** W.

Luego debemos calcular la resistencia serie total, **Rt**. Este valor está dado por:

$$\mathbf{Rt = 0{,}01 + 0{,}2 + 2{,}92 = 3{,}13}\ \mathrm{W}$$

Conocemos ahora dos valores, FEM y Rt, de manera que la ley de Ohm nos permite calcular el tercero, la corriente (**I**) en el circuito. Este valor está dado por:

$$\mathbf{I = 12 / 3{,}13 = 3{,}834\ A}$$

El voltaje entre los bornes de batería (**Vb**) está dado por:

$$\mathbf{Vb = FEM - (ri \times I) = 12 - 0{,}038 = 11{,}962\ V}$$

Como el valor de **Rc + rcp** es **menor** que el de Rc + rc del circuito anterior, el porcentaje de **ri** respecto al resto del circuito es mayor, y el voltaje **Vb** disminuye levemente respecto del anterior (Pág.8). Otra manera, quizá más directa y fácil de razonar, es considerar que al disminuír el valor de **Rt**, la corriente **I** se incrementa y, por ende, la caída interna de voltaje en la batería. Ambas maneras de razonar son útiles, ya que alertan al diseñador sobre la disminución del voltaje de batería.

Verificaremos, como ejercicio, la segunda ley de Kirchhoff. El voltaje a través de la carga está dado por:

$$\mathbf{Vc = 2{,}92 \times 3{,}834 = 11{,}195}$$

Los valores para las corrientes $\mathbf{I_1}$ e $\mathbf{I_2}$ serán, respectivamente:

$$\mathbf{I_1 = 11{,}195 / 7 = 1{,}599\ A} \quad \mathbf{e} \quad \mathbf{I_2 = 11{,}195 / 5 = 2{,}239\ A}$$

$$\mathbf{I = I_1 + I_2 = 3{,}838\ A}$$

La diferencia de valores, como antes, se debe al redondeo de cifras, de manera que hemos verificado la 2da ley de Kirchhoff. Los cálculos de los respectivos valores para las corrientes de las ramas en paralelo, muestran que el mayor valor de corriente corresponde a la rama con menor resistencia.

La Figura AI.7 muestra como disminuye el valor de la resistencia interna de un banco de acumulación, cuando se usan baterías en paralelo.

Bancos de baterías

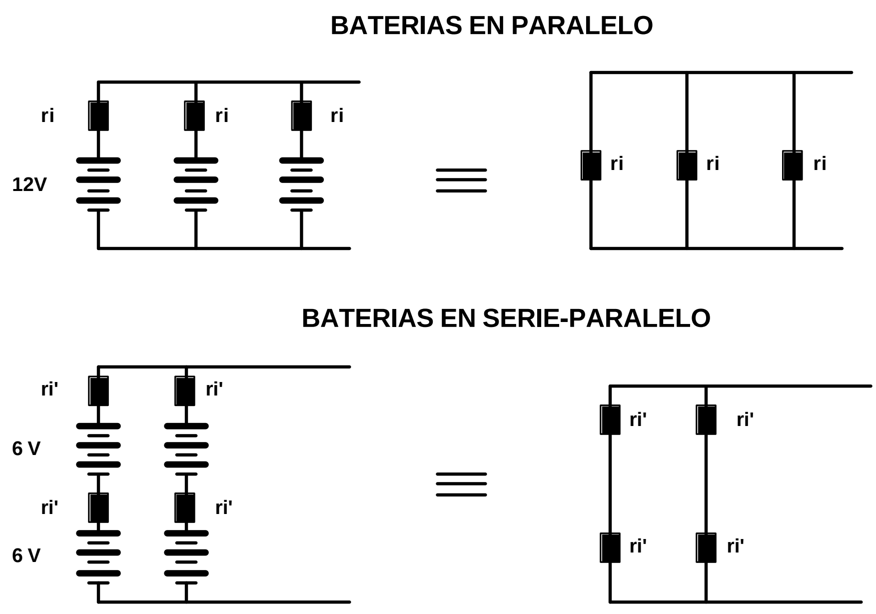


Figura AI.7- Bancos de baterías

En ambos ejemplos asumo que el sistema es de 12V y que las baterías de un grupo en particular tienen la misma resistencia interna. Como las baterías de la Figura AI.6 son ***ideales***, ninguna de ellas tiene una resistencia interna, ya que este valor está incorporado en ri. Por eso el circuito equivalente (3 rayas paralelas significan equivalente) sólo contempla el valor de ri en cada rama.

El lector puede verificar que:

- Para dos baterías la resistencia interna equivalente es igual a ri/2
- Para tres baterías este valor baja a ri/3
- Para n baterías el valor será de ri/n

Si el banco de 12 V está hecho con dos baterías de 6 V en serie en cada rama, lo único que cambia es el valor resistivo en cada rama, de manera que para tres baterías se tendrá un valor equivalente en paralelo de 2ri'/ 3. He usado ri' para indicar que la resistencia interna de la batería de 6 V no es necesariamente igual a la de 12 V.

El valor de potencia (generada, disipada o consumida) está dado, en cada instante, por el producto del voltaje por la corriente. Si el consumo es el de la carga se usan los valores correspondientes a la misma. Si se considera la potencia generada, deberá considerarse el voltaje a la salida del generador equivalente. Se tiene, en general, que la potencia eléctrica en un dado instante está dada por:

$$\mathbf{W = V \cdot I} \qquad \mathbf{(1.11)}$$

Si se reemplaza el valor del voltaje o el de la corriente (ley de Ohm), se obtienen otras expresiones para la potencia.

$$\mathbf{W = R \cdot I^2 = V^2 / R} \qquad \mathbf{(1.12)}$$

Como en el caso de la ley de Ohm, dependiendo de las variables (parámetros) que se conozcan, se usará una u otra expresión. La unidad para la potencia es el **Watt**, el que se abrevia con la letra **W**. El valor de la potencia entregada por la batería al circuito de la Figura AI.6 está dado por:

$$\mathbf{W = Vb \times I = 11{,}962 \times 3{,}834 = 45{,}86\ W}$$

La potencia disipada en los cables está dada por:

$$\mathbf{Wdis = 0{,}2 \times (3{,}834)^2 = 0{,}2 \times 14{,}70 = 2{,}94\ W}$$

La potencia disipada en los cables representa el 6,4 % de la potencia entregada al circuito. En la práctica el cable se elige para ***no sobrepasar*** el 4 % de la potencia generada (aprox.1,8 W en nuestro ejemplo). La ley de conservación de la energía dicta que **la potencia generada debe igualar a la consumida**. Basados en esta ley física, la carga consume:

$$\mathbf{Wc = W - Wdis = 45{,}86 - 2{,}94 = 42{,}92\ W}$$

o, asimismo:

$$\mathbf{Rp \cdot I^2 = 2{,}92 \times (3{,}834)^2 = 42{,}92\ W}$$

La dispación de energía dentro de la batería está dada por:

$$\mathbf{ri \cdot I^2 = 0{,}01 \times 14{,}7 = 0{,}15\ W}$$

Nota: *Un problema práctico se presenta cuando queremos usar una resistencia de la que conocemos su valor y capacidad de disipación, es determinar el valor de la máxima corriente que puede tolerar. La expresión 1.12 puede resolverse para la corriente **I**. Su valor está dado por:*

$$I = \sqrt[2]{W \cdot R}$$

Energía eléctrica

Por definición, el valor de la energía generada o consumida está dado por:

$$\mathbf{E = W \cdot t} \qquad \mathbf{(1.13)}$$

donde **t** es el tiempo transcurrido. Es fácil comprender que la energía resulte medida en Watts.hrs, o **Wh.** Vemos ahora el vínculo entre energía y potencia y porqué en el párrafo anterior se infiere que en todo instante la potencia generada debe igualar a la consumida. En el Apéndice III se dan otras unidades para la energía y la potencia, así como su relación cuantitativa.

Las Figuras AI- 8 a) y b) muestran dos voltajes de CC pulsantes. En ambos el voltaje máximo de los pulsos (**V1**), y la duración del período de repetición (**T**), es el mismo. El valor de T dá el tiempo de repetición del voltaje. La inversa de este valor **1 / T** representa la frecuencia de repetición, la que, en este ejemplo, es de **un ciclo por segundo**.

Nota: *Observe el lector que puede hablarse de frecuencia aún en un circuito de CC.*

Ambos voltajes se caracterizan por tener un período de no-conducción (**NC**) y otro de conducción (**C**), ya que ésta es la característica esencial de un voltaje pulsante.

La diferencia entre los dos voltajes ilustrados es la duración del **tiempo de conducción** del pulso. La relación t_C / T se llama, en inglés, ***duty cycle*** (ciclo activo), y la abreviaremos con las letras **CA**. Como la unidad es la misma para el numerador y denominador, el CA resulta ser una fracción, ya que T >tc. A veces este valor está dado en forma porcentual, el que se tiene multiplicando el valor fraccional por 100.

Circuitos de CC pulsantes

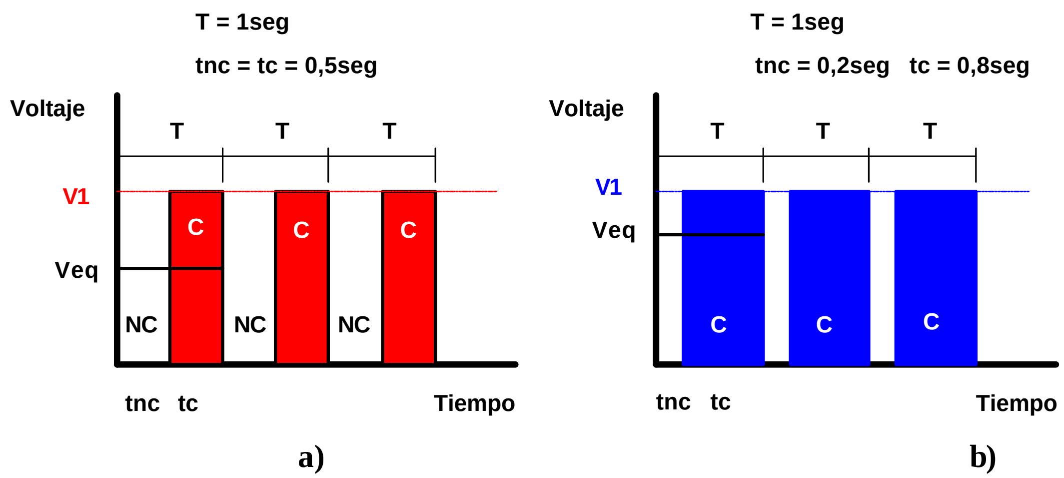


Figura AI. 8- Voltajes pulsantes con diferente *ciclo activo*

Para el primer voltaje, el valor del **CA** (***duty cycle***) es 0,5. Para el segundo es 0,8. El valor de CA es importante porque permite calcular,en ambos casos, el **voltaje equivalente** durante el período T, el que está dado por:

$$Veq = CA \cdot V1 \tag{1.14}$$

Para el primer circuito este valor es 0,5 V1; para el segundo, 0,8 V1. El voltaje equivalente (**Veq**) representa el valor de voltaje **constante** que, conduciendo durante todo el período T, se comporta de la misma forma que el pulso activo. Esto nos permite reducir un circuito pulsante a un circuito de CC de voltaje constante durante el período T, lo que facilita enormemente los cálculos.

Extrapolación

El concepto de CA se aplica tanto a pulsos de voltaje como de corriente, de manera que si un voltaje pulsante alimenta a una carga resistiva, establecerá en el mismo una corriente pulsante de igual CA. La potencia disipada en esa carga tendrá un valor **equivalente constante** durante el período T que está dado por:

$$Wcarga = Veq \cdot Ieq = V^2eq / Rcarga = I^2eq \cdot Rcarga \tag{1.15}$$

La variación de la potencia consumida es, asimismo, un fenómeno pulsante con el mismo valor para el ciclo activo (CA).

Controles de carga

Para que el **Veq** se haga cada vez **menor** se hace necesario **reducir** el valor del **CA**, lo que implica que el **tiempo de conducción debe disminuír** (período de repetición constante).

Este es el principio usado en los controles de carga para variar el voltaje efectivo que sostiene la corriente de carga. Como la disminución es dinámica, ya que responde al valor del voltaje de batería, se tiene una variación (modulación) de su ancho, y por eso se llaman ***PWM*** (modulación de ancho de pulso).**Conección a tierra**

Conección a tierra

La teoría de circuitos muestra que **sólo puede definirse una diferencia de voltaje**. Este concepto es muy importante porque cualquier punto en un circuito, digamos el negativo de batería, sólo puede definirse en relación con otro voltaje, pero no en forma absoluta.

Es por ello que se adopta el concepto de conección a tierra, o simplemente **tierra** (***ground***, en inglés) al que se le asigna el potencial cero (0 V). La lógica para esta elección es que la superficie de la tierra es lo suficientemente grande como para asumir que la densidad de carga (cargas/m^2) es muy baja.

De lo expresado, se deduce que si un punto, y **solamente un punto**, del circuito es conectado a tierra, el circuito no se altera, ya que lo único que hemos hecho es establecer una referencia de voltaje (0 V) la que permite evaluar todos los voltajes. Por simplicidad, el punto a tierra elegido es el negativo del circuito.

El lector podría preguntarse porqué he enfazado que solamente un punto debe conectarse a tierra. La respuesta es que si hay dos (o más) se establecen circuitos cerrados entre una tierra y la otra. La Figura AI.9 muestra un simple circuito de CC, con dos conecciones a tierra, las que se simbolizan de distinta manera para evidenciar que puede haber diferencias entre los dos puntos conectados a tierra. No olvidemos que ***la tierra es un conductor*** y que, por lo tanto, dependiendo de la conductividad del terreno puede ser representada por un valor resistivo **(RT)**.

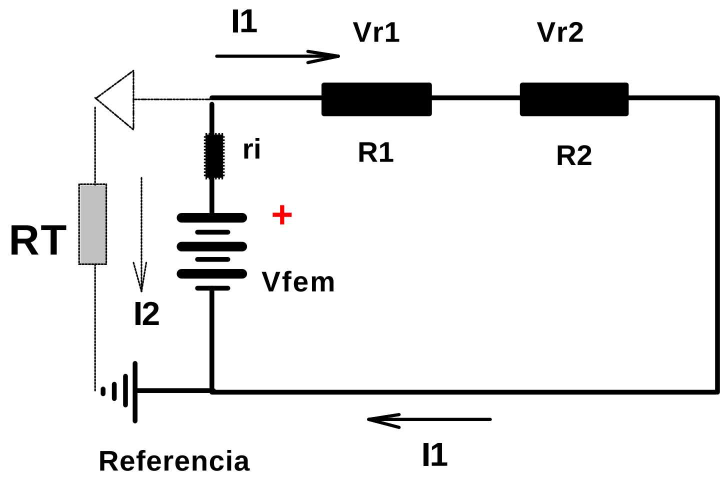


Figura AI.9- Dos tierras en un circuito

Al incorporarse la segunda tierra se establece un circuito cerrado, en paralelo con el existente, donde el valor de la corriente ($\mathbf{I_2}$) dependerá del valor de RT. La caída de voltaje en ri se incrementará debido a la presencia de $\mathbf{I_2}$, alterando el valor del potencial de salida de batería.

Doble pulsación

La luminosidad de una luz parpadeante de prevención o guía, puede hacerse más llamativa si se incrementa, brevemente, la intensidad de la misma durante el período activo. Esta técnica se usa en boyas marinas y luces de alerta, pero puede ser extendida a un cartel luminoso en una carretera.

Tomemos la boya marina como ejemplo. Asumamos que la boya permanece 3 segundos apagada y un segundo prendida. El período **T** de repetición es de 4 segundos. Un cuarto de segundo después de encenderse la luz, la potencia entregada a la carga, durante 0,4 seg, crece un 15%.

La variación de potencia descripta está ilustrada en la Figura AI.10. Como hay dos pulsos en este ejemplo, existe una doble pulsación durante el período T de repetición.

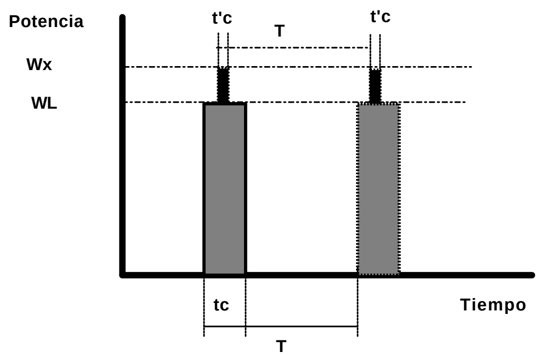


Figura AI.10- Doble pulsación

Resumiendo, en nuestro ejemplo:

tc = 1 seg; **t'c =** 0,4 seg, **T =** 4 seg, **WL** = 20 W, **Wx** = 3 W

Donde **tc** es el tiempo activo de la lámpara con iluminación normal, **t'c** el tiempo activo del brillo más intenso, **T** el período de repetición del fenómeno, **WL** la potencia requerida para emitir normalmente y **Wx** la potencia extra sumistrada al foco (15% de 20W).

El período de repetición es el mismo para los dos valores pulsantes, ya que ocurren con una diferencia de 0,25 seg entre los dos.

Energía requerida

El problema es calcular la energía que la batería debe entregar diariamente, si la boya permanence activa un máximo de 13 hrs por noche.

La potencia equivalente por ciclo para la iluminación normal, dado que el CA es de 0,25 (1 / 4) resulta ser de 5 W. Para el segundo pulso el valor de CA es 0,1 (0,4 / 4), de manera que la potencia equivalente entregada durante T es de 23 x 0,1 o 2,3 W. La potencia equivalente total, por ciclo, es la suma de ambas, o:

5 + 2,3 = 7,3 W / c

La energía en Wh entregada en 4 segundos (4 / 3.600 de hora) resulta ser el producto de la potencia equivalente total durante esa fracción de hora. Es decir:

7,3 W x (4 /3.600) hr = 0,00811 Wh

En cada hora se generan 900 pulsos (3.600/4), y en las 13hrs:

13 x 900 = 11.700 pulsos

La energía que debe entregar la batería es, entonces de:

11.700 x 0,00811 Wh = 94,9 Wh