

Teoría de Circuitos 1

Divertidas notas de clase
Métodos Sistemáticos de Resolución de Circuitos (I)

Diego Sebastián Sica
@SicaTc1
Versión 1.0

Apreciadas/os alumnas/os: El objetivo primordial de este documento, derivado de las notas de clases, es acercarles material que los refiriese a los temas desarrollados durante nuestros encuentros. Está preparado con un enfoque basado en el alumno y realizado con mucha pasión, y si bien espero que lo consulten, los aliento fuertemente a que no dejen de leer la bibliografía. Destaco que las figuras y citas que eventualmente fueran empleadas tienen el único propósito de conformar el presente escrito y no pretenden obtener ningún beneficio adicional que pudiera afectar los derechos de los autores, a quienes se reconocen como fuente. Lejos del idealismo de la perfección, aceptaré agradecido sus sugerencias.

Métodos sistemáticos de resolución de circuitos

1. Introducción.

Hace tiempo que sabemos cómo resolver circuitos (es decir, poder determinar las variables que necesitemos) mediante la aplicación de las leyes de Kirchhoff y Ohm. Para ello, debíamos desplegar un arsenal de ecuaciones ordenadas, y sobre todo, tener mucho cuidado con los sentidos de referencia asignados. Para llegar a los valores finales había que despejar variables y hacer reemplazos, con cierto esfuerzo intelectual para determinar el camino más corto y de menor probabilidad de error.

Les voy a presentar ahora dos métodos, que si bien derivan de las mismas leyes fundamentales, nos ahorrarán energía y tiempo para que podamos usar nuestros recursos en cosas más importantes que preocuparnos por no equivocarnos en un despeje o en si un sentido es correcto. Estos dos métodos, nos permitirán conocer las variables que nos interesen, arribando a los resultados de una forma sistemática. Para ellos, nos enfocaremos en tres objetivos:

- Acordar cuál es nuestro punto de partida.
- Presentar los métodos de una forma más o menos directa para que podamos aplicarlos operativamente.
- Profundizar la arista conceptual.

Vamos que venimos!

2. Consideraciones previas.

Para el mayor aprovechamiento de lo que vendrá, tenemos que tener un buen manejo de las siguientes herramientas y conceptos:

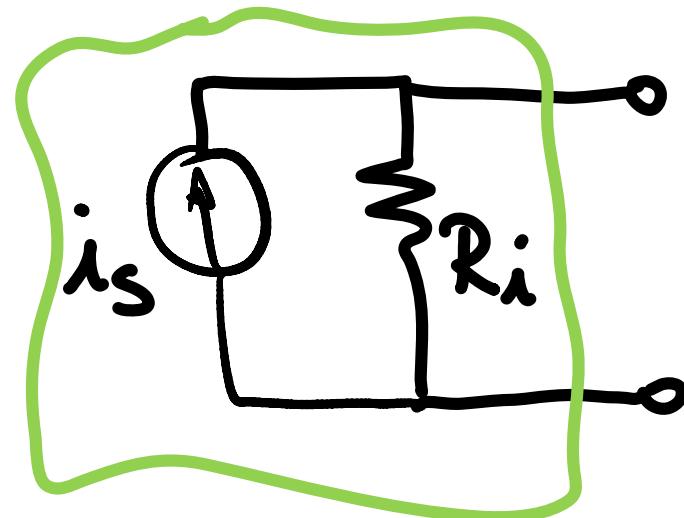
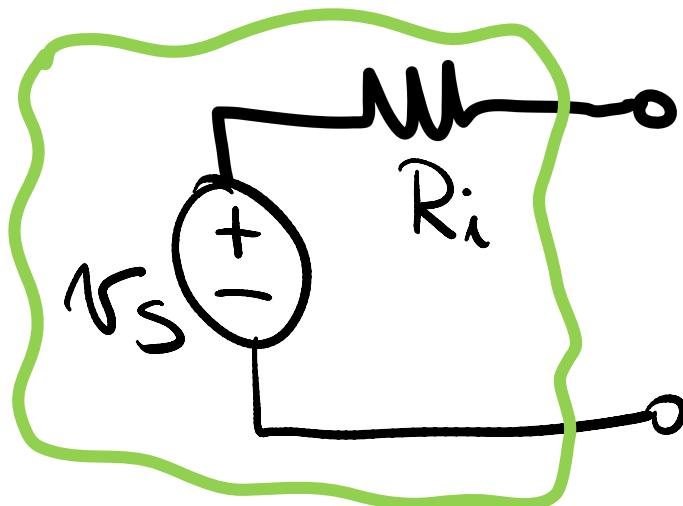
- Leyes de Kirchhoff.
- Ley de Ohm.
- Interpretación de los conceptos relacionados con sistemas lineales.
- Buen dominio de componentes pasivos (resistores, capacitores e inductores) y elementos activos (por ahora fuentes de tensión y de corriente, ya sea independientes o controladas; si sin controladas asumiremos que la relación de control es lineal)

De todos estos puntos, importantes ellos por cierto, creo que sobre el que más tenemos que hacer hincapié explícito es en el tratamiento de fuentes de energía, ya que los otros temas los asumimos conocidos y los profundizaremos de acuerdo a las necesidades.

2.1. Fuentes no ideales.

Una fuente de energía, ya sea de tensión o de corriente, se considera ideal cuando se asume que no hay disipación asociada a ella. Podemos definir una fuente no ideal en términos de alguna disipación interna que tiene lugar dentro de la misma, asociada a algún proceso energético no reversible. Dicho de otra forma: de toda la energía que es capaz de proveer la fuente, cierta parte no es aprovechada por la carga.

Para modelizar esta situación, en principio introduciremos elementos disipativos (resistencias) en la representación circuital de una fuente de tensión o de corriente no ideal:

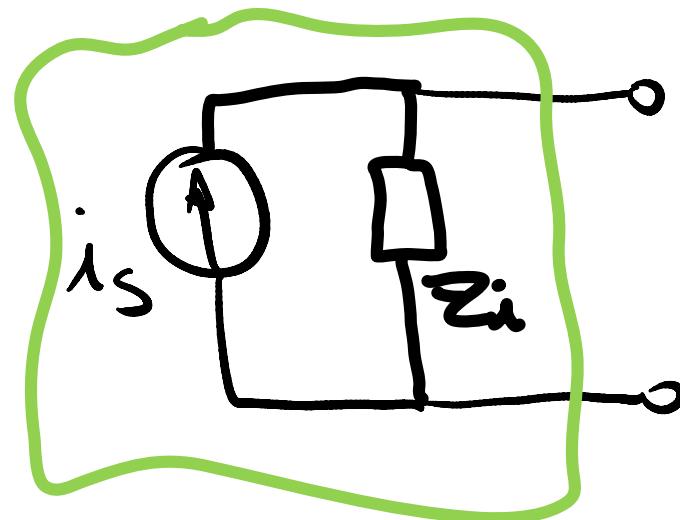
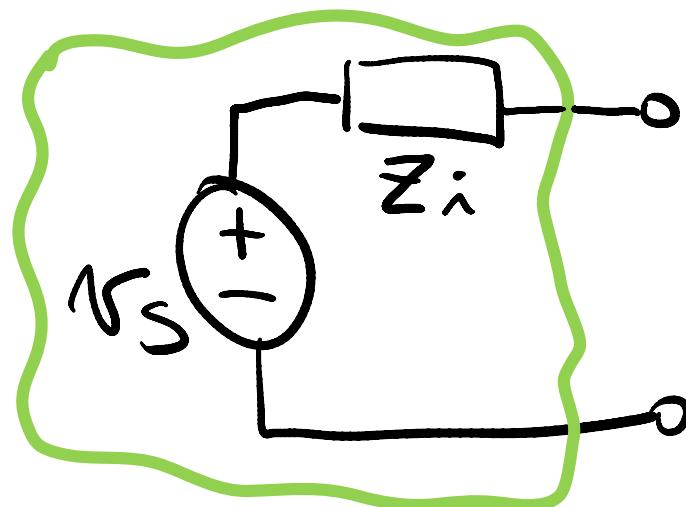


Para el caso de la fuente de tensión, se espera que mientras más ideal sea la fuente, más bajo sea el valor de R_i (para una fuente ideal, la resistencia interna R_i es igual a cero). Para el caso de una fuente de corriente, mientras más se acerque al ideal, mayor será el valor de R_i (en el caso límite, R_i debería ser infinita).

Expresado en otros términos: para una fuente de tensión ideal, toda la diferencia de potencial se aplicará directamente sobre la carga. Si esto no ocurriera, es porque parte de esta diferencia de potencial cae en algún elemento interno, que podría representarse como una resistencia en

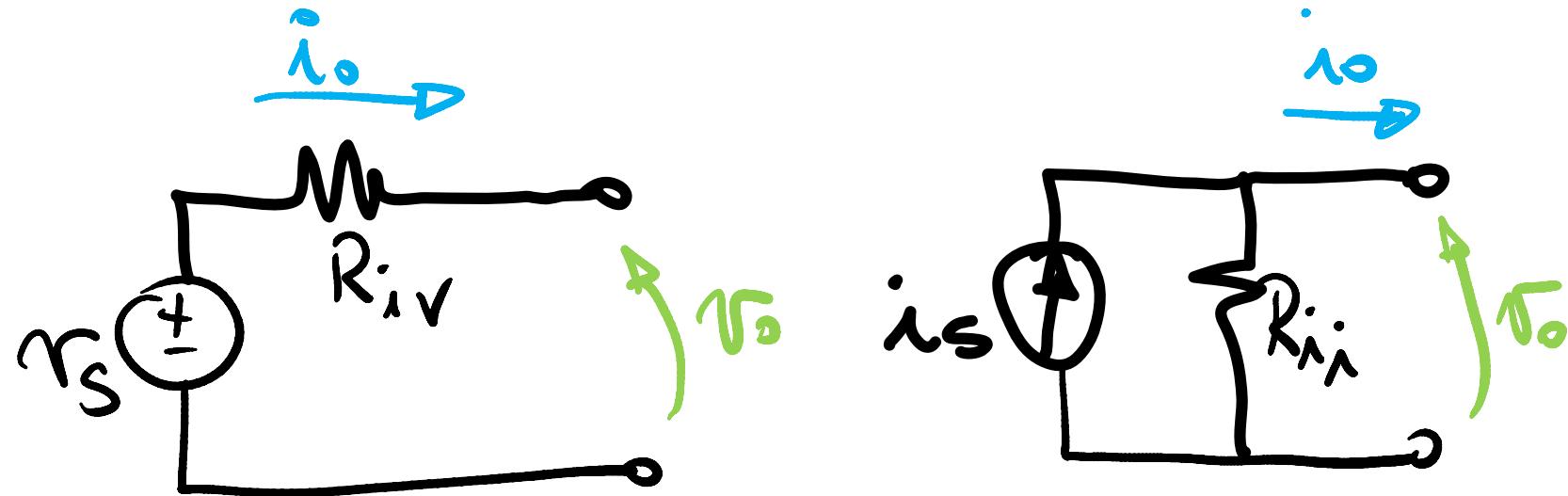
serie (piénselo en términos de un divisor de tensión). Para una fuente de corriente ideal, toda la corriente debería ser dirigida hacia la carga. Si esto no ocurriera, es porque parte de esa corriente se deriva por algún otro elemento, que sería una resistencia en paralelo (piénselo como un divisor de corriente).

Notemos que pensado de esta manera, podemos alejarnos un poco de la idea de que la no idealidad de una fuente se asocia exclusivamente a un proceso no reversible, y asumir que podemos representar el mismo efecto de una manera más amplia en términos de una impedancia.



Pido vuestro permiso para una aclaración: La "idealidad" de una fuente no debería ser juzgada en términos absolutos, porque por lo general también depende de las características del circuito que aproveche su energía (la carga). Por ejemplo, un podría horrorizarse porque una fuente de tensión tiene una resistencia interna de 100Ω (claramente dista mucho de tender a cero). Pero qué tal si esta fuente alimentara un circuito cuya impedancia de entrada equivalente fuera $1 M\Omega$? En este caso se podría considerar que esta fuente es ideal si estamos dispuestos/as a aceptar que el 99.990001 % de la tensión aplicada va destinada a la carga.

Obviamente para circuitos reales, sabremos bien con qué tipo de fuente estamos proporcionando la energía. Pero en el apasionante mundo del estudio de los circuitos, podemos recurrir a cualquiera de las dos representaciones según nuestra conveniencia, obviamente con algunos ajustes que nos permita lograr la tan ansiada equivalencia. Esta equivalencia es fácil de ver si pensamos en:



y en sus ecuaciones:

$$v_0(t) = v_s(t) - i_0(t)R_{iv}$$

$$v_0(t) = [i_s(t) - i_0(t)]R_{ii}$$

Así, nos daremos cuenta que ambas representaciones son equivalentes si:

$$v_s(t) = R_{ii}i_s(t)$$

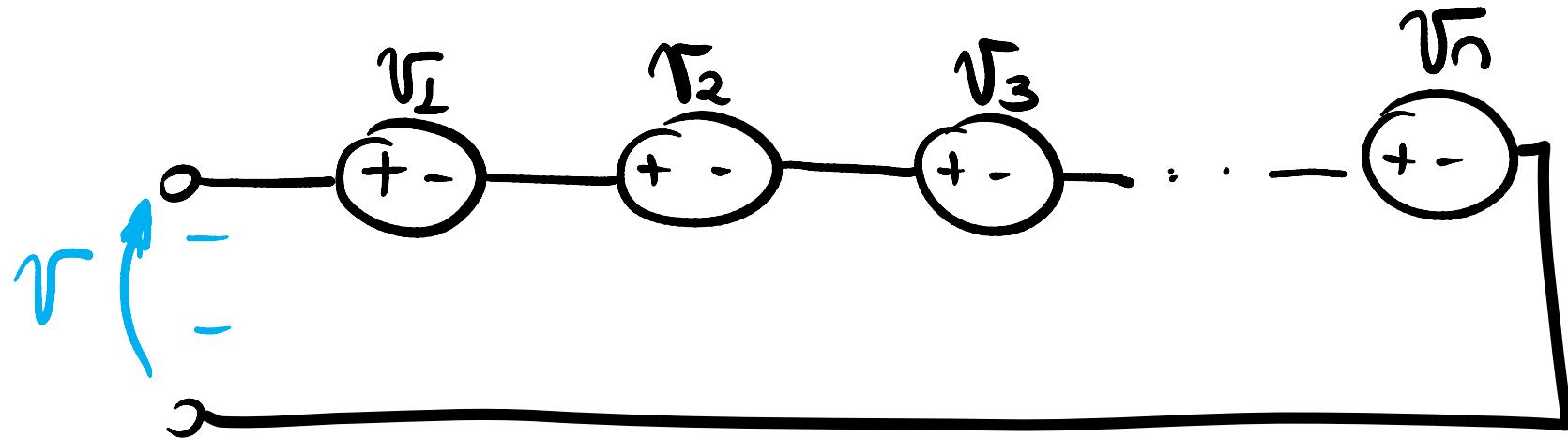
y

$$R_{ii} = R_{iv}$$

La equivalencia en definitiva significa que el circuito de carga equivalente estará sometido a las mismas condiciones para sus variables de tensión y de corriente¹, independientemente de la representación que utilicemos.

2.2. Relaciones entre fuentes.

No nos será difícil interpretar la conexión en serie de fuentes de tensión:



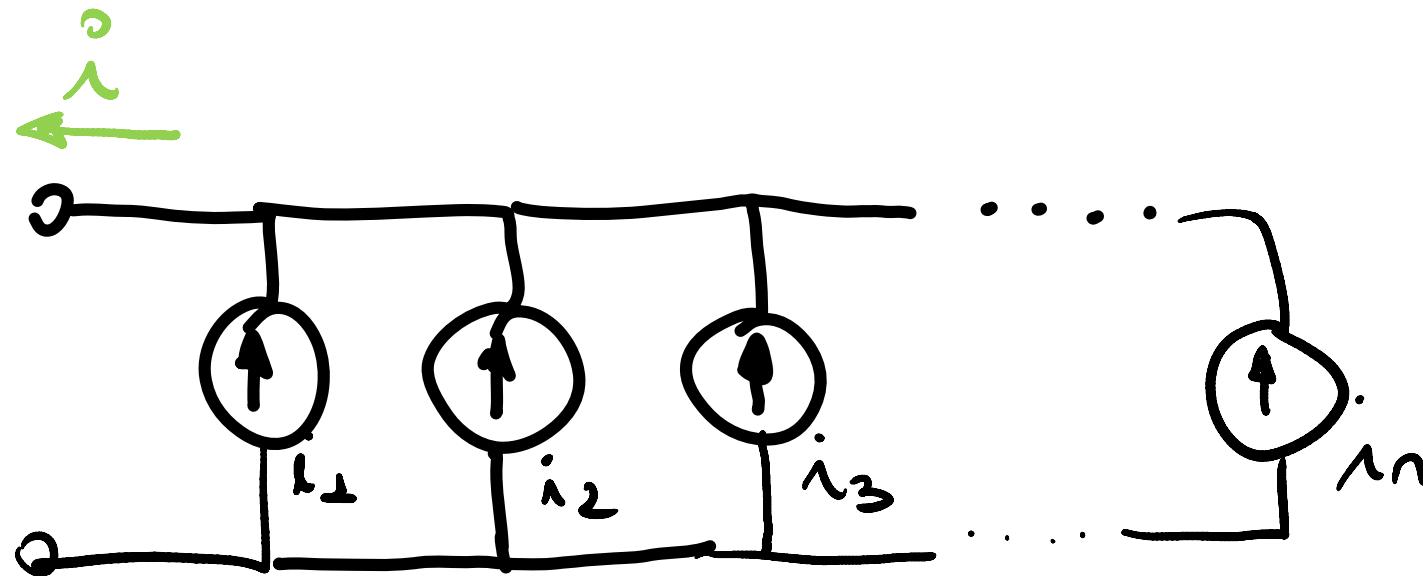
¹ No se dará cuenta si está alimentado por un modelo de fuente de tensión o de corriente, o seguirá sintiendo lo mismo. Me parece o estamos humanizando los circuitos?!

El equivalente constará de una fuente de tensión con una impedancia interna en serie (en caso que las fuentes no sean ideales) dadas por:

$$v(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t)$$

$$Z_{it} = \sum_{i=1}^n z_i$$

La conexión de fuentes de corriente en paralelo también es fácil de interpretar:



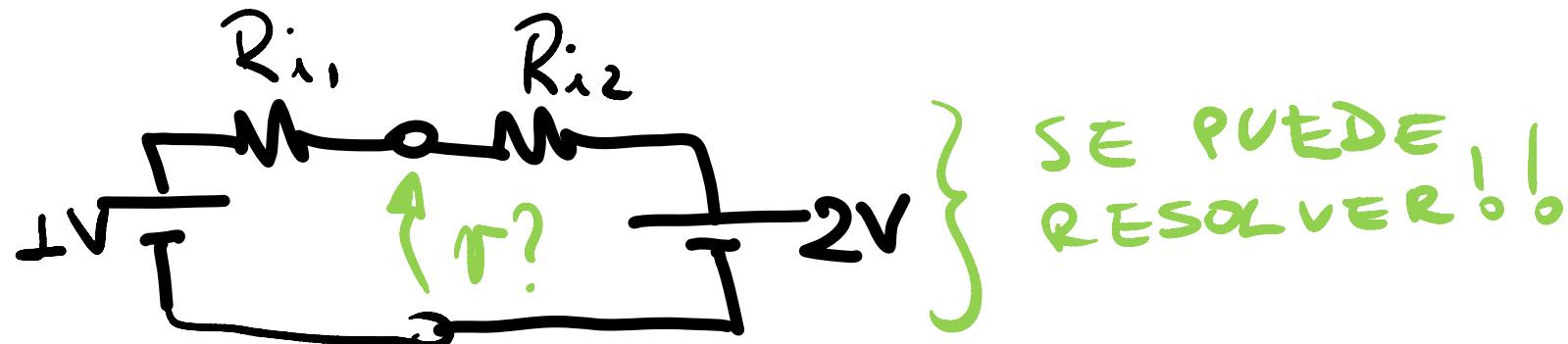
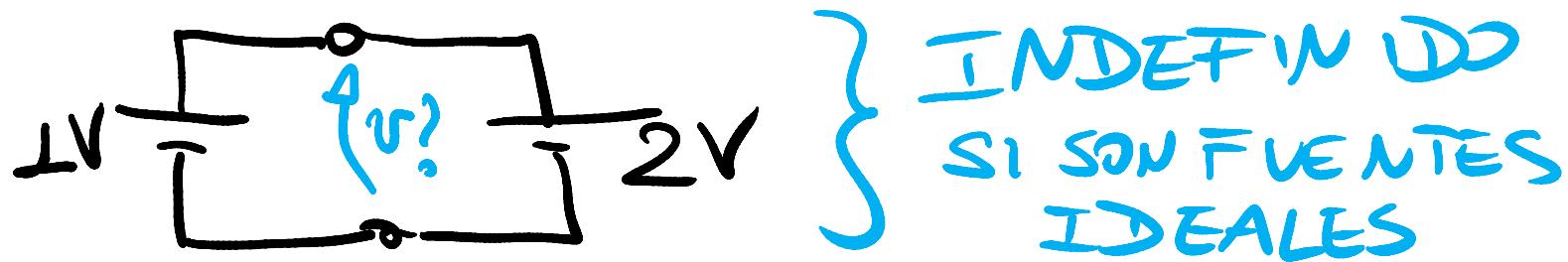
El equivalente constará de una fuente de corriente con una impedancia interna en paralelo (en caso que las fuentes no sean ideales) dadas por:

$$i(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t)$$

$$Z_{it} = z_1 // z_2 // \dots // z_n$$

Veamos un caso más escabroso: qué pasaría si ponemos en paralelo dos fuentes de tensión de distintos valores? Si fueran ideales, no podríamos responder el interrogante porque la situación no quedaría definida porque cada fuente trataría de imponer su diferencia de potencial. Por más que discutan y discutan, las fuentes no se pondrán de acuerdo.

Pero en el mundo real nadie nos podría impedir hacer el experimento! Cómo podríamos pensar el problema? Quién nos va a salvar de esta indefinición? Síiiiii! Tendremos que asumir que las fuentes no son ideales, y las impedancias internas serán las mediadoras que nos permitirán resolver el problema.



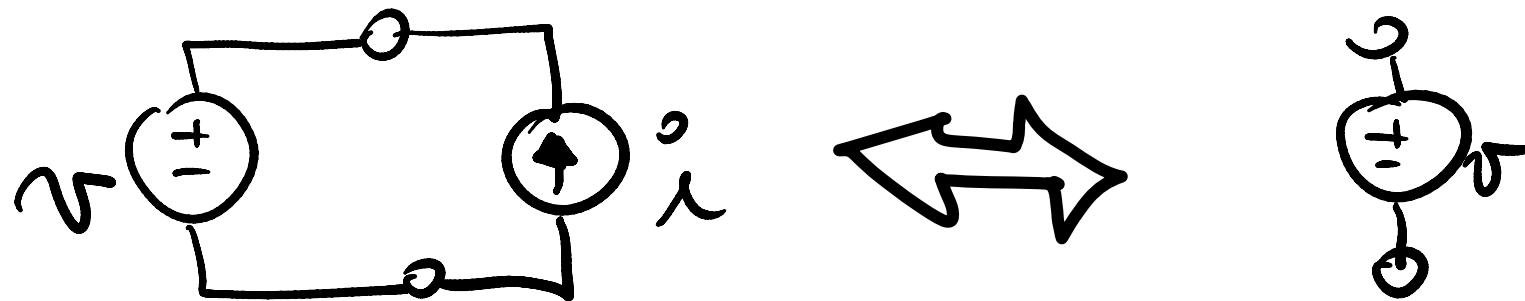
Es claro que una fuente le entregará energía a la otra, pero esto no quiere decir que le proporcionará energía útil en el sentido que una fuente cargará a la otra, sino más bien que habrá un flujo de energía de una a otra.

En analogía, podemos pensar el caso en el que se desee conectar dos fuentes de corriente en serie. Cada una intentará imponerle su corriente a la otra, pero no podrán lograr un acuerdo, a menos que se consideren las impedancias internas para hallar una solución al problema.

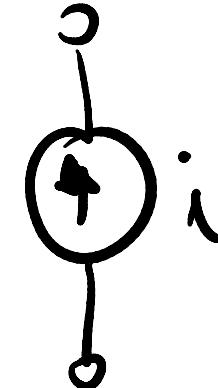
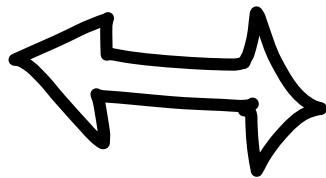
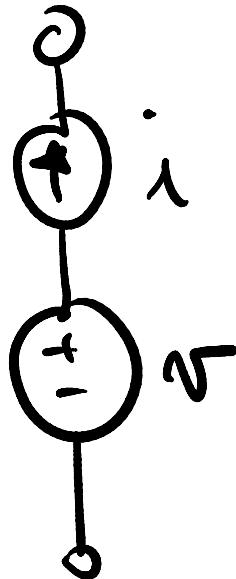
Para ambos casos, en palabras simples: si las fuentes fueran ideales, cada una trataría de imponer su voluntad y el problema no podría resolverse a menos que consideremos la existencia de impedancias internas para que medien en el conflicto.

Así y todo, a veces se pueden encontrar esquemas en los que se dispone de fuentes de tensión del mismo valor en paralelo o de fuentes de corriente del mismo valor en serie. Por qué? En términos, reales, estas estrategias pueden permitirnos disponer de más energía. En términos teóricos, como veremos más adelante, será un método auxiliar.

Y si ahora pensamos en conectar una fuente de tensión en paralelo con una fuente de corriente? O una fuente de corriente en serie con una fuente de tensión? Pero nos estamos volviendo locos/as? Explota el universo? Para pensar estas cosas, volcamos a las bases. Qué hace una fuente de tensión? Lo que sea (es decir, entrega la corriente necesaria) para poder sostener la diferencia de potencial entre sus terminales. Y qué hace una fuente de corriente? Lo que sea (es decir, acomoda la diferencia de potencial entre sus bornes) para mantener su corriente². Con esto en mente, se verificará:



² Un comentario mínimo. Es posible que alguna vez lean o escuchen que una Fuente de tensión es aquella fuente que mantiene su voltaje constante. Cuando se dice constante, no se quiere significar que su valor es una constante (por ejemplo 2 V), sino que mantiene su patrón de variación. Por ejemplo, si la fuente es senoidal, que se mantenga constante significa que seguirá siendo senoidal con la misma amplitud (asumimos que el sistema es lineal y no debería haber cambios en su frecuencia). Vale la misma aclaración para fuentes de corriente.



Se les ocurre entonces cómo podemos justificar estas equivalencias? La fuente de corriente modificará la tensión entre sus terminales para poder mantener su corriente, así que no tendrá ningún problema en adaptarla al valor de la fuente de tensión. Del mismo modo, la fuente de tensión negociará su corriente y estará perfectamente de acuerdo en ajustarla al valor que impone la fuente de corriente. Alguien siempre tiene que ceder ☺.

Antes de finalizar esta sección, les cuento el secreto de por qué tanta dedicación a las fuentes de tensión y de corriente. Resulta ser que podemos aplicar métodos bastante sencillos para resolver circuitos que tengan solamente fuentes de tensión, o solamente fuentes de corriente. Entonces, cuando nos enfrentemos a circuitos que tengan los dos tipos, muy probablemente recurramos a algunas de las herramientas que acabamos de comentar.

2.3. Redes lineales.

Los sistemas lineales son aquellos en los que podemos aplicar el principio de superposición. Desde pequeños tenemos la noción de sistema línea: Cuando aplicábamos la regla de tres simple en el cole, sin saberlo, estábamos bajo el paraguas de los sistemas lineales.

Los sistemas pueden ser lineales, pero por eso no debemos tener insomnio, porque bajo ciertas condiciones pueden linealizarse. Un ejemplo de este procedimiento es el que nos permite trabajar con el modelo de pequeña señal de un TBJ, el cual como se habrán dado cuenta, está compuesto por elementos lineales (eso lo ven en Aplicada 1 no?).

Volviendo al tema que nos ocupa, les recordaré/presentaré tres propiedades de un circuito lineal:

- a. El valor de cualquier variable del circuito puede calcularse como la suma de los valores de dicha variable producidos por cada una de las fuentes de excitación **independientes** actuando separadamente. Insisto: en este proceso intervienen solamente las fuentes **independientes**. Lo que digo es que para conocer una variable, podemos calcular su valor sumando los valores obtenidos cuando se pasivan todos los generadores independientes menos uno, repitiendo el proceso para cada uno de ellos. Noten que **no** deben pasivarse los generadores dependientes.
- b. Si se pasivan todas las fuentes **independientes** menos una, entonces si multiplicamos por una constante el valor de dicha fuente, entonces los valores de todas las variables también se multiplicarán por la misma constante.
- c. Si los valores de todas las fuentes **independientes** se multiplican por la misma constante, entonces los valores de todas las variables del circuito también se multiplicarán por la misma constante. Atención! Todas las fuentes **independientes** deben multiplicarse por la misma constante.

En definitiva, mirándolo con los anteojos del álgebra, lo que estamos diciendo es que el circuito puede representarse por un sistema matricial. Viva la regla de Cramer! Viva el determinante!

3. Métodos sistemáticos de resolución de circuitos.

Bueno, hemos llegado a lo que es el núcleo de lo que tenemos que aprender. Voy a presentarles ahora dos métodos sistemáticos para la resolución de circuitos, obviamente lineales o linealizados. Debo aclararles que estos métodos no son los únicos, y que no tienen por qué aplicarse siempre. Son solamente herramientas que tendremos al alcance de la mano para que tomemos la decisión que nuestro criterio nos indique. En ocasiones, deberemos hacer algunas transformaciones para poder aplicarlos, y si el costo de las mismas es muy elevado, tal vez nos convenga evaluar la conveniencia de aplicarlos. En última instancia, siempre se puede volver al primer amor: Kirchhoff y Ohm.

3.1. Método de resolución sistemático por nodos.

Sea que tengamos un circuito compuesto por impedancias y fuentes de corriente (independientes y controladas). Asumamos que no hay fuentes de tensión presentes en el circuito. Podremos identificar entonces un nodo de referencia, y digamos n nodos adicionales.

Si aplicamos la ley de Kirchhoff de corriente, obtendremos un sistema de n ecuaciones con n incógnitas (un sistema matricial). Las incógnitas serán, naturalmente, las tensiones en los n nodos, puesto que las impedancias son conocidas, los valores de las fuentes de corriente independientes también, y en el caso de haberlas, las constantes de proporcionalidad de las fuentes controladas serán dato. El sistema de ecuaciones que resulte, con seguridad tendrá la forma:

$$\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ \vdots \\ i_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_n(t) \end{bmatrix}$$

VECTORE I →
 VECTOR V →
 MATRIZ Y

debido a que como dijimos, estamos en presencia de un sistema lineal. En este caso presentamos las ecuaciones en el dominio del tiempo, pero obviamente estos comentarios valen para el dominio transformado:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Una pregunta interesante es cómo estará compuesta la matriz Y . La respuesta es que tendrá unidades de Siemens, y que dependerá de los sentidos de referencia elegidos para aplicar la ley de corriente de Kirchhoff. Pero si seguimos algunas “reglitas”, es decir, sistematizamos e

métodos, podremos garantizar ciertas características de la matriz Y . Lo que les propongo es: pongámonos todos/as de acuerdo, así la matriz Y comparte características comunes para todos/as. De esta manera, no tendremos que preocuparnos en no equivocarnos en los signos y unidades, sino más bien en seguir la receta, resolver el sistema matricial, y verificar los resultados por si metemos la pata en la resolución. Siempre hay que verificar!

Sabiendo que podemos escribir un conjunto de ecuaciones y expresarlas de manera matricial, definiendo un conjunto de tensiones de nodos con sus referencias de polaridad ubicada en un nodo común, la receta para determinar los elementos de la composición matricial es:

- I. $i_i(t)$ o I_i : La suma algebraica (es decir, con signos) de todas las fuentes de corriente (independientes y controladas) que están conectadas al nodo i . Aquellas fuentes que tienen una dirección de referencia positiva ingresando al nodo en cuestión, se toman como positivas, mientras que las que tienen sentido de referencia positivo saliente del nodo se toman como negativas.
- II. y_{ij} o Y_{ij} ($i = j$): la suma de todas las admitancias conectadas al nodo i . Como $i = j$, lo que estamos diciendo es que los elementos de la diagonal de la matriz son tomados como positivos³.
- III. y_{ij} o Y_{ij} ($i \neq j$): el negativo⁴ de la suma de todas las admitancias conectadas entre el nodo i y el nodo j . Noten que no se hace distinción entre y_{ij} (Y_{ij}) y y_{ji} (Y_{ji}), de donde se deduce que la matriz será simétrica respecto a su diagonal.
- IV. $v_i(t)$ o V_i : Las variables de tensiones de nodo para cada nodo i , que serán obtenidas a través de la resolución del sistema. Son las incógnitas!
- V. Tema fuentes controladas: Luego de expresar las fuentes controladas en términos de las tensiones de nodo, se incluyen “convenientemente” en la matriz admittance.

3.2. Método de resolución sistemático por mallas.

Sea ahora que tenemos un circuito compuesto por impedancias y fuentes de tensión (independientes y controladas). Asumamos que no hay fuentes de corriente presentes en el circuito.

³ Un detalle: Los números complejos no son positivos o negativos. Las que son positivas o negativas son sus partes real e imaginaria.

⁴ Idem nota 3.

⁵ Cómo odiaba cuando me decían “convenientemente” sin mostrarme cómo! Dado que por el momento fuentes controladas no forma parte del los temas de TC1, lo dejo como un tema para discutir en clase.

Podemos identificar entonces, digamos n mallas. Si aplicamos la ley de tensión de Kirchhoff, obtendremos un sistema de n ecuaciones con n incógnitas. Las incógnitas serán obviamente las corrientes de malla, puesto que las impedancias son conocidas, los valores de las fuentes independientes de tensión también, y en el caso de haberlas, las constantes de proporcionalidad de las fuentes controladas serán dato.

El sistema de ecuaciones que resulte de aplicar la ley de tensiones de Kirchhoff tendrá con seguridad la siguiente pinta (es un sistema lineal!)

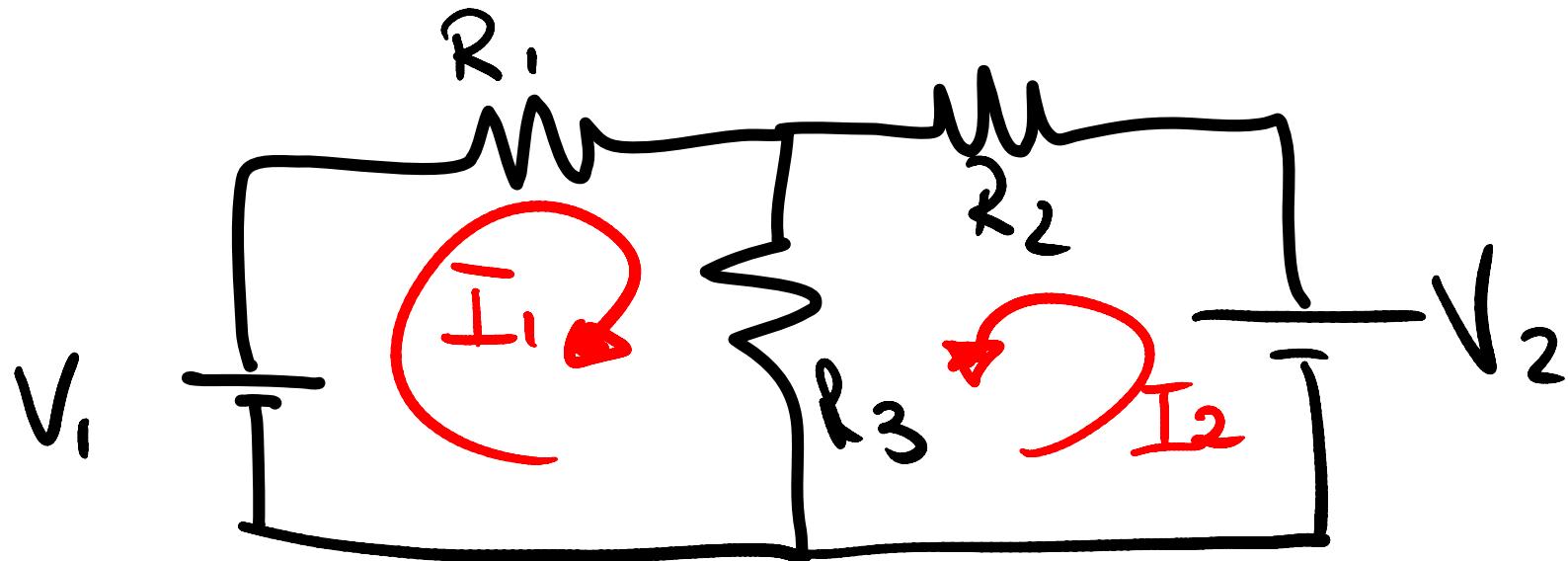
$$\begin{array}{ccc} \text{VECTOR DE} & & \text{VECTOR DE} \\ \text{TENSIONES} & \xrightarrow{\quad} & \text{CORRIENTES} \\ & & \text{MATRIZ DE} \\ & & \text{IMPEDANCIA} \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ \vdots \\ i_n(t) \end{bmatrix}$$

En este caso presentamos las ecuaciones en el dominio del tiempo, pero obviamente estos comentarios valen para el dominio transformado:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

De nuevo, una pregunta piola es cómo estará compuesta la matriz de impedancias. La respuesta obvia es que tendrá unidades de ohm, y que dependerá de los sentidos de referencia elegidos. Miren el siguiente ejemplo con resistencias y fuentes de tensión de corriente continua.



Con los sentidos de corrientes tal y como fueron elegidos, quedará:

$$V_1 - I_1 R_1 - (I_1 + I_2) R_3 = 0$$

$$(I_1 + I_2) R_3 + I_2 R_2 - V_2 = 0$$

Ordenando:

$$V_1 = I_1 R_1 + I_1 R_3 + I_2 R_3$$

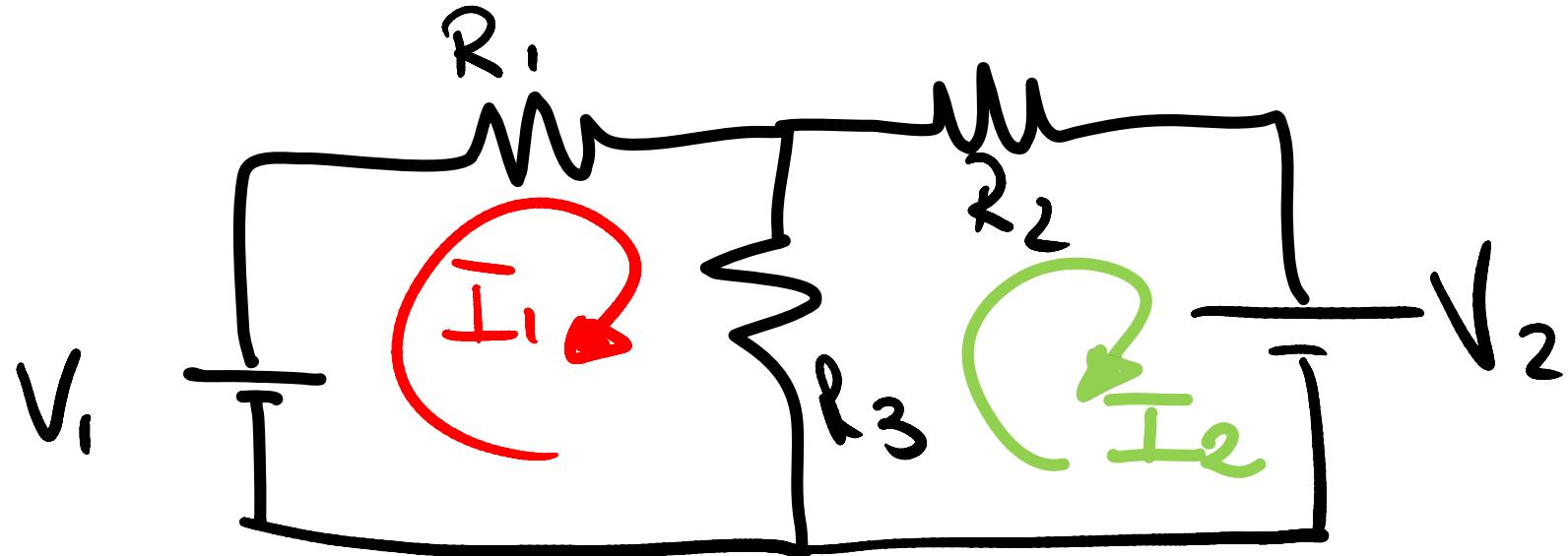
$$V_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_2 R_3$$

Y en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_3 & R_3 \\ R_3 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Vieron que queda un sistema matricial?

Fíjense ahora qué hubiera pasado si elegíamos los siguientes sentidos de referencia:



La cuestión quedará:

$$V_1 - I_1 R_1 - (I_1 - I_2) R_3 = 0$$

$$(I_1 - I_2) R_3 - I_2 R_2 - V_2 = 0$$

Ordenando:

$$V_1 = I_1 R_1 + I_1 R_3 - I_2 R_3$$

$$-V_2 = -I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_2 R_3$$

Y en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ -V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_3 & -R_3 \\ -R_3 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Naturalmente la resolución de cualquiera de los dos sistemas entregará el mismo resultado físico Pero si seguimos la receta, tal vez la resolución se nos haga sistemática y no tengamos que luchar con las ecuaciones cada vez que tengamos que resolver un circuito.

Vamos entonces con la receta para el método sistemático de resolución por mallas:

- I. $v_i(t)$ o V_i : La suma algebraica (es decir, con signos) de todas las fuentes de tensión (independientes y controladas) presentes en la malla i . Si el sentido de referencia positivo de una fuente de tensión coincide con el sentido positivo de la corriente de malla, entonces su contribución algebraica será positiva. Por el contrario, si la diferencia de potencial de referencia positiva se opone al sentido de referencia positivo de la corriente de malla, entonces su contribución será negativa.
- II. z_{ij} o Z_{ij} ($i = j$): la suma de todos los valores de impedancia presentes en la malla i . Como $i = j$, lo que estamos diciendo es que los elementos de la diagonal de la matriz son tomados como positivos⁶.
- III. z_{ij} o Z_{ij} ($i \neq j$): el negativo⁷ de la suma de todas las impedancias que la malla i comparte con la malla j . Noten que no se hace distinción entre z_{ij} (Z_{ij}) y z_{ji} (Z_{ji}), de donde se deduce que la matriz será simétrica respecto a su diagonal.
- IV. $i_i(t)$ o I_i : Son las corrientes de las malla i , que serán obtenidas a través de la resolución del sistema. Son las incógnitas!
- V. Tema fuentes controladas: Luego de expresar las fuentes controladas en términos de las corrientes de mallas, se incluyen “convenientemente⁸” en la matriz impedancia.

⁶ Un detalle: Los números complejos no son positivos o negativos. Las que son positivas o negativas son sus partes real e imaginaria.

⁷ Idem nota 6.

⁸ Cómo odiaba cuando me decían “convenientemente” sin mostrarme cómo! Dado que por el momento fuentes controladas no forma parte del los temas de TC1, lo dejo como un tema para discutir en clase.

Comentarios finales

Comentario #1 (no muy importante porque no nos va a preocupar, pero hay que hacerlo): El método de mallas, así enunciado, vale para redes de impedancias planas. Una red de impedancia plana es aquella que puede representarse sin que ninguna línea que conecte elementos pase por encima de otra.

Comentario #2 (lo aclaramos otra vez): No perdamos de vista que cuando hablamos de diagonal positiva y elementos simétricos negativos en la matriz de impedancia o admitancia, nos estamos refiriendo a la contribución algebraica. Si se trata de una red de resistencias, podemos hablar de elementos positivos o negativos sin problemas. Pero cuando tratamos con impedancias o admitancias, hay que recordar que son números complejos, que no son ni positivos ni negativos (aunque tengan parte real o imaginaria positiva o negativa).

Comentario #3 (vale destacarlo nuevamente): Nadie nos obliga a utilizar un método sistemático. Como se vio en el sencillo ejemplo, la matriz y los sentidos de referencia pueden expresarse de acuerdo a nuestra decisión de cuáles serán nuestros sentidos de referencia positivos cuando apliquemos las leyes de Kirchhoff. La gracia del método sistemático es que nos permite proceder operando según una receta que nos guía a una formulación común a todos los que decidimos seguirla.