



Energía, impedancia y comportamiento humano

Justo Andrés Concha

Introducción

La física es la rama del conocimiento que estudia todo fenómeno de la naturaleza que puede ser descrito a través de leyes, las cuales se han ido formulando a través de los años gracias al trabajo de destacados científicos que han ido descubriendo cosas en complejos procesos de observación de más allá de lo cotidiano.

Arquímedes, Galileo, Copérnico, Halley, Newton, Faraday, Maxwell. Einstein, entre muchos otros, realizaron aportes revolucionarios en sus respectivas épocas, a pesar de la incomprensión y hasta la persecución del establishment. Cada uno de ellos indagó y se sumergió en el no movimiento forma, aquello no definido aún y por tanto inimaginable, ayudando a crear la unidad fundamental acto-objeto; conciencia-mundo.

La energía puede ser considerada como la capacidad para obrar, surgir, transformar o poner en movimiento un objeto. En física, se define como la capacidad de realizar un trabajo (Beranek, 1999). Hay tipos de energía tales como la mecánica, electromagnética y la nuclear. Según la ley universal de la conservación de la energía, la energía de un sistema permanece constante. De acuerdo a esto, como lo menciona el primer principio de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. De esta forma, la energía inicial es igual a la energía final. Al mismo tiempo se cumple que la energía se degrada continuamente hacia una energía de menor calidad. Esto es debido a los factores de pérdida que impiden que la energía se transforme íntegramente de una forma a otra.

Los fenómenos de transformación de la energía son asociados al concepto de transducción. La transducción es la conversión de un tipo de energía en otro tal como la transducción electromecánica que consiste en convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa.

Pero, si se habla de que una consecuencia del uso de la energía en producir un cambio físico tal como el desplazamiento de un objeto o la forma de este, es necesario introducir el concepto de impedancia.

La impedancia es la oposición total de un sistema a los efectos del uso de la energía. Por ejemplo, la impedancia mecánica es la oposición que ofrecen los cuerpos a ponerse en movimiento o terminar con él. La impedancia eléctrica es la oposición total de la materia a la circulación de corriente eléctrica.

El ser humano como individuo y como especie puede ser considerado como un ente eminentemente energético. Consume energía de su entorno y transmite energía permanentemente hacia el entorno incluyendo las relaciones interpersonales.

Las leyes de la física han permitido comprender de mejor manera el comportamiento de todo lo que nos rodea pudiendo hasta predecir el comportamiento de ciertos sistemas simples. El ser humano



y sus comunidades son sistemas que se comportan como fuentes y receptores de energía por lo que, aunque no sea posible aplicar totalmente, hay factores que se podrían analogizar. Por ejemplo, aplicar la segunda ley de Newton o la ley de ohm para comprender como una persona puede transmitir energía dependiendo de las condiciones de impedancia que se establece en la relación a modo de circuito con fuente, carga y energía que se transmite.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es aplicar las leyes de los circuitos eléctricos y mecánicos a las relaciones interpersonales entre los seres humanos.

Circuitos eléctricos

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos del espacio, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico (Boylestad, 2011). El potencial eléctrico en un punto corresponde al trabajo que debe realizar un campo electrostático para trasladar una carga eléctrica positiva desde ese punto a otro punto de referencia en relación a una carga de prueba.

$$V = \frac{W_e}{q} \quad (Volts) \quad (1)$$

Donde

W_e es la potencia eléctrica o trabajo realizado (Watts)

q : Carga eléctrica de un cuerpo (Coulomb)

La carga eléctrica es una propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas por la mediación de campos electromagnéticos. Una carga positiva está asociada a una fuerza eléctrica de empuje, mientras que una carga negativa se relaciona con una fuerza de atracción. Los electrones son las partículas subatómicas que poseen una carga negativa y los protones son los que poseen una carga positiva. Junto con los neutrones que no poseen carga, forman la unidad llamada átomo cuyo equilibrio está dado por una compleja relación de fuerzas de atracción y de repulsión.

La materia está constituida por átomos los que pueden estar en pleno equilibrio, esto significa que poseen igual cantidad de electrones y protones, o estar ionizados. Si los átomos poseen más electrones que protones la carga total es negativa, por el contrario, si la cantidad de protones es mayor que la de los electrones, la carga eléctrica total será positiva.

Entre dos puntos cualesquiera del espacio que pueden ser dos objetos físicos específicos cuyos átomos están cargados puede haber una diferencia de potencial. Esa diferencia de potencial se manifiesta como una fuerza, que potencialmente podría poner en movimiento cargas eléctricas. A esto se le conoce como voltaje.

Esos dos puntos entre los cuales se produce una diferencia de potencial se constituirán en una fuente eléctrica que genera un voltaje específico. Pero no será hasta que esta fuente eléctrica se asocie a un elemento conductor eléctrico que se producirá un efecto o consecuencia significativa.



Todos los materiales poseen características eléctricas. Estos pueden ser: conductores, aislantes o semiconductores. Los conductores son aquellos que no se oponen al paso de corriente eléctrica a través de sus moléculas, mientras que los aislantes son los que ofrecen una gran oposición al paso de corriente eléctrica. La diferencia está en su constitución atómica. Sin embargo, debido a que este trabajo es meramente descriptivo habrá detalles como éste, así también como la profundización del concepto de semiconductores, que no se abordará.

Si un elemento conductor entra en contacto o simplemente está cerca de una fuente eléctrica, circulará corriente eléctrica a través de él. La corriente eléctrica es el flujo de cargas eléctricas que recorre un material. Se debe al movimiento de las cargas (normalmente electrones) en el interior del mismo. Al caudal de corriente (cantidad de carga por unidad de tiempo) se lo denomina intensidad de corriente eléctrica.

Impedancia eléctrica

La impedancia es la oposición total a un flujo. En el caso particular de los circuitos eléctricos, la impedancia es la oposición total al paso de corriente eléctrica por un material. Y resulta ser la razón compleja entre el voltaje y la corriente eléctrica.

$$Ze = \frac{V}{i} \quad (2)$$

La unidad de medida de la impedancia es el ohm (Ω) y la relación entre estas tres magnitudes es conocida como la "Ley de ohm" (Boleystad, 2011).

La impedancia, matemáticamente resulta ser un número complejo y, por tanto, tiene una parte real y una imaginaria. A la parte real se le llama resistencia eléctrica y a la parte imaginaria, reactancia.

$$Ze = Re + jXe \quad (3)$$

Donde

Re: Resistencia eléctrica

Xe: Reactancia eléctrica

NOTA: El subíndice "e", normalmente no se usa, pero en este trabajo más adelante se incluirán los conceptos de impedancia, resistencia y reactancia mecánicas que teniendo muchas similitudes, son distintas. Para establecer la diferencia es que se usa dicho subíndice.

La resistencia eléctrica es aquella parte de la impedancia que produce pérdidas disipativas cuando circula corriente eléctrica por ellos. Esas pérdidas se manifiestan en calor, asociadas al concepto de potencia eléctrica.

$$We = \frac{V^2}{Re} = i^2 Re = V \cdot i \quad (Watt) \quad (4)$$

En la ecuación (4) se establecen las relaciones asociadas a la resistencia eléctrica. La potencia eléctrica es la razón entre el voltaje al cuadrado y la resistencia eléctrica de un elemento o también el producto entre el cuadrado de la corriente y la resistencia o también el producto entre el voltaje y la corriente.



Por otro lado, los elementos reactivos pueden ser de dos tipos: la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva.

La reactancia capacitiva está asociada a la presencia de dos placas paralelas cargadas eléctricamente entre las cuales se produce una capacidad. Esa capacidad está relacionada a la posibilidad de que circule corriente desde una placa a la otra.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (5)$$

Donde

C: Capacidad entre las placas (Faradios)

ϵ_0 : Constante de permitividad del material entre las placas paralelas

S: Área de las caras de las placas (m^2)

d: distancia entre las placas (m)

Al elemento constituido por estas dos placas paralelas se le denomina condensador o capacitor. La impedancia eléctrica se relaciona con las magnitudes fundamentales de manera distinta si se analiza el proceso en estado estacionario o estado transitorio.

En estado transitorio, esto es para intervalos de tiempo infinitesimales, la ley de ohm formulada anteriormente puede describirse a través de la siguiente ecuación diferencial.

$$V(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (6)$$

En estado estacionario, a partir de un estímulo oscilatorio, la relación queda:

$$V = \frac{i}{j\omega C} \quad (7)$$

Como el voltaje y la corriente se relacionan como lo indica la ecuación (2), entonces la impedancia de un elemento capacitivo es:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (7)$$

Donde

ω : Frecuencia angular; $\omega=2\pi f$

NOTA: Los números imaginarios en matemáticas son identificados con la letra “i”, no obstante, en electricidad esa letra es usada para identificar la corriente eléctrica, por lo tanto, siguiendo la tradición de la escuela eléctrica en este trabajo se usará la letra “j” para identificar los números imaginarios.



La reactancia inductiva está relacionada con un elemento constituido por un alambre embobinado que recibe el nombre de bobina o inductor. El comportamiento eléctrico de una bobina también difiere si se analiza en estado transitorio o estacionario.

En estado transitorio la relación de voltaje y corriente en una bobina puede ser escrita como la siguiente ecuación diferencial:

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (8)$$

A su vez, en estado estacionario y sometida a un estímulo oscilatorio de frecuencia angular ω , la relación queda:

$$V = j\omega Li \quad (9)$$

De la misma manera en que se aplicó la ley de ohm para los elementos capacitivos, reemplazando la ecuación (2) en la (9), la impedancia eléctrica de un elemento tipo inductancia es:

$$Z_e = j\omega L \quad (10)$$

Existe un elemento eléctrico complejo que posee los tres tipos de impedancia. Se trata del transformador, constituido por dos embobinados separados por un núcleo aislante cuyo propósito es aislar circuitos aumentando o reduciendo el voltaje o la corriente.

Circuitos eléctricos

Todo elemento en el que se manifieste una diferencia de potencial puede ser considerado como una fuente eléctrica. Sin embargo, hay dispositivos que son construidos como tales y que reciben el nombre dependiendo de cuál sea el producto fundamental de su trabajo. Por ejemplo, una fuente puede generar un voltaje continuo o alterno. El voltaje continuo se caracteriza por producir una fuerza eléctrica en una sola dirección, por lo tanto, sólo tiene magnitud, no así frecuencia o fase. Por otro lado, la energía alterna se caracteriza por generar ciclos de empuje y atracción, por lo tanto, posee una frecuencia dado su carácter oscilatorio.

Pero, para hablar de un circuito eléctrico se deben incluir más elementos que una simple fuente eléctrica. Una fuente sola, no conectada a nada, constituye un circuito abierto. En ella hay un potencial eléctrico, pero no habrá corriente circulando en nada. El circuito se constituye cuando se conectan elementos conductores a dicha fuente, haciendo que fluya corriente desde la fuente a esos elementos conductores. La corriente que fluye dependerá de la impedancia total del sistema, siendo inversamente proporcional a la impedancia de los elementos conectados a la fuente, como lo indica la ley de ohm. Sin embargo, hay ciertas condiciones que influyen sobre el funcionamiento de una fuente eléctrica. Se le denomina fuente de voltaje a una fuente eléctrica que genera el mismo voltaje independiente de lo que se le conecte. Por lo contrario, recibe el nombre de fuente de corriente a la fuente eléctrica que genera la misma corriente eléctrica independiente de lo que se conecte.

Es así que una fuente eléctrica conectada a distintos elementos conductores que presentan impedancia eléctrica ya sea resistiva o reactiva, constituyen un circuito. La idea fundamental es aprovechar la energía de una fuente transmitiéndola o transfiriéndola de un cuerpo conductor a







otro. Los circuitos eléctricos tienen amplias aplicaciones en la vida cotidiana, tanto en las comunicaciones, la iluminación artificial, sistemas de refrigeración y calefacción como en todas las herramientas tecnológicas usadas en la actualidad, debido a que la electricidad es la base de la electrónica, rama de la física que se ocupa del procesamiento de señales eléctricas.

Símbolos eléctricos





La ingeniería eléctrica se ha preocupado de crear distintos símbolos de los elementos que constituyen un circuito con el propósito de facilitar los procesos de diseño, análisis o instalación de sistemas eléctricos.

Tabla 1. Símbolos de fuentes eléctricas

| Fuente eléctricas | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fuente de voltaje | Fuente de corriente | Fuente de corriente continua | Fuente de corriente alterna |
|  |  |  Pila |  Batería |

La tabla 1 muestra los símbolos de los distintos tipos de fuentes eléctricas. La corriente continua se puede generar a partir de complejos procesos químicos incluidos en elementos como las pilas y las baterías. En estricto rigor operan de la misma manera, pero los elementos químicos con los que trabajan son distintos. El símbolo genérico para una fuente eléctrica es un simple círculo en el cual en su interior se puede inscribir una V, para una fuente de voltaje o una “i” para una fuente corriente. A veces, en este segundo caso, se reemplaza la i por una flecha que indica la dirección de circulación de la corriente. También se podrá encontrar este símbolo con una G, en alusión al concepto de generador eléctrico.

Tabla 2. Símbolos gráficos de los elementos típicos de circuito.

| Elementos de circuito | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Resistencia eléctrica | Condensador (capacitor) | Bobina (inductor) | Transformador |
|  |  |  |  |



La tabla 2 muestra los símbolos de los distintos elementos dependiendo del tipo de impedancia que los caracteriza. En la literatura se podrán encontrar algunas variaciones dependiendo de algunas características específicas de cada elemento.

Comportamiento de circuitos eléctricos

Como ya se mencionó, una fuente producirá corriente eléctrica cuando esté en contacto con elementos conductores eléctricos. Como los conductores no son ideales, todos presentan algún tipo de impedancia que se opone al paso de corriente. Todo lo que se conecte a una fuente se le llama carga, no en alusión a la carga eléctrica definida anteriormente, sino probablemente al concepto de carga mecánica, en lo que se constituye en un adelanto de lo que se describirá más adelante en este documento. Depende de cómo sea cargada la fuente, el resultado y la corriente que se generará. Mientras mayor sea la carga, esto es con una impedancia total baja, mayor será la corriente extraída de la fuente eléctrica. Si la carga es menor, impedancia alta, la corriente será menor. El concepto de carga, entonces, está asociada a las exigencias que le impone un elemento a la fuente. La impedancia baja, “roba” más corriente desde la fuente y eso pone a prueba su poder, por eso se considera una carga grande. Si la impedancia es muy alta, la condición puede llegar a constituir un circuito abierto y por ende no circula corriente. Por el contrario, si la carga es muy alta, la corriente puede ser tan alta que terminaría por estropear al circuito debido a que el exceso de calor que producirá esta condición podría hacer colapsar a la fuente y/o a todo lo que esté conectado a ella. Esto recibe el nombre de sobrecarga lo que se puede convertir en un cortocircuito si la impedancia total tiende a cero.

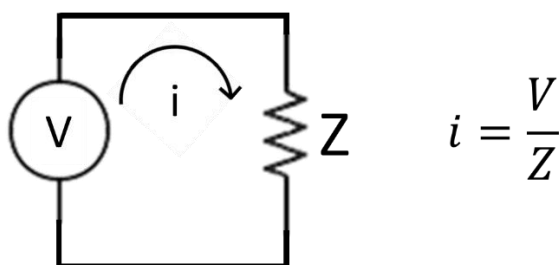


Figura 1. Circuito eléctrico básico con una fuente y una carga de impedancia Z

La fuente no necesariamente va estar cargada por un solo elemento. Se pueden conectar múltiples elementos en distintas configuraciones. Los distintos elementos de circuito se pueden conectar en serie o en paralelo. En serie es cuando la fuente se conecta a un terminal de un elemento, el segundo terminal de este se conecta al primero del siguiente y así sucesivamente como los muestra la figura 2.

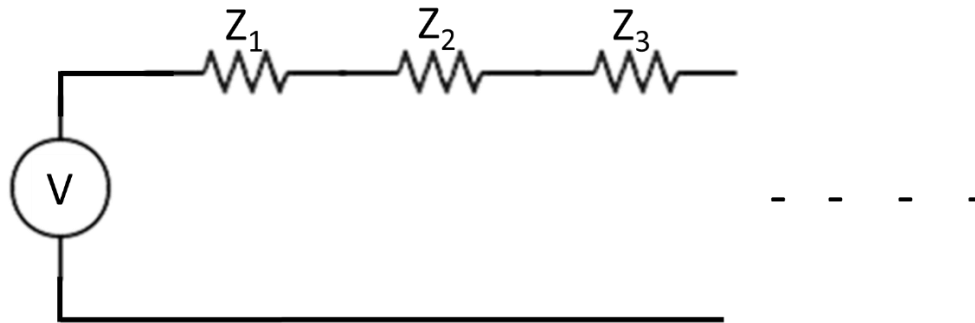


Figura 2. Circuito con elementos conectados en serie.

La figura 2, muestra una fuente eléctrica conectada a varios elementos de circuito en serie. A pesar de que los elementos están dibujados usando el símbolo de la resistencia, estos representan elementos genéricos de impedancia Z la cual puede ser resistiva o reactiva.

En este caso, la fuente se comportará como si tuviera una sola carga conectada que posee una impedancia equivalente que corresponde a la suma de las impedancias individuales de cada uno de los elementos de circuito.

$$Z_T = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n \quad (11)$$

Si todos los elementos fueran iguales o tuviesen la misma impedancia, entonces la ecuación 11 quedaría...

$$Z_T = nZ_1 \quad (12)$$

Donde n es el número total de elementos conectados en serie a la misma fuente.

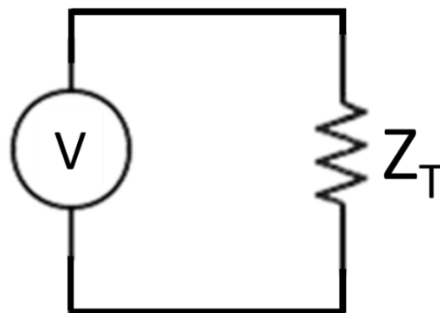


Figura 3. Circuito equivalente

Así, el circuito completo se comportaría de la misma manera que el de la figura 1, sólo que ahora la Z de carga sería la impedancia total equivalente, como lo muestra la figura 3. Si los elementos tienen impedancias individuales muy altas o la suma de todas las impedancias es muy alta, el circuito tenderá a convertirse en circuito abierto produciendo una corriente muy baja, tendiente a cero.



En un circuito en serie, la corriente en todos los elementos es la misma y el voltaje de la fuente se distribuye en forma proporcional dependiendo de la impedancia de cada uno de ellos.

Por otro lado, los elementos pueden ser conectados en paralelo. Esto es, entendiendo que todos los elementos tienen un terminal positivo y uno negativo, algo así como el brazo derecho e izquierdo de las personas, la conexión en paralelo se forma cuando se unen todos los terminales positivos entre sí y todos los terminales negativos entre sí.

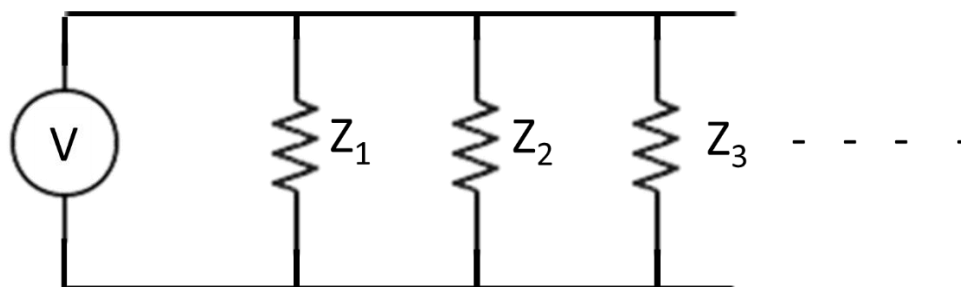


Figura 4. Circuito con elementos conectados en paralelo

Para este caso, todos estos elementos también se comportan como uno solo con una impedancia equivalente que se calcula de la siguiente forma:

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_n}} \quad (13)$$

En el caso especial de que todos los elementos fueran iguales se cumpliría que...

$$Z_T = \frac{Z_1}{n} \quad (14)$$

Donde n es el número de elementos en paralelo que se conectan.

De la ecuación (14), se desprende que mientras más elementos en paralelo se conecten, la impedancia equivalente será menor, por lo tanto, la corriente generada desde la fuente será mayor. Si los elementos fueran demasiados, la impedancia tendería a cero produciendo primero una sobrecarga y luego un cortocircuito.

En el circuito en paralelo, la corriente se divide en cada una de las ramas en paralelo dependiendo de la impedancia de cada una y el voltaje es el mismo.

A partir de esto se pueden combinar ambas creando circuitos mixtos con cargas en serie en paralelo con otras cargas en serie.

En la vida real, esto está presente en situaciones muy cotidianas como por ejemplo una instalación eléctrica domiciliar. Si en una habitación cuando se activa el interruptor para encender las luces, se prenden dos o más ampolletas, es porque están conectadas en configuración. El sistema eléctrico de la casa es la fuente y las cargas son cada una de las unidades que en su conjunto se comportan



como una sola más potente, dos ampolletas iluminan más que una. Normalmente en estos casos las ampolletas suelen estar conectadas en paralelo.

Otro ejemplo, es cuando se conectan varios artefactos electrónicos a un mismo punto de la red mediante un alargador, comúnmente denominado “zapatilla”. Cada uno de los equipos carga al sistema y están conectados en paralelo. Si se llegan a conectar muchos equipos podría generarse una sobrecarga. Esto es una práctica muy recurrente en lugares donde predomina el hacinamiento y donde varias familias viven en precarias ampliaciones de una misma casa desde donde se extrae la energía eléctrica. Lamentablemente esta es una de las causales más típicas de incendio debido a que la alta corriente circulando por el sistema disipa una gran potencia eléctrica que se traduce en calor, derritiendo los conductores y produciendo combustión en cualquier material cercano.

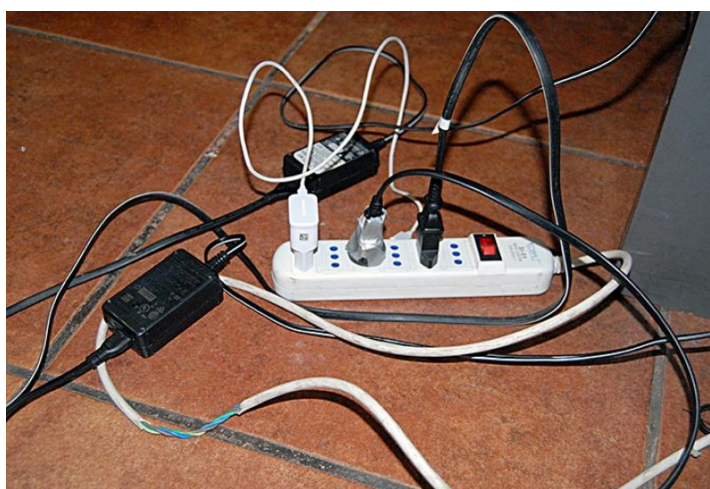


Figura 5. Dispositivo alargador alimentando varios artefactos electrónicos.

A propósito de equipos electrónicos, como ya se mencionó anteriormente, la electrónica estudia la forma de procesar señales eléctricas. Un equipo electrónico como un computador, celular, televisor, equipo de audio, entre otros, recibe, procesa y transmite señales eléctricas. Para poder trabajar, requiere de ser conectados a la red eléctrica, al hacerlo extrae corriente desde un enchufe. Esa corriente es alterna, en el equipo se transforma en continua para alimentar los elementos semiconductores del circuito y así poder procesar. Por otro lado, estos equipos poseen conexiones de entrada y salida por donde se transmiten las señales a procesar tales como por ejemplo los datos digitales de un computador. Cuando se conecta un equipo electrónico a otro, como por ejemplo un computador a un televisor para transmitir esos datos, uno se comporta como fuente y otro como carga.

Todo equipo electrónico posee un circuito muy complejo, que posee una entrada y una salida. A la entrada el dispositivo presenta una impedancia total equivalente, al igual que en su salida. A la primera se le llama impedancia de entrada y a la segunda impedancia de salida (Davis y Jones, 1989).

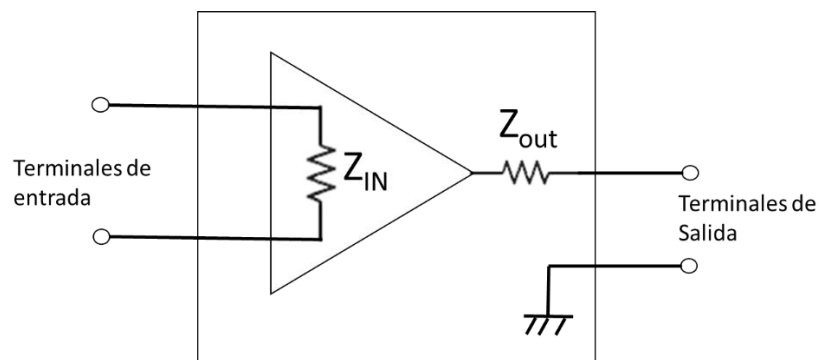


Figura 6. Representación esquemática de un equipo electrónico

El triángulo, en electrónica, es el símbolo genérico de un amplificador y es la simplificación de un circuito muy complejo que procesa las señales eléctricas transmitidas desde una fuente original.

Cuando, mediante conductores eléctricos (cables), se conectan dos equipos electrónicos las impedancias de salida y entrada de ambos equipos quedan relacionadas conformando un circuito eléctrico, donde el equipo que emite se constituye en fuente y el equipo que recibe, en carga.

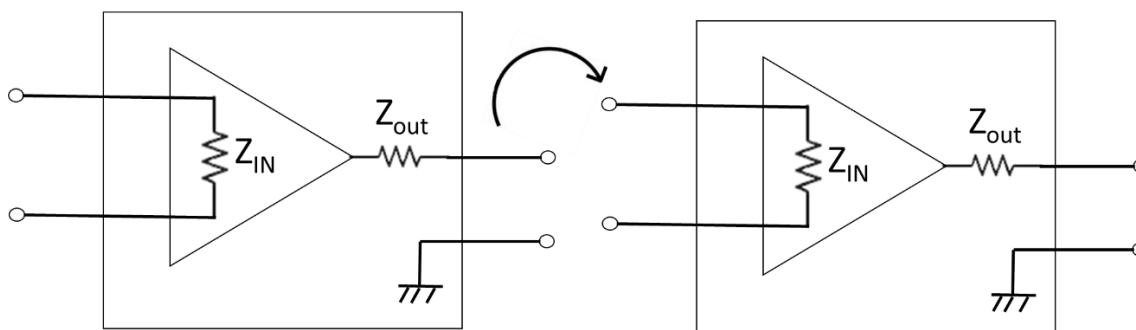


Figura 7. Dos equipos electrónicos conectados entre sí.

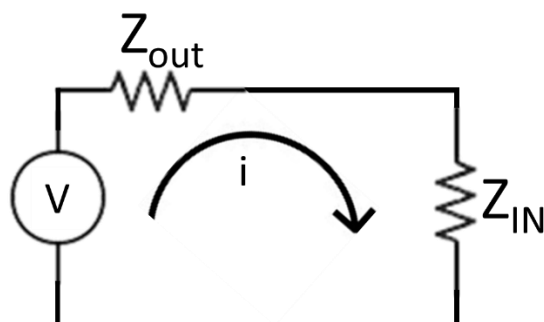


Figura 8. Simplificación de la conexión entre un equipo fuente y otro receptor



Como se puede apreciar en la figura 8, las impedancias de salida de la fuente y de entrada del receptor quedan en serie y, por tanto, forman una impedancia equivalente que es la suma. Sin embargo, en este caso vale la pena aplicar la ley de Kirchhoff de voltaje. Esta dice que, en un circuito en serie, la suma de los voltajes en los distintos elementos de voltaje es igual al voltaje que genera la fuente. Esto significa, que el voltaje que genera el equipo fuente se distribuye en forma proporcional en su impedancia de salida y la impedancia de entrada del equipo que recibe.

El voltaje que cae en la impedancia de entrada del equipo que recibe corresponde a la energía eléctrica reconstituida por el equipo receptor la cual será procesada de acuerdo al diseño de su circuito y las eventuales instrucciones que le dé su usuario. De acuerdo a esto, el voltaje de entrada del equipo receptor no puede ser bajo ningún término, mayor que el voltaje que genera la fuente. Podría ser igual si la impedancia de salida del equipo fuente fuera cero, por lo tanto, la caída de tensión en él no existiría. Eso no es posible, porque por muy simple que sea el circuito del equipo fuente siempre tendrá una impedancia de salida. Entonces, las condiciones de carga condicionan la energía que se transmitirá de un equipo a otro.

$$V_f = V_o + V_i \quad (15)$$

Donde

V_f es el voltaje que genera la fuente

V_o es el voltaje que cae en la impedancia de salida del equipo fuente.

V_i es el voltaje que cae en la impedancia de entrada del equipo que recibe.

V_o es energía no útil, debido a que queda en la fuente no transfiriéndose a la carga. Esta energía se considera como pérdida. La energía que se aprovecha está representada por V_i que sería el voltaje de entrada que será procesado por el equipo que recibe.

Aplicando la ley de ohm se deduce que:

$$V_f = i \cdot Z_T \quad (16)$$

Donde

Z_T es la impedancia total del sistema o impedancia equivalente, esto es $Z_T = Z_{out} + Z_{IN}$

A su vez,

$$V_o = i \cdot Z_{out} \quad (17)$$

y

$$V_{IN} = i \cdot Z_{IN} \quad (18)$$

Si $Z_{OUT} = 0$, entonces $V_o = 0$, por lo tanto, $V_{IN} = V_f$. Pero, como ya se mencionó, esto no es posible. Entonces, cabe preguntarse ¿Cuál es la mejor condición de carga para que el sistema sea eficiente?

Si $Z_{OUT} > Z_{IN}$, la mayor parte del voltaje caería en la propia impedancia de la fuente, por lo tanto, el equipo que recibe tendría poca energía en su entrada. Al mismo tiempo, cabe recordar la condición



de carga mencionada anteriormente. Si la impedancia total de un circuito carga es muy pequeña tendería a sobrecargar a la fuente, el voltaje que se transfiere es despreciable y la corriente es muy alta.

Si $Z_{OUT} < Z_{IN}$, entonces la mayor parte del voltaje caería en la carga, pero como nunca será cero, como ya se mencionó, bastaría que $Z_{OUT} \ll Z_{IN}$, esto es mucho menor, para que el voltaje de entrada en el equipo que recibe sea un porcentaje muy alto del voltaje real que genera la fuente.

Dado este comportamiento es que los equipos electrónicos por condición de diseño poseen impedancias de entrada muy altas e impedancias de salidas muy bajas.

NOTA: las descripciones expuestas han sido simplificadas al máximo. El proceso en la realidad es muy complejo e incluye la manipulación de variables complejas, fasores y ecuaciones más sofisticadas que las presentadas.

Circuitos mecánicos

La mecánica es la rama de la física que estudia el movimiento y el reposo de los cuerpos bajo la acción de fuerzas. La fuerza es una magnitud vectorial que mide la razón de cambio de momento lineal entre dos partículas o sistemas de partículas. Desde ese punto de vista, fuerza es todo agente capaz de modificar la cantidad de movimiento o la forma de los materiales. La fuerza es un concepto que ya ha sido tratado en este documento debido a que los fenómenos eléctricos descritos con antelación suponen la presencia de fuerza que provoca que las partículas subatómicas se desplacen. Sin embargo, cuando se analizan sistemas mecánicos a niveles estructurales mucho mayores que la de los átomos, de tal forma de hacerlos evidentes por simple observación del ser humano, la fuerza puede ser comprendida de otra forma.

Cuando se aplica una diferencia de fuerza sobre un cuerpo sólido, éste resultará acelerado como lo describe la segunda ley de Newton. Pero esa aceleración, normalmente asociada al concepto de movimiento, dependerá de la oposición del medio a ponerse en movimiento o a volver al reposo como se resume en la ley de inercia. Una misma fuerza no necesariamente pondrá en movimiento a cualquier cuerpo. Una persona, por ejemplo, podrá levantar un objeto con cierta facilidad dependiendo de sus dimensiones. Un lápiz, la vajilla, un celular son objetos pequeños que fácilmente pueden ser asidos. Un mueble grande, un automóvil, un árbol añoso ya no serán tan fáciles de mover. Esto es porque el concepto de impedancia está presente también en la mecánica.

Se define la impedancia mecánica como la oposición total a modificar el comportamiento del movimiento de un cuerpo material, ya sea salir del reposo o volver a este. Matemáticamente la impedancia mecánica resulta ser la razón compleja entre la fuerza aplicada sobre un cuerpo y la velocidad resultante (Beranek, 1993).

$$Z_M = \frac{F}{u} \quad (19)$$

Donde



Z_M es la impedancia mecánica del cuerpo en cuestión (ohm mecánico mks)

F es la fuerza total o diferencia de fuerza aplicada sobre un cuerpo (N, Newton)

u es la velocidad de partículas del cuerpo (m/s)

NOTAS

1. Por la misma razón esgrimida para justificar el reemplazo de la letra “i” de los complejos por “j”, la “u” se usa para evitar la “V”, ya usada para referirse al voltaje.
2. Cuando se usa la sigla mks se refiere al sistema métrico que considera metros, kilogramos y segundos para medir distancia, masa y tiempo.

Si se compara la ecuación (19) con la ecuación (2) se podrá observar cierta similitud con la llamada ley de ohm definida exclusivamente para magnitudes eléctricas. Esto sería fácil de comprender si la fuerza fuera análoga al voltaje y la corriente a la velocidad de partículas. Por intuición se podrá afirmar esto dado a que el voltaje es la fuerza generada en un campo eléctrico y la corriente es un conjunto de cargas eléctricas en movimiento. Sin embargo, la relación no es tan evidente y requiere de pruebas.

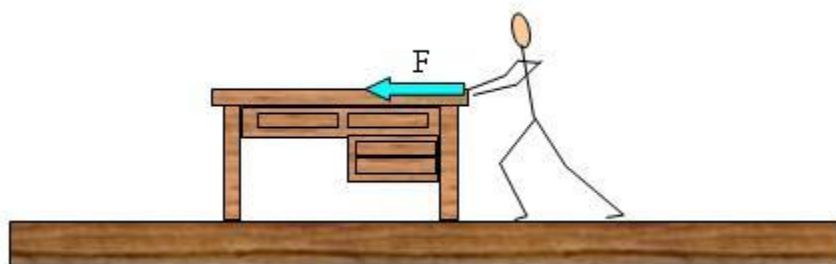


Figura 9. Esquema de una persona empujando un escritorio afirmado sobre el suelo.

Si se analiza la situación planteada en la figura 9, se podrá sacar algunas conclusiones por simple inspección. Primero, si la persona no existe o no aplica fuerza alguna sobre el escritorio, el mueble permanecerá en reposo. Esto, obviando que el universo y todo está en constante movimiento y no existe un sistema referencial real de velocidad cero ($u = 0$).

La suma de todas las fuerzas sobre el escritorio es cero. Por lo tanto, la diferencia de fuerzas es cero, y, por ende, la velocidad es cero, es decir el escritorio no se mueve. Se dice que la diferencia de fuerzas es cero porque que un cuerpo no se mueva no quiere decir que sobre él no se aplica fuerza alguna. De hecho, en el caso observado, se debe consensuar que todo cuerpo existente sobre la superficie de la Tierra está sometido a la fuerza de gravedad (peso). Entonces, se tiene la fuerza de gravedad que atrae el cuerpo, en este caso el escritorio, hacia la superficie terrestre. Pero también la superficie o suelo sobre el cual está apoyado el escritorio ejerce una fuerza de reacción en sentido contrario.

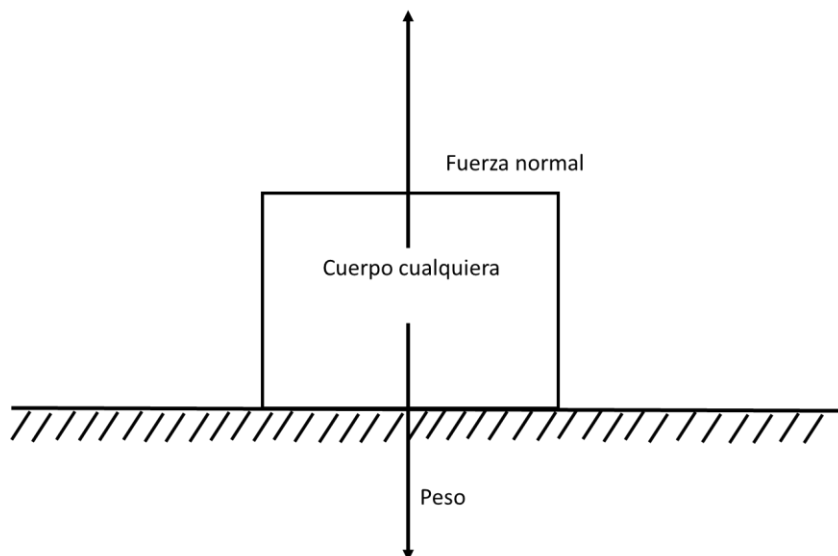


Figura 10. Suma de fuerzas sobre un cuerpo en reposo

El peso y la fuerza normal tienen la misma magnitud, pero dirección opuesta. Entonces

$$F_g = -F_N \quad (20)$$

$$\gamma \quad F_g + F_N = 0 \quad (21)$$

Para poder mover el escritorio de la figura 9 es necesario aplicar una tercera fuerza que es la que ejerce la persona. El individuo sentirá que el escritorio se resiste a ser cambiado de posición. Esa oposición está dada porque el escritorio posee una determinada masa en Kg. que probablemente será mayor que la de una silla; y también por el roce de las patas del mueble con el suelo. Este segundo aspecto es muy relevante y depende de la materialidad del suelo. Por ejemplo, un piso de cerámica bien pulido no ofrece la misma oposición que un piso alfombrado de muro a muro. Si el individuo opta por levantar el mueble, si pudiese aplicar una fuerza superior a la diferencia de fuerza ya mencionada, eliminará el roce, quedando exclusivamente dependiendo de la masa del escritorio. No obstante, el ejercicio podría tener mayor dificultad debido a que al empujar, es posible aprovechar no sólo la fuerza del torso transmitido hacia los brazos, sino que también la fuerza aplicada desde las piernas que, apoyadas en el suelo, hacen palanca aumentando la fuerza total.

Si, además, sobre el escritorio hubiese otro objeto como un libro, computador, lámpara, la masa sería mayor y el esfuerzo aplicado también sería mayor. Entonces la materia se opone al movimiento y eso está relacionado con la impedancia mecánica.



Impedancia mecánica

Al igual que su símil eléctrico la impedancia mecánica es un complejo y por ende posee una parte real y una imaginaria.

$$Z_M = R_M + jX_M \quad (22)$$

Donde

R_M es la resistencia mecánica (ohm mecánico mks)

X_M es la reactancia mecánica

La reactancia mecánica puede tener dos formas: la masa mecánica y la compliancia mecánica. La masa mecánica corresponde a ese elemento que puede ser analizado a través de la segunda ley de Newton (Beranek, 1993).

$$F = M \cdot a \quad (23)$$

Un cuerpo tipo masa es aquel que cuando se le aplica una fuerza externa que rompa con el equilibrio normal de fuerzas, resulta acelerado. Dicha aceleración no supone deformación del objeto dado a que una de las principales características de los elementos tipo masa es su rigidez.

Pero, para el propósito de este estudio de establecer relaciones análogas entre sistemas distintos, se formulará una forma distinta para que la expresión quede en términos de velocidad de partículas. Es así como la aceleración puede ser expresada como la derivada en el tiempo de la velocidad.

$$F(t) = M \frac{du(t)}{dt} \quad (24)$$

Cabe destacar la similitud entre la ecuación (24) y la ecuación (8) que describe el comportamiento de los elementos tipo inductancia en estado transitorio si es que se reemplazara el voltaje por una fuerza y la corriente por la velocidad de partículas.

De la misma forma, esta expresión se puede re-rescribir para el estado estacionario como:

$$F = j\omega M u \quad (25)$$

Así, se determina que la impedancia mecánica de un elemento tipo masa es:

$$Z_M = j\omega M \quad (26)$$

Existe otro tipo de elemento reactivo mecánico correspondiente a la compliancia mecánica. Un elemento tipo compliancia es aquel que cuando se aplica una fuerza externa que rompe la condición de equilibrio, resulta desplazado con una aceleración neta igual a cero. El comportamiento de estos elementos puede ser descrito a través de la ley de Hooke:

$$F(t) = -k \cdot x \quad (27)$$

Donde

k es la constante de elasticidad del cuerpo



X es el desplazamiento del objeto (m)

Esta expresión puede ser re-escrita de tal forma de expresar el desplazamiento en términos de velocidad. Esto es usando la integral de la velocidad de partículas en el tiempo.

$$F(t) = \frac{1}{C_m} \int u(t) dt \quad (28)$$

Donde

C_m es la compliancia mecánica del objeto (m/N). El subíndice “m” se usará para evitar confusión con “C” de capacitor. En este caso, el recíproco de la compliancia resulta ser la constante de elasticidad. El signo negativo de la ley de Hooke está asociado a la fuerza de reacción que experimenta el objeto sobre el agente que ejerce la fuerza de desequilibrio.

El símbolo de un elemento tipo compliancia es un resorte, el cual al ser sometido a una fuerza se comprime, pero cuando la fuerza desaparece recupera su forma original. Uno de los aspectos difíciles de comprender es cómo puede haber aceleración nula habiendo cambio de posición en el tiempo. Si se imagina el proceso de aplicación de una fuerza sobre un resorte se observará que en primera instancia el desplazamiento se produce sólo en un extremo, mientras que el segundo permanece con velocidad cero, sobre todo si está sujeto rígidamente a un sistema en reposo de impedancia infinita. Por lo tanto, el objeto no resulta disparado.

Nuevamente se destaca la similitud entre la ecuación (28) y la ecuación (6) usada para describir los elementos tipo capacitancia. Al someter a este elemento a un estímulo oscilatorio y analizado para intervalos grandes de tiempo se establece la relación en estado estacionario que quedaría:

$$F = \frac{u}{j\omega C_m} \quad (29)$$

Con esto se deduce que la reactancia de un elemento tipo compliancia mecánica es:

$$Z_M = \frac{1}{j\omega C_m} \quad (30)$$

Así como existen fuentes de voltaje y de corriente, en mecánica se puede hablar de fuentes de fuerza y de velocidad. Una fuente de fuerza es aquella que genera la misma fuerza independiente de la carga que tenga que sostener. A su vez, una fuente de velocidad es aquella que genera la misma velocidad independiente a la carga que debe sostener. Las relaciones de fuerza y velocidad siguen estando delimitadas por la ley de ohm. Por ejemplo, para lograr que un sistema con una gran impedancia mecánica se mueva con la misma velocidad que otro con menor impedancia se deberá aplicar una fuerza mayor.

Finalmente, hay un elemento menos evidente que ya fue descrito en el caso planteado en la figura 9, que corresponde al roce. El roce es la fricción entre partículas de distintos elementos o de un mismo elemento que se caracteriza porque producto de él se generan pérdidas disipativas, es decir conversión de energía en forma de calor. Este roce es invariante en estado transitorio y estacionario y su relación con la fuerza y la velocidad está dada por la siguiente expresión:

$$V = u \cdot R_m \quad (31)$$



No existe un símbolo genérico para el roce, pero en el ámbito de la ingeniería mecánica se identifica con un amortiguador hidráulico. Esto resulta ser un tanto reduccionista debido a que el roce presente en un amortiguador hidráulico es el tipo viscoso. Es beneficioso cuando se desea considerar sistemas lineales, sin embargo, el roce “per se” es no lineal.

Analogía electromecánica

Como ya se mencionó repetidamente, hay evidencias de que los sistemas mecánicos y los circuitos eléctricos se podrían analizar usando las mismas leyes. A partir de las ecuaciones formuladas, incluyendo a la ley de ohm, y considerando que resultaría de cierta obviedad que el concepto de impedancia no debiera diferir según la energía que se transmita, se puede establecer una analogía entre la impedancia mecánica y la impedancia eléctrica. De esta forma, las relaciones estarían dadas por lo que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Analogía tipo impedancia.

| Relaciones de la analogía tipo impedancia | |
|-------------------------------------------|----------------------------|
| Elemento eléctrico | Elemento mecánico análogo |
| Voltaje | Fuerza |
| Corriente | Velocidad de partículas |
| Resistencia | Resistencia mecánica |
| Capacitancia | Compliance mecánica |
| Inductancia | Masa mecánica (Inertancia) |
| Transformador | Palanca |

No obstante, no es la única perspectiva que se puede aplicar. En ciertos generadores tales como el motor electromagnético, la fuerza es proporcional a la corriente y el voltaje a la velocidad de partículas (Beranek, 1993).

$$F = Bl \cdot i \quad (32)$$

$$V = Bl \cdot u \quad (33)$$

Donde

B es el flujo magnético entre del entrehierro de un imán magnético permanente (T: Tesla)

L es el largo de un conductor eléctrico inmerso dentro del campo magnético del imán permanente (m).

$$\text{Si } Z_e = \frac{V}{i}$$

Reemplazando V e i por las expresiones (31) y (32)

$$Z_e = \frac{Blu}{\frac{F}{Bl}} = (Bl)^2 \frac{u}{F} = (Bl)^2 \cdot \frac{1}{Z_m} \quad (34)$$



La ecuación (34) muestra que la impedancia eléctrica es proporcional al recíproco de la impedancia mecánica. Este recíproco tiene significado y corresponde al concepto inverso del de impedancia. Si un sistema tiene una impedancia mecánica muy alta tendrá una baja movilidad, le costará moverse. Al revés, un sistema de baja impedancia tendrá una gran movilidad. Por lo tanto, el recíproco de la impedancia mecánica es la movilidad mecánica cuya unidad es el mohm mecánico mks.

A su vez, el recíproco de la impedancia eléctrica resulta ser la conductancia o admitancia. Esto porque un circuito con una impedancia baja tendrá una gran conductividad, es decir conducirá con facilidad la corriente eléctrica. Al revés de lo que sucede cuando el circuito tiene una impedancia alta.

Por otro lado, también se puede establecer una relación a partir de la forma en que se puede medir las magnitudes fundamentales. Por ejemplo, el voltaje se mide con un voltímetro colocado en paralelo con el elemento sobre el cual se desea medir. La corriente se mide con un amperímetro interviniendo el circuito, esto es, abriéndolo para insertar el instrumento de medición en serie. La fuerza se mide desarmando la máquina y colocando un medidor entre dos puntos a evaluar. La velocidad se puede medir determinando el desplazamiento en el tiempo sin intervenir el sistema. En resumen, la fuerza se mide en serie y la velocidad en paralelo.

Entonces, es posible establecer una analogía en donde la impedancia eléctrica es análoga a la movilidad mecánica y recibe el nombre de analogía tipo movilidad.

Tabla 4. Analogía tipo movilidad

| Relaciones de la analogía tipo movilidad | |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Elemento eléctrico | Elemento mecánico análogo |
| Voltaje | Velocidad de partículas |
| Corriente | Fuerza |
| Resistencia | Responsabilidad mecánica (recíproco de la resistencia) |
| Capacitancia | Masa mecánica |
| Inductancia | Compliance mecánica |
| Transformador | Palanca inversa |

La razón por la cual en la analogía tipo movilidad los elementos reactivos se intercambian no siendo necesarios definir sus recíprocos es porque ellos naturalmente son recíprocos. La capacitancia es un concepto recíproco a la inductancia, así como la derivación es inversa a la integración.

Aplicaciones de las analogías

Analizar un sistema complejo como los circuitos mecánicos pueden realizarse usando dos estrategias. Una es formulando las ecuaciones diferenciales que se adecuen al comportamiento observado. Esto puede llegar a ser una tarea muy compleja, sobre todo y como suele ser, si se está frente a sistemas no lineales. La otra estrategia es aplicar las leyes o la teoría de sistemas conocidos a partir de evidencias objetivas. Representar sistemas mecánicos como si fueran circuitos eléctricos tiene la ventaja de que conociendo las leyes de los circuitos eléctricos se puede resolver su comportamiento calculando fuerza y velocidades como si fueran voltaje y corriente. Claro está, que



esta premisa es lógica para ingenieros eléctricos y no así para otras especialidades. Resultaría improductivo estudiar electricidad exclusivamente para poder estudiar después mecánica, pudiéndolo hacer de manera directa.

Por ejemplo, para la situación de la figura 9, una representación posible resultaría de aplicar la analogía tipo impedancia.

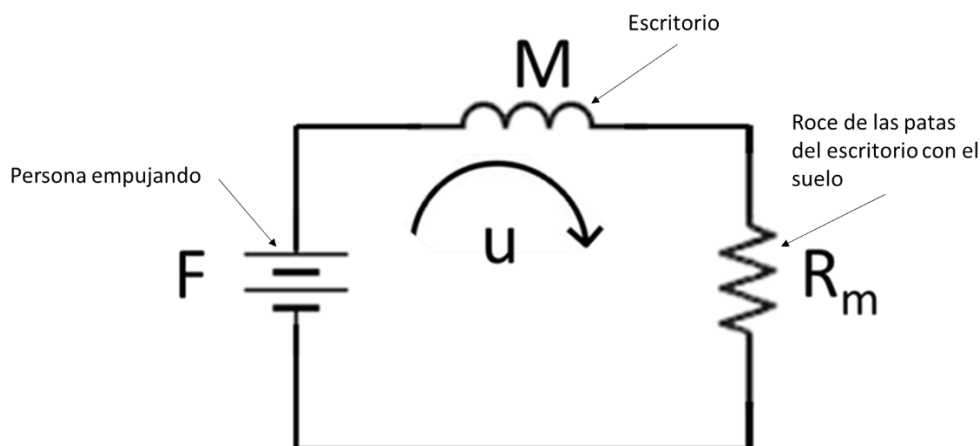


Figura 11. Circuito análogo tipo impedancia del sistema de la figura 9.

En este caso, y como lo muestra la figura 11, la persona que empuja el escritorio es representado por una fuente de voltaje continuo, esto es porque ejerce una fuerza en una sola dirección pensando que el propósito es cambiar de ubicación al mueble. La fuente actúa sobre el escritorio directamente e indirectamente a través de este sobre el suelo. El roce aparece una vez que el mueble se desplaza sobre el suelo. El suelo representa el sistema de referencia de velocidad cero a modo de tierra eléctrica. Una vez venciendo el roce inicial y la reacción de la masa del mueble, el objeto termina moviéndose con velocidad u . En esta representación la fuerza cae y la velocidad fluye. La velocidad es la misma en los elementos del circuito debido a que están en serie, mientras que la fuerza se distribuye. El individuo aplica la fuerza sobre el escritorio y el escritorio sobre el suelo.

Si el suelo estuviese perfectamente lubricado el roce se reduciría de tal forma que se constituye en un cortocircuito. En este caso podría eliminarse el elemento tipo resistencia quedando el elemento tipo masa conectado directamente a tierra. Al agregar masa, colocando otro objeto sobre el escritorio, las masas se sumarían debido a que quedan en serie, aumentando a su vez, la impedancia total del sistema que sería $R_m + j\omega M$. Esto produciría una disminución de la velocidad siempre y cuando la fuerza siguiese siendo la misma. Para mover con la misma velocidad al sistema, el individuo deberá hacer un esfuerzo mayor aumentando la fuerza aplicada.

Como la fuente es continua, la variable frecuencia no tendría mayor repercusión, pero frente a un estímulo oscilatorio, más allá de lo ilógico que puede ser que una persona aplique fuerzas de empuje y atracción en forma alternada, el sistema reaccionaría de manera distinta dependiendo de la frecuencia aplicada. Por ejemplo, para frecuencias muy bajas, $j\omega M$ sería muy baja por lo tanto el sistema sería eminentemente resistivo. En cambio, si la frecuencia fuera alta, la impedancia del



escritorio sería mayor convirtiendo al sistema en meramente reactivo. En resumen, el sistema analizado tendría el comportamiento de un filtro, más precisamente un filtro pasa bajos.

Pero, si se aplicara la analogía tipo movilidad ¿Cambiaría el análisis? Para nada, la representación sería recíproca, pero finalmente el resultado es el mismo.

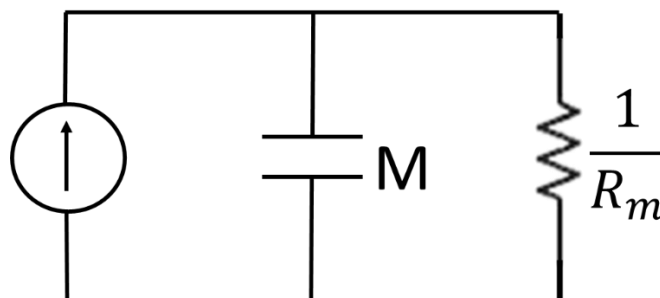


Figura 12. Representación eléctrica tipo movilidad de una persona empujando un escritorio.

La figura 12 no muestra la impedancia mecánica del sistema, sino su movilidad. Es por eso que, si bien la masa sigue siendo masa, en este caso se representa como un condensador conectado a tierra. A su vez, el roce es representado a través de una responsabilidad mecánica. En este caso, la velocidad cae como si fuera el voltaje y fluye la fuerza. En un circuito en paralelo el flujo se divide, por lo tanto, la fuerza en los elementos de circuito no es la misma. La velocidad sí es la misma.

Si el roce fuera infinito, la movilidad sería cero por lo tanto la rama se constituye en un cortocircuito. Si el roce es cero, la responsabilidad sería infinita y por ende el circuito sería exclusivamente reactivo. Si el estímulo fuera alterno, esta representación también sería coherente con el comportamiento de un filtro, específicamente un filtro pasa bajos al igual que la representación tipo impedancia (Pueo, Romá, 2003).

Esta técnica es muy útil y es aplicable a toda máquina tipo motor, bicicleta, sistema de poleas, sistemas de riego, incluso en planificación urbana. El curso de un río es un verdadero circuito en el cual circulan m^3 de agua por sección. El caudal dependerá de los afluentes, la pendiente del terreno, la materialidad del lecho. Imaginemos un desierto, cuyos cauces se encuentran totalmente secos, debido a una lluvia de temporada en la montaña, reviven. El paso de agua irá avanzando progresivamente con mayor o menor velocidad dependiendo de la oposición del relieve geográfico. Si en determinado tramo existe un socavón, el curso se detendrá hasta llenar el socavón. Una vez lleno este circunstancial estanque, el curso continuará. Esto es exactamente lo que pasa en un circuito eléctrico con un condensador. Por otro lado, otro sector lleno de quebradas provocará que el cauce se concentre en las partes bajas estableciendo un sinuoso e intrincado recorrido. Esto es lo que sucede con las bobinas en electricidad. Y si en un punto determinado cambia el lecho bruscamente de ancho, eso actuará como transformador, aumentando el caudal, pero disminuyendo la velocidad de las partículas de agua. El caudal siempre irá por el camino que le ofrezca menos oposición y si en algún momento se produce una bifurcación, es porque se abren varios caminos posibles, creando circuitos en paralelo.

Algo similar se podrá observar con el flujo vehicular en las calles de una ciudad. A una avenida, entran y salen calles más pequeñas que van influyendo sobre el tránsito de la avenida mayor. Si los



ingenieros de tránsito dejen sólo vías de entrada a la avenida, el flujo sólo irá creciendo hasta colapsarla. En una avenida donde hay un atochamiento, no hay flujo vehicular. El circuito está abierto, el potencial es alto. Una autopista es un circuito de baja impedancia donde habrá mayor flujo, mientras no haya un accidente que reduzca drásticamente la cantidad de pistas disponibles, lo que significará el aumento de la impedancia del circuito, disminuyendo el flujo.

Comportamiento humano

Existen muchas posibilidades de aplicar lo planteado con anterioridad para comprender el funcionamiento de la vida y de los seres humanos en particular. Sin ir más lejos, el cuerpo humano está constituido de una serie de sistemas orgánicos que resultan ser claros circuitos donde se pueden aplicar las analogías. El sistema circulatorio, por ejemplo, cuenta con un motor muy potente que es el corazón y cuyo propósito es bombear sangre oxigenada a cada uno de los rincones del cuerpo y recibir la sangre purificada por los pulmones. La sangre fluye pura a través de arterias y retorna contaminada por venas. Estos conductos estrechos poseen impedancia y de ella depende la fuerza que debe aplicar el corazón para que fluya la sangre. Con el paso del tiempo estos conductos se van llenando de impurezas tales como el colesterol, residuos de grasas que se acumulan en las paredes de las arterias y que obligan al corazón a hacer un esfuerzo mayor. La presión arterial aumenta pudiendo incluso hacer colapsar las paredes de los vasos sanguíneos produciendo derrames tal cual como cortocircuitos que producen corrientes altas por caminos de menor impedancia. Así como el motor de un camión sobrecargado subiendo una cuesta, el corazón podrían colapsar, incluyendo el factor edad dado su desgaste natural cual camión mal mantenido.

Lo mismo ocurre con el sistema respiratorio y el flujo de aire a través de los pulmones o el sistema nervioso, donde la relación es más directa porque los impulsos nerviosos son eléctricos. La sinapsis no es más que el funcionamiento de la ley de ohm entre una y otra neurona donde una actúa como fuente y la otra como carga y a su vez la que recibió es fuente para la tercera produciendo una vía de transmisión expedita y sumamente rápida. Así también sucede con el sistema digestivo, límbico, endocrino. Los volúmenes se comportan como compliancias o capacitores y los conductos como masas e inductores. Y donde haya roce, habrá resistencia y potencia disipada.

La energía mecánica también está presente por doquier y no solo comunicando órganos y tejidos en el intracuerpo también siendo muy activa en los procesos de captación de estímulos externos. El oído es uno de los mejores ejemplos. Las ondas sonoras son manifestaciones de energía mecánica en gases que se propaga en un medio elástico tal cual como el aire. Esas ondas sonoras llegan a la cabeza de un ser humano y el oído las transduce en una serie de impulsos eléctricos que se propagan desde el nervio auditivo a la corteza cerebral. Pero en el oído mismo hay múltiples conversiones. La oreja es una antena que direcciona las ondas al canal auditivo externo, dentro de él la onda se enfrenta al tímpano que convierte las variaciones de presión del aire en fuerza que moviliza la cadena de huesecillos presente en el oído medio. Estos pequeños osículos ejercen palanca sobre la ventana oval produciendo una perturbación hidráulica en el oído interno sacudiendo un órgano llamado membrana basilar que posee los cilios que convierten energía mecánica en eléctrica.

La visión opera con estímulos ópticos, el gusto y el olfato con estímulos químicos y el tacto con estímulos mecánicos. A los cinco sentidos externos se suman los sentidos internos denominados cenestesia y kinestesia. En esta última parte es posible aplicar todo lo descrito anteriormente.



Cuando un individuo se comunica verbal o no verbalmente con otro se establece un circuito donde fluye energía de uno a otro recíprocamente. Si la comunicación es verbal, al hablar uno se constituye en fuente y el otro al escuchar en receptor. Esto no es distinto a lo descrito en los sistemas mecánicos, porque la voz emanada del tracto vocal es energía mecánica. Las vibraciones surgen de las cuerdas vocales y todo el conducto entre ellas y los labios modulan los sonidos articulando palabras que probablemente serán entendidas por el receptor quien percibe las ondas sonoras provenientes del emisor a través de sus oídos para dar inicio al complejo mecanismo de interpretación el cual será abordado más adelante.

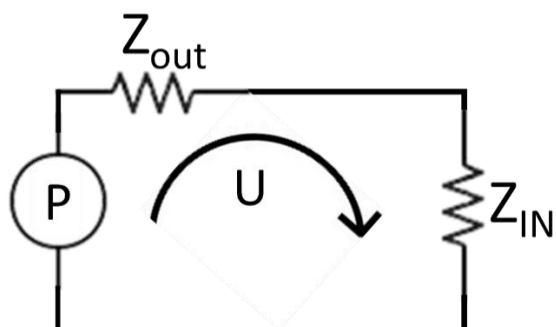


Figura 13. Representación eléctrica de la comunicación entre dos personas.

La fuente resulta ser de presión sonora, es decir una fuerza en un medio gaseoso. La impedancia de salida de la fuente resulta ser la oposición total del tracto vocal a la emisión del sonido. La velocidad de volumen U (m^3/s) corresponde a la velocidad de un conjunto de partículas de aire distribuidas en un volumen en el espacio. La impedancia de entrada resulta ser la oposición total del sistema auditivo del receptor. La presión va decayendo con la distancia, por lo tanto, mientras más lejos estén los individuos, menor intensidad tendrá el sonido que arriba al receptor. Esto porque el aire no es conductor ideal y posee también impedancia resistiva preferentemente. Si la situación acontece en un lugar muy ruidoso, la comunicación también se dificultará porque el emisor deberá competir con una serie de fuentes paralelas que generan sonidos de intensidad similar o incluso mayores como en el interior del vagón del metro, en una avenida muy transitada por vehículos y microbuses o en un restaurant lleno de comensales conversando.

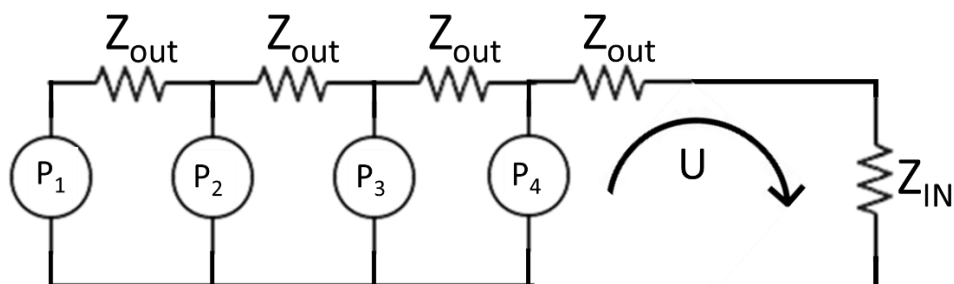


Figura 14. Representación eléctrica de la superposición de varias fuentes sonoras.



En la figura 14 se aprecia la representación eléctrica de la superposición de varias fuentes sonoras. Cada una tiene su propia impedancia de salida y todas en conjunto son cargadas por el auditor. La velocidad de volumen final U , es la suma de todas las velocidades de volumen aportadas por cada una de las fuentes.

Si una de esas velocidades de volumen fuera notablemente mayor que las otras sucedería que $U \approx U_1$, suponiendo que la velocidad de la fuente 1 es la más potente. En este caso el resto de las ondas serían enmascaradas haciendo que el auditor escuche exclusivamente el sonido de esa fuente.

Volviendo al ejemplo de una conversación normal, una vez que el emisor termina su mensaje, el receptor podría contestar constituyéndose, ahora él, en emisor y el otro en receptor. El mecanismo es el mismo.



Figura 15. Dos personas conversando

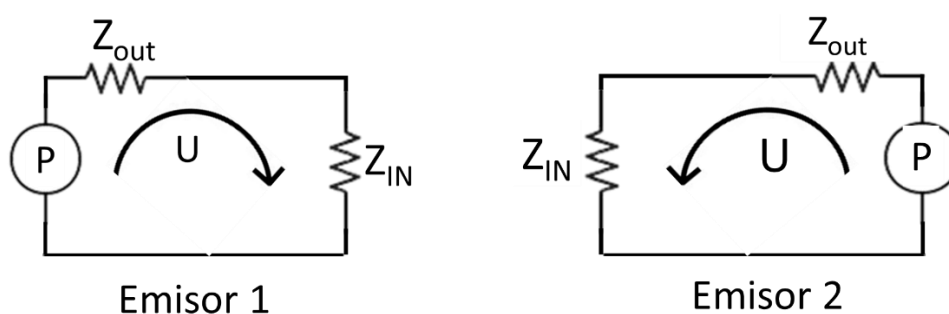


Figura 16. Representación eléctrica de la conversación entre dos personas

La figura 16 muestra el circuito análogo de una conversación entre dos personas. Cuando el rol de emisor va turnándose lo que sucede es que el mensaje se tramite en una y otra dirección comportándose como dos circuitos independientes. En una discusión, suelen superponerse ambos



interlocutores, en ese caso, se crea un solo circuito con dos fuentes y sus respectivas impedancias de salida, pero las impedancias de entrada tienden a desaparecer lo que implica que ninguno escucha al otro.

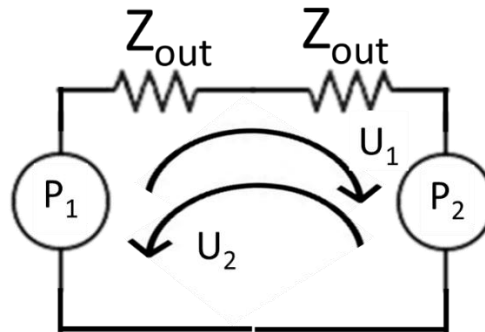


Figura 17. Dos fuentes sonoras distintas superpuestas.

En el circuito de la figura 17, los flujos se superponen. Ambas fuentes emiten y reciben a la vez. Probablemente, no haya entendimiento debido a que la atención estará focalizada en uno sólo de los mensajes, posiblemente el propio.

La situación cambia si en vez de dos personas se está frente a un orador y a un público presente. En ese caso, todos los auditores están en paralelo. La impedancia equivalente es menor y el orador deberá hacer un esfuerzo mayor para que la energía acústica sea suficiente para todos los auditores. La cantidad de auditores podría llegar a hacer colapsar a la fuente, debido a que las cuerdas vocales tienen una capacidad de vibración. Más allá de ese límite, comienzan a irritarse provocando posiblemente cuadros de disfonía. Los actores y actrices y cantantes líricos aprenden técnicas para proyectar e impostar la voz de tal manera de aprovechar la caja de resonancia constituida por el torso del cuerpo. Es así que dichos personajes tienen menos dificultad para que un público significativo los escuche sin la ayuda de sistemas de audio cuyo propósito es potenciar la fuente aumentando su capacidad.



Figura 18. Orador frente a un auditorio de personas.

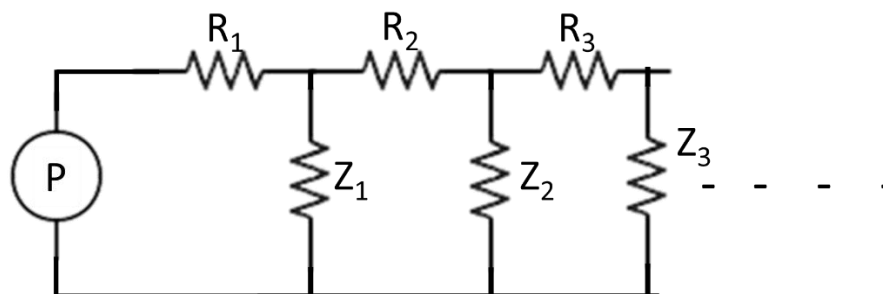


Figura 19. Circuito análogo de un orador frente a un auditorio

La figura 19, muestra la representación eléctrica de la situación orador-auditorio. Z_1 , Z_2 , Z_3 ... representan la impedancia acústica de entrada de cada uno de los asistentes a la conferencia. R_1 , R_2 , R_3 ... representan la resistencia del aire. Como la persona 3 está a más distancia de la fuente, la intensidad del sonido del orador irá atenuándose debido a que el flujo irá pasando por la sumatoria de elementos resistivos. Eso quiere decir que cada una de las personas en el auditorio escucha un sonido distinto emanado de la misma fuente. Esto es sin considerar efectos acústicos como la reflexión del sonido en las paredes lo que hace que lo que se escucha no es sólo sonido directo sino una combinación de múltiples ondas que arriban en distintos tiempos a cada auditor, profundizando la situación de que cada auditor escucha un sonido dependiendo de la ubicación en que se encuentre (Arau, 1999).

Una persona que está sola y no interactúa con más personas, su energía queda deambulando entre objetos inanimados y eventualmente otros sistemas de vida tales como plantas o mascotas. Sin embargo, si se restringe el análisis a la relación entre personas, se descubrirá que se está en presencia de un circuito abierto, esto es, una fuente sin carga.

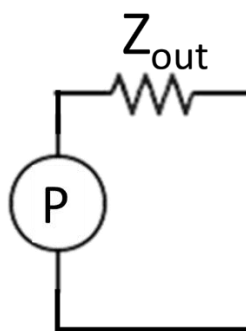


Figura 20. Representación eléctrica de una persona sola.

Un circuito abierto no produce flujo, por lo que la energía potencial que es capaz de generar la fuente se queda en ella sin poder salir. Esto si se considera a las personas exclusivamente como fuentes sonoras. Pero ya se puede ir adelantando que esto podría influir en la energía total que esta persona tiene o genera. Una aplicación extrema de esta situación es el ermitaño, quien, por decisión propia, no tiene contacto con individuos de su misma especie. Eventualmente se podrá analizar el beneficio o daño que puede involucrar esto, no obstante, una fuente eléctrica que jamás es conectada a algo probablemente permanezca intacta, pero sin aportar en el propósito para el cual fue construida.



Psiquismo Humano

El oído es uno de los sentidos que actúa como sensor a estímulos del medio en el que se mueve el individuo. Ya se mencionaron los otros sentidos que aportan con otro tipo de información, incluyendo los sentidos internos llamados cenestesia y kinestesia (Silo, 2003). Estos últimos, resultan ser un conjunto de aparatos que permiten obtener las sensaciones del intracuerpo. Entre ellos se tienen barorreceptores, termorreceptores, corpúsculos musculares, entre otros. El oído es un sentido especial debido a que también capta sonido del intracuerpo y además aporta con la sensación de equilibrio a través de los conductos semicirculares del oído interno.

A través de estas interfaces el cuerpo humano recibe los estímulos del extra e intracuerpo. Los datos de los sentidos, sensación, son recibidos por la conciencia y la memoria simultáneamente. La conciencia inquiere información a la memoria acerca del dato. A su vez, memoria entrega datos arbitrarios a conciencia que permitan cotejar y determinar si el estímulo es o no reconocible. La sociedad conciencia-memoria elabora una representación, síntesis simbólica que se sucede en el espacio de representación. A partir de ellas se elaboran respuestas que son conducidas a través de los centros de respuesta con la directa función de reconstituir el equilibrio perdido debido al estímulo. Los centros son: el vegetativo, el motriz, el emotivo y el intelectual. Al ejecutar la respuesta hay una realimentación debido a que la respuesta se convierte en estímulo capturado por alguno o varios sentidos a la vez produciendo el fenómeno del registro (Silo, 2003).

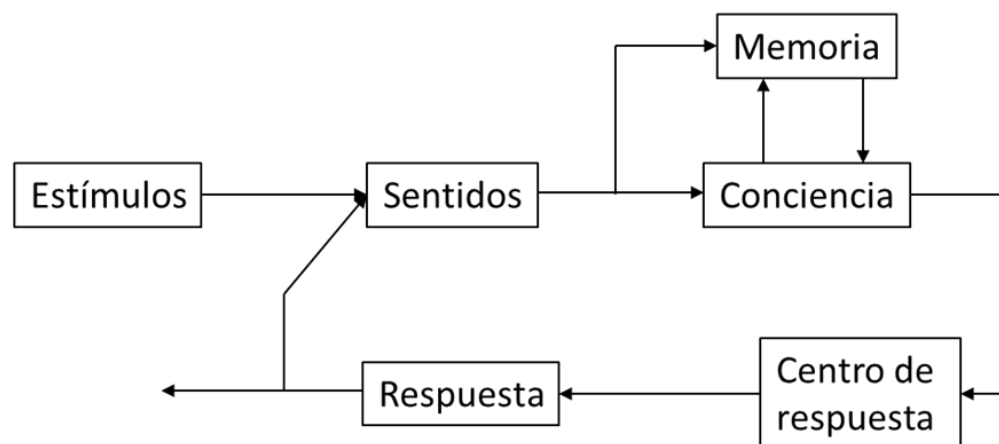


Figura 21. Esquema del psiquismo humano

Los centros de respuesta, a diferencia de los sentidos no son posibles de asociar a algún órgano específico del cuerpo, así como tampoco existe consenso acerca de dónde está la conciencia. Sin embargo, su existencia se suele asociar a ciertos puntos como lo muestra la figura 22.

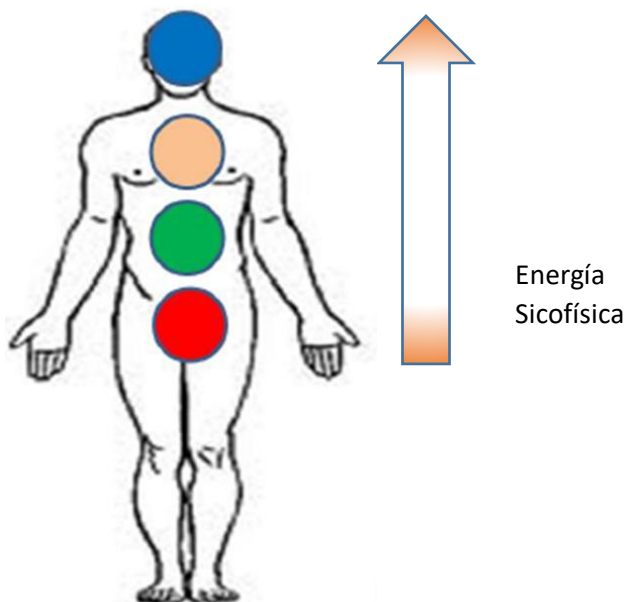


Figura 22. Ubicación simbólica de los centros de respuesta. Rojo: vegetativo; verde: motriz; rosa: emotivo; celeste: intelectual.

La ubicación del centro vegetativo en el bajo vientre está relacionada con que este centro está muy ligado al centro sexual desde donde se puede regenerar la energía sicofísica necesaria para hacer funcionar la máquina. La ubicación del centro motriz en el abdomen es porque en esa ubicación se encuentra el centro geométrico del cuerpo. Históricamente se ha asociado el sentir a la emoción y ésta al corazón, por lo tanto, el centro emotivo estaría alojado en el pecho donde funciona el corazón. Finalmente, el centro intelectual, responsable de las respuestas pensadas es asociado a la cabeza y en particular al cerebro. Esto es coincidente con la ideación de los chacras propios de algunas culturas orientales, aunque con algunas diferencias que no vienen al caso precisar.

Todo este mecanismo necesita de energía para poder funcionar. Se le llama energía sicofísica. Esta energía es tomada desde el medio a través del alimento, la luz solar, el aire que se respira y también desde el interior a través del centro sexual, una subparte del centro vegetativo y se regula a través del descanso y el sueño. También se puede controlar a través de simples y a veces complejos ejercicios de meditación. La energía sicofísica es la que permite que cada individuo se desplace e interrelacione con su entorno incluyendo otros individuos de la misma u otra especie.

La energía es consumida desde el centro vegetativo hasta el centro intelectual, siendo el primero el más rápido en responder y el último el más lento (Amman, 1991). A veces se producen bloqueos de energía por mal funcionamiento de algunos de estos centros o por un sobre trabajo de ellos. Por ejemplo, cuando la persona se ha alimentado contundentemente, es difícil realizar actividades intelectuales porque la mayor parte de la energía se está consumiendo en el proceso digestivo. Esto supone menos oxígeno en el cerebro lo que provoca cuadros de somnolencia o definitivamente de sueño. Algo similar sucede si se realiza una actividad física tal como correr, jugar tenis o nadar. Un ejemplo de mal funcionamiento sería una enfermedad que ataca directamente al centro vegetativo como un problema digestivo o la migraña. Una gran felicidad, pena o rabia hacen que el centro



emotivo consume toda la energía. Como la energía se consume desde el centro inferior al superior, cuando se produce un bloqueo se recomienda activar el centro inmediatamente inferior para reanudar el flujo normal (Silo, 2003). Un caso relacionado con esto es que, frente a una gran pena, lo mejor sería poner en movimiento al cuerpo. Esto es, activar el centro motriz. Así lo recomiendan los expertos para casos tan complejos como la depresión. Frente a un bloqueo mental, propio de los procesos de aprendizaje, basta con hacer una pausa y escuchar música o ver una película y estimular el centro emotivo.

Como se mencionó anteriormente y como lo muestra la figura 20, al funcionar el centro de respuesta, la respuesta es percibida por uno o varios sentidos simultáneamente. Este fenómeno recibe el nombre de realimentación, presente también en los circuitos electrónicos. Cuando el estímulo captado por el sentido llega a memoria, esta lo graba, pero también graba la respuesta que provocó dicho estímulo. Como el primero en reaccionar es el centro vegetativo y luego el motriz, la grabación más intensa es cenestésico-kinestésico, sintiéndose en el cuerpo completo. De hecho, existen estudios en los cuales se ha descubierto que los recuerdos son capaces de generar las mismas sensaciones que un estímulo externo captado por primera vez. He ahí el concepto de recordar que viene de *cordare* (corazón) y *re* (otra vez). Esto implica que recordar consiste en volver a sentir. Todo esto ayudado por la estimulación de neurotransmisores que fluyen por el sistema nervioso y que aparentemente serían los causantes de las sensaciones de placer-displacer y tensión-relajación (Varela, 2009).

Así como la energía eléctrica, la energía sicofísica no solo se transmite por conducción (unión física entre dos elementos) sino también por radiación (no habiendo contacto físico). De hecho, la física cuántica ha puesto en duda que los objetos de verdad estén en contacto alguna vez por lo que existiría sólo la transmisión por radiación. La energía que hace funcionar al cuerpo y la mente está presente más allá de los límites corpóreos.

Esa energía está presente en todo ser vivo, incluyendo especies del mundo vegetal y animal. Dicha energía es invisible, aunque hay personas que aseguran verla, debido a que está por debajo la franja sensorial de la visión. No obstante, los visores nocturnos infrarrojos usados por servicios militares y policiales demostrarían que las personas son eminentemente seres energéticos. Claro está, que esto es coincidente con la teoría de la física que asegura que la materia no es más que energía concentrada en un espacio muy pequeño.

Esa energía es más intensa en las extremidades cuales terminales eléctricos de los elementos de circuitos. Estos son las palmas de las manos y las plantas de los pies. Probablemente esto es debido a la gran densidad de vasos sanguíneos y terminales nerviosas que alojan ahí. Esa sería la raíz de algunas prácticas quirománticas como el Reiki o la imposición de manos en los cuales un agente colabora con la recomposición del flujo de energía normal de otro individuo.

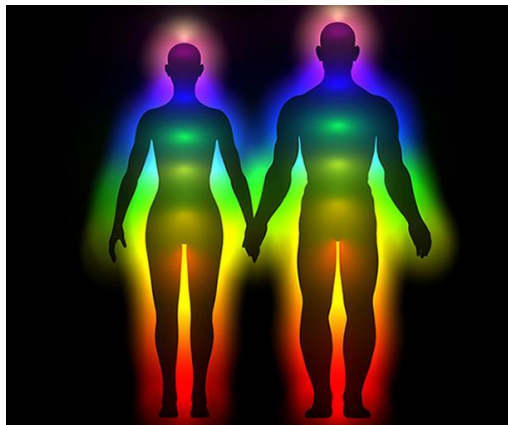


Figura 23. Representación de la energía que emana del cuerpo humano.



Figura 24. La energía sicofísica en las manos es muy intensa.

Cuando una persona acerca sus manos al cuerpo de otra, transmite su propia energía y recibe la energía del otro produciendo una perturbación en el receptor. Pero no solo eso, el cuerpo está constituido de células, las células de moléculas, las moléculas de elementos químicos, los elementos en átomos, los átomos en partículas subatómicas como electrones y protones. Estos, como ya se mencionó al principio de este documento, poseen una carga eléctrica. El campo eléctrico radia energía. Las partículas subatómicas de los átomos de las dos personas que se enfrentan producen una diferencia de potencial, por lo que el tacto no es más que un sentido que capta el sinnúmero de descargas eléctricas entre los electrones de los átomos de las dos personas como si fuera un arco eléctrico.

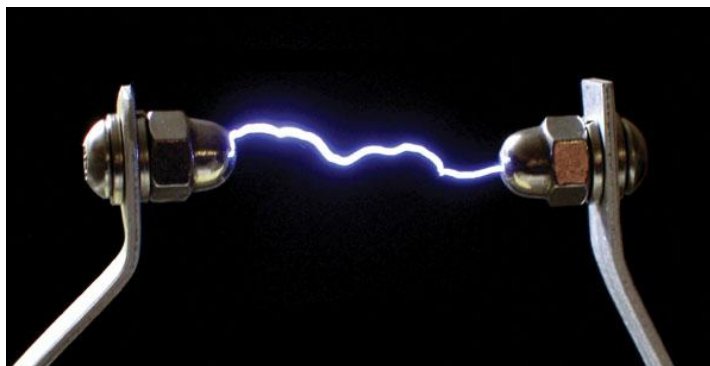


Figura 25. Arco eléctrico generado entre dos electrodos.

Los estímulos entonces generan un efecto en el cuerpo que se siente, principalmente por el sentido de la cenestesia. Hay sensaciones expansivas y otras contractivas.

Esta energía está presente en todos los seres vivos y en la medida que estos se relacionan hay intercambios de dicha energía. Hay estudios que demuestran la influencia en el crecimiento de plantas y árboles de tratos amables de parte de las personas que las cuidan. Así también pasa con las mascotas. Algunos creen que esa energía también queda en la materia inerte y esa sería la razón por la que los hogares se cargan positiva o negativamente.

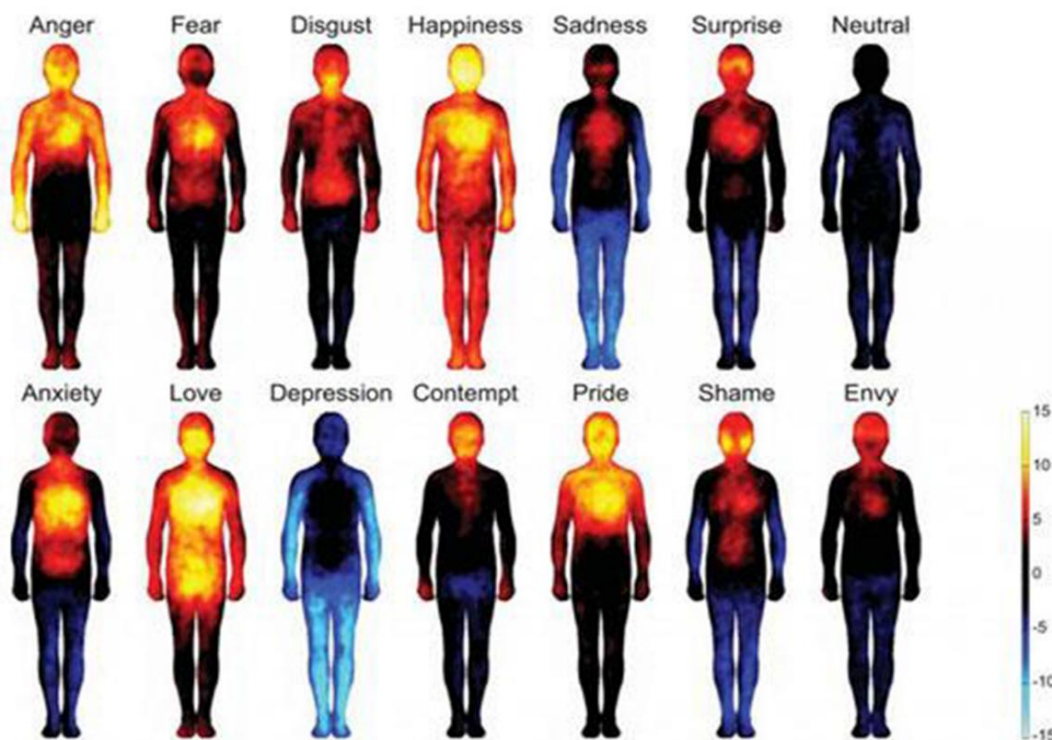


Figura 26. Localización de la sensación corpórea de acuerdo a respuestas emotivas.



En 2014 un grupo de científicos presentaron un trabajo en cual se muestra un mapa de las emociones y como se sienten en el cuerpo. En la figura 26 se aprecia que el sentimiento de felicidad (happiness) es el más expansivo. Abarca todo el cuerpo con gran intensidad. En segundo lugar, se sitúa el amor (love), el sentirse enamorado. La contraparte es la depresión que se representa en una imagen con colores muy fríos y la tristeza (sadness). El enojo (anger) concentra una sensación muy intensa en el torso y la cabeza, similar al del miedo (fear), siendo en este caso menos intenso (Nummenmaa, Glerean, Hari, and Jari Hietanen, 2014).

La felicidad convierte a las personas en fuentes muy potentes y con una impedancia de salida muy baja y una de entrada muy alta. Esto es, proclives a dar y recibir. Por el contrario, la tristeza y la depresión crean una carga pesada que solo consume, casi como cortocircuito.

Hay personas que consumen mucha energía a otros. Son aquellos que viven exigiendo atención absoluta creando círculos de dependencia fuertes. Esto incluye la dependencia del ser humano en las etapas vitales extremas, esto es la infancia y la vejez. Con sus diferencias, estas etapas se caracterizan por generar círculos de dependencias en los más cercanos. Pero hay otros casos que se salen de estos marcos. Estas personas que siempre buscan el beneficio propio y son incapaces de empatizar con el otro, pero exigen empatía hacia ellos. Ellas serían personas con una impedancia de entrada muy baja y una impedancia de salida muy alta. Como receptores tienden a sobrecargar a toda fuente cercana y como fuente se comportan como fuentes muy poco potentes cuya energía de realimentación hacia otros es exigua.

Por otro lado, hay personas muy generosas y altruistas que están pensando permanentemente en dar y, mientras a más personas alcancen, más se satisfacen. El problema es que tienden a sobrecargarse. Se hacen cargo de los males del mundo. Esto es toda una comunidad de elementos en paralelo. Finalmente terminan complaciéndose con los frutos de sus actos. La realimentación resulta una necesidad. Estas personas tendrían una impedancia de salida baja y se comportan como una buena fuente, mientras no se cortocircuiten. Pero son malos receptores porque su impedancia de entrada también es baja. Su dependencia no es con personas específicas sino con el conjunto de personas que pretenden ayudar y las respectivas acciones que ejecutan y cuyos resultados son de gran interés para ellas.

Hay personas que usan el concepto de resistencia para referirse a aquello que les impide hacer algo. La mayor de todas las resistencias es el temor y sus subproductos como el pudor, la vergüenza, el orgullo, entre otros. Todas manifestaciones de debilidad. Temor a la muerte, a la soledad, a la pobreza, a la enfermedad, al fracaso. Temor a no satisfacer las expectativas y paradójicamente también a cumplirlas. Se teme a que no se cumplan los deseos y se teme a que se cumplan. Se ha crecido en una sociedad donde el temor predomina porque es una sociedad organizada a partir de la posesión. Cuando los homínidos, ancestros de la especie homo sapiens sapiens eran unos simples vagabundos nómades, no tenía posesiones y por ende no tenía temor de perderlas. Todo cambió cuando comenzó a organizarse con otros y surgieron los asentamientos dada la dificultad creciente de trasladarse junto con individuos más débiles. Fue ahí cuando se apropiaron de cuevas para guarecerse de las bestias y de las inclemencias del clima. Esa cueva se transformó en algo apetecible por otros grupos, quienes no escatimaban recursos para arrebatarlas. Mientras unos la pretendían, los otros la defendían con fiereza. Esos son los inicios de la propiedad privada.



Consecuencia de esto es la desconfianza, el otro se convierte en una amenaza, en alguien que desea potencialmente lo que se tiene.

El resentimiento es otro registro cuya raíz es la misma. Es difícil romper con la lógica del resentimiento porque el orgullo lo impide. Sin embargo, la reconciliación no es un ejercicio que necesite de la presencia del otro. Basta con quitarle la chapa de culpabilidad a ese otro y a uno mismo para quitarle la carga negativa a un determinado acto.

Por otro lado, la honestidad, el respeto por uno y los demás, la tolerancia son atributos que permiten mayor conectividad.

Al parecer, el funcionamiento óptimo es de reciprocidad. Esto es dar y recibir eficiente y efectivamente. Para ello se debe tener una impedancia de salida baja y una impedancia de entrada alta. La impedancia de salida baja facilita el ejercicio de dar y la impedancia de entrada alta facilita el acto de recibir. Pero, hay que evitar la sobrecarga que produce saturación y finalmente el colapso como fuente por falta de potencia o como carga recibiendo toda la descarga de un cortocircuito.

La pregunta fundamental es ¿Cómo trabajar con una impedancia de salida baja y una impedancia de entrada alta? Al parecer la respuesta está en los actos unitivos.

La Unidad interna

Los actos unitivos son aquellos que resultan de aplicar la coherencia interna y externa en todo lo que se hace y con todos. La coherencia interna tiene que ver con la sintonía entre el sentir, el pensar y el actuar. Se piensa lo que se siente y se hace lo que se piensa. La coherencia externa tiene relación con los demás y está regida por la regla de oro “Trata a los demás como quieres que te traten” (Silo, 2007). No es la una o la otra sino ambas simultáneamente. Los actos unitivos fortalecen, son expansivos. Amplifican la fuerza que puede llegar a generar y controlar una persona. Por el contrario, están los actos contradictorios. Estos son la antítesis de los actos unitivos y son contractivos y desintegradores. El acto contradictorio debilita y consume.

Para una sociedad realmente humana se requiere que los individuos sean fuentes potentes y eficientes que puedan transferir la energía a otros y recibir la energía de otros. Se necesitan fuentes de voltaje, esto es que generan una fuente independiente de lo que le conecten siempre y cuando las condiciones de carga estén dentro de los límites aconsejables. Es por eso que convendría aplicarse en el medio inmediato. Los actos unitivos tienen un alto poder pedagógico y didáctico. Se aprenden de quien generosamente los muestra.

Hay una forma de controlar la fuerza que genera este campo energético (Silo, 2007). Esa forma está relacionada con prácticas ancestrales y tienen que ver con la meditación trascendental. Esa fuerza puede llegar a ser tal que la energía se podría desconectar del cuerpo que la contiene. Algo así como una señal moduladora que se fusiona con una portadora más potente para poder transmitirla, como las señales de radiofrecuencia. En alguna parte puede haber un circuito demodulador que bota la portadora porque ya cumplió con su propósito que es la de contener la información realmente útil, la cual sería la señal moduladora continuando el proceso. El desdoblamiento sería un ejemplo de cómo esa energía se podría materializar en otro lugar y otro tiempo distinto del que ocupa el ente corpóreo.



El campo energético, para algunos es la llamada alma, la cual se va fortaleciendo gracias a los actos unitivos que el individuo acumula durante su vida. Un nivel superior de desarrollo de esa “alma” es el “espíritu”, que tiene la particularidad de poseer mayores niveles de libertad. Sus efectos se transmiten día a día en todo lo que se toca o roza y como es producto de la acumulación de actos unitivos, es una fuerza expansionista que contagia con alegría y amor. La trascendencia del ser no es sólo recuerdos y actos que siguen desarrollándose, sino registros cenestésicos de bienestar que van haciendo que todos vayan realizando actos unitivos, aunque la fuente no vea los resultados de su poder.

Partículas subatómicas forman átomos, átomos forman elementos, elementos forman moléculas, moléculas forman compuestos, compuestos forman células, células forman tejidos, tejidos forman órganos, órganos forman sistemas orgánicos, sistemas orgánicos forman organismos, organismos forman comunidades, comunidades forman especies, especies forman ecosistemas, ecosistemas forman planetas, planetas forman sistemas planetarios, sistemas planetarios forman galaxias, galaxias forman universos. Todo está integrado, todo en ello fluye, todo en ello vibra en permanente movimiento. Una energía, una sola fuerza, esa fuerza que se manifiesta en cada uno y en todo.

Pareciera interesante aplicar las leyes de la física para comprender el cómo se relacionan las personas, sin embargo, es plausible considerar que las leyes de la física no son más que interpretaciones del mundo interno formado y desarrollado a través de miles de años de evolución de un ser que cree haber descubierto fenómenos y leyes universales cuando en realidad las ha ido formulando de a poco cuan ser creador y transformador de sí mismo y su entorno. Esta evolución sigue en proceso, es un continuo que no para y como lo dice la ley de la termodinámica la energía no se crea ni se destruye sólo se transforma y como seres energéticos no hay más remedio que seguir transformándose.

Bibliografía

Basilio Pueo, Miguel Romá, 2003. Electroacústica, Altavoces y micrófonos. Pearson Prentice hall. Madrid.

Francisco Varela, 2009. Dormir, soñar y morir. Gaia Ediciones. Madrid.

Gary Davis, Ralph Jones, 1991. The sound reinforcement handbook. Hal Leonard Publishing Corporation. USA.

Higini Arau, 1999. El ABC de la acústica arquitectónica. CEAC Ediciones. Barcelona.

Lauri Nummenmaa, Enrico Glerean, Riitta Hari, and Jari Hietanen, 2014. “Bodily maps of emotions”, Proceedings of the National Academy of Science of United State of America. USA.

Leo Beranek, 1993. Acoustics. Acoustical Society of America. USA.

Luis Amman, 1991. Autoliberación. Plaza y Valdés Editores. México

Robert Boylestad, 2011. Introducción al análisis de circuitos. Pearson-Prentice hall. México.

Silo, 2003. Apuntes de psicología. Virtual Ediciones. Santiago de Chile.

Silo, 2007. El Mensaje de Silo. Ulrica Ediciones. Rosario-Argentina.