

VULNERABILIDAD SISMICA DE LOS SISTEMAS VITALES

Ing. William Vargas M.¹
Ing. José B. Sandoval S.²

RESUMEN

Se definen los elementos básicos para el análisis de riesgo sísmico de sistemas vitales: la evaluación de la amenaza y la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Se pone énfasis en la evaluación de la vulnerabilidad, tanto física como funcional. Se analizan los efectos de los sismos sobre los principales componentes de los sistemas vitales (estructuras, tuberías, equipos) y su vulnerabilidad física. Se destacan las características más importantes en la evaluación de la vulnerabilidad funcional.

ABSTRACT

Basic elements of seismic risk analysis of lifelines and critical facilities are defined: assessment of seismic hazard and assessment of seismic vulnerability. Emphasis is given to assessment of vulnerability, both physical and functional. Effects of earthquakes upon the main components of lifelines and critical facilities (structures, pipelines and equipment) and their vulnerability are analyzed. The most important features of lifelines in the assessment of functional vulnerability are underlined.

1. DEFINICIONES

1.1 Sistema vital:

Se entiende por sistema vital toda infraestructura cuya función es esencial para la vida de la población y el desarrollo económico de una ciudad o región y cuya importancia es fundamental en caso de desastre. Se incluyen en esta categoría todos los sistemas de suministro de servicios públicos (agua, electricidad, comunicaciones, evacuación y recolección de desechos), la infraestructura de transporte (terrestre, aéreo y marítimo), los centros de salud (hospitales) y seguridad (especialmente estaciones de bomberos).

1.2 Clasificación:

De acuerdo con sus dimensiones, los sistemas pueden ser clasificados en instalaciones críticas y líneas vitales.

Las **instalaciones críticas** son sistemas discretos, de extensión limitada dentro o cerca de las ciudades, tales como hospita-

¹Investigador, Laboratorio de Ingeniería Sísmica
Universidad de Costa Rica

²Profesor, Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica

les, aeropuertos y estaciones de bomberos. Las instalaciones críticas dependen de otros sistemas de servicios para su funcionamiento bajo condiciones normales.

Las **líneas vitales** son sistemas continuos, cuyas dimensiones superan las de las ciudades a las cuales suministran servicios. Dentro de las ciudades, las líneas vitales forman una red compleja que abarca toda la extensión de las mismas. Fuera de las ciudades, las líneas vitales son los ejes de transmisión de un producto o servicio desde el lugar de origen o fuente, a través de los elementos que los transforman para su consumo, hasta su destino en la ciudad. Son líneas vitales el suministro de agua potable, de electricidad, el alcantarillado sanitario, las carreteras y los sistemas de telecomunicaciones.

1.3 Componentes de los sistemas vitales:

Los principales componentes de los sistemas vitales son las estructuras y el equipo. También las tuberías son un componente común en líneas vitales.

Las **estructuras** son los centros de operación, producción, transformación, transmisión y distribución de los sistemas vitales. El concepto de estructura se emplea aquí para describir las obras ingenieriles con extensión limitada, que puedan representarse como elementos puntuales en un análisis de redes. Las estructuras más comunes en los sistemas vitales son las edificaciones, principales componentes de las instalaciones críticas, los puntos terminales y los nudos de líneas vitales, las represas, las torres y los puentes.

El **equipo** es un componente de gran importancia en los sistemas vitales, especialmente en las líneas vitales de producción y suministro de electricidad, de telecomunicaciones y en las instalaciones críticas. La computarización de muchos sistemas de control hace aumentar vertiginosamente la cantidad e importancia de este componente en los sistemas vitales actuales. Las características del equipo varían de un sistema a otro. Existen equipos que necesariamente tiene grandes dimensiones y son básicamente mecánicos, tales como las turbinas para generación de electricidad y las bombas de los acueductos, y equipos totalmente computarizados y de dimensiones reducidas, como los de telecomunicaciones. Algunas características importantes del equipo serán revisadas en el apartado sobre vulnerabilidad.

Las **tuberías** son un componente común de las líneas vitales de suministro de agua potable, recolección de aguas pluviales y aguas servidas, gasoductos, oleoductos y telecomunicaciones. También son de gran importancia dentro de los hospitales, en donde constituyen la red de distribución de servicios básicos, tales como agua, vapor y gases.

Las tuberías de líneas vitales son de grandes dimensiones (en diámetro y longitud) y están colocadas casi en su totalidad en contacto con el suelo, enterradas o sobre la superficie y en pocos casos sobre estructuras de soporte. Las tuberías de las instalaciones críticas son de dimensiones menores y están dentro de las edificaciones, usualmente en contacto con elementos estructurales o dentro de los mismos.

1.4 Los sistemas vitales como redes:

Las líneas vitales y los sistemas de abastecimiento de las instalaciones críticas pueden ser analizados mediante las teorías de redes. Para esto, es necesario clasificar los componentes en puntos terminales, nudos y eslabones, definir sus propiedades, relaciones, y modelar el funcionamiento de la red, de los diferentes procesos que se llevan a cabo y los estados posibles del sistema.

Puntos terminales son los de entrada y salida o inicio y fin de la red, tales como las fuentes de abastecimiento y tanques de almacenamiento de agua, centros de generación de electricidad, los puntos de descarga de aguas residuales, etc.

Los **nudos** son los puntos intermedios donde se unen dos o más elementos de la red o se llevan a cabo procesos que afectan las características de operación o del flujo) tales como las estaciones de bombeo y tanques reductores de presión de los acueductos, las subestaciones eléctricas, etc.

Los **eslabones** o vínculos de la red son los elementos existentes entre los puntos terminales y los nudos intermedios, tales como las líneas de transmisión eléctrica, las tuberías de acueductos, gasoductos y oleoductos, las vías terrestres, etc.

En la figura 1 se presenta un esquema general de una línea vital, con indicación de los elementos que conforman la red.

Además, en las ciudades existe una **red de distribución** que lleva el servicio a todos los usuarios. A diferencia de la red general, las redes de distribución son usualmente cerradas. Las líneas de telecomunicaciones son redes de distribución que carecen de una red general y los sistemas de abastecimiento de agua, gas y electricidad en instalaciones críticas son redes locales dentro de las redes de distribución de estos sistemas vitales.

2. RIESGO SISMICO DE SISTEMAS VITALES

2.1 Riesgo sísmico:

El riesgo sísmico ingenieril es la probabilidad de que los efectos de la actividad sísmica alcancen y/o excedan un nivel de severidad predefinido y se produzcan pérdidas económicas y/o daños en la infraestructura, dentro de un período también predefinido. El desarrollo de la ingeniería estructural sismorresistente es producto del esfuerzo histórico por reducir el riesgo a niveles aceptables económicamente.

El cálculo del riesgo sísmico se basado en la **evaluación de la amenaza sísmica** y la **evaluación de la vulnerabilidad** de la infraestructura frente a esa amenaza. En consecuencia, tiene un enfoque multidisciplinario que involucra a la geología, la sismología, la geotecnia y la ingeniería estructural.

2.2 Evaluación de la amenaza sísmica:

La evaluación de la amenaza sísmica es el cálculo de la probabilidad de excedencia de niveles preestablecidos de severidad en los efectos de la actividad sísmica, para diferentes intervalos de tiempo, denominados **períodos de retorno**. Alternamente, se puede definir la evaluación de la amenaza

sísmica como el cálculo del nivel de severidad de los efectos de los sismos para valores de probabilidad de excedencia y períodos de retorno preestablecidos.

Para evaluar la amenaza sísmica es fundamental la escogencia de los efectos de los sismos que pueden causar daños. En general, los daños en construcciones son efecto de la propagación de las ondas sísmicas, especialmente de ondas "S" (superficiales). Sin embargo, los efectos de los sismos sobre los suelos, tales como los deslizamientos de tierra, la licuefacción, el fallamiento superficial y otros también pueden producir graves daños en la infraestructura.

El movimiento vibratorio del terreno, causado por la propagación de las ondas sísmicas puede ser caracterizado mediante parámetros cualitativos y cuantitativos. Entre los parámetros cualitativos el más empleado es la intensidad. Las diferentes escalas de intensidad existentes, tales como la de Mercalli, asignan un valor numérico a la severidad observada en los efectos de los sismos. Sin embargo, aunque la intensidad sea un valor numérico, no deja de ser una descripción basada en una clasificación generalizada de los efectos sobre el comportamiento de las personas, las construcciones y el terreno.

Los parámetros cuantitativos son de mayor utilidad y se basan en el registro o medición directa de las ondas sísmicas. La severidad de los efectos desde esta perspectiva puede ser relacionada con la amplitud máxima del movimiento medida en las aceleraciones, velocidades y desplazamientos, con el contenido de frecuencias predominante de las ondas, y con la duración del movimiento fuerte. El parámetro que mejor describe la severidad de los efectos no es el mismo para todos los tipos de construcciones sino que depende de las propiedades dinámicas de las mismas.

Para caracterizar la severidad de los efectos de un sismo se debe escoger el parámetro que la represente mejor de acuerdo con el objeto del estudio de riesgo sísmico. Aunque el uso de un único parámetro puede conducir a generalizaciones inconvenientes, para el análisis de riesgo sísmico de estructuras aisladas tradicionalmente se ha empleado la aceleración máxima del terreno. Para sistemas vitales, sin embargo, no es posible escoger un único parámetro, como se expondrá posteriormente.

La evaluación de la amenaza sísmica se realiza con base en el procedimiento siguiente:

1. Identificación y delimitación de las fuentes sísmicas.
2. Caracterización probabilística de la actividad de cada fuente sísmica.
3. Caracterización de la atenuación espacial de los efectos de la actividad en términos de los parámetros escogidos.
4. Integración en el tiempo y el espacio de los efectos de la actividad de cada una de las fuentes.

Con base en la evaluación de la amenaza sísmica se puede establecer una zonificación sísmica, es decir, una delimitación de zonas de acuerdo con el nivel esperado de severidad en los efectos de los sismos.

La zonificación sísmica se basa en condiciones globales y no toma en cuenta, generalmente, las condiciones locales del terreno, que pueden modificar sustancialmente el nivel de severidad de los efectos. En suelos blandos, en suelos granulares saturados y otros, puede ocurrir la amplificación del movimiento y el consiguiente aumento del nivel de severidad.

La microzonificación sísmica incorpora la influencia de las condiciones locales del suelo sobre el nivel de severidad diagnosticado por la zonificación sísmica. La dinámica de suelos y la geotecnia son las disciplinas que estudian la modificación de las señales sísmicas que producen las condiciones locales del suelo.

Para que un estudio de riesgo sísmico de los sistemas vitales sea completo debe alcanzar el nivel de microzonificación en la evaluación de la amenaza, ya que los mayores daños históricamente han ocurrido en zonas con problemas en las condiciones locales del suelo, como se expondrá posteriormente.

2.3 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica:

La vulnerabilidad sísmica es la medida de la capacidad para soportar sismos.

La vulnerabilidad sísmica de los sistemas vitales debe ser evaluada en dos niveles claramente diferenciables: el físico y el funcional.

La vulnerabilidad física es la medida de la capacidad de un sistema para soportar sismos sin sufrir daños materiales. Dentro de la ingeniería estructural se ha desarrollado un campo específico para la evaluación de la vulnerabilidad física de estructuras y de los materiales más aptos.

Entre las propiedades que determinan la vulnerabilidad física se encuentran las siguientes:

- resistencia o capacidad para soportar esfuerzos,
- flexibilidad o capacidad global para deformarse,
- ductilidad o capacidad de los materiales para deformarse sin perder resistencia, y
- resiliencia o capacidad para disipar energía suministrada en ciclos repetitivos.

La vulnerabilidad funcional es la medida de la capacidad de un sistema para soportar sismos sin perder su función. Es claro que esta capacidad depende en gran medida de la propia vulnerabilidad física, pero existen otras propiedades importantes del sistema que definen la vulnerabilidad funcional, entre ellas:

- sensibilidad o capacidad de funcionar bajo condiciones no óptimas y/o degradadas de los componentes,
- dependencia interna (entre componentes del sistema) y externa (entre dos o más sistemas),
- interacción interna (entre componentes) y externa (entre sistemas), y
- la redundancia o existencia de formas múltiples para realizar una misma función.

La dependencia es característica de los sistemas en serie y la redundancia de los sistemas en paralelo.

La vulnerabilidad física de un sistema vital puede ser

evaluada en términos de la vulnerabilidad de sus componentes aislados. La evaluación de la vulnerabilidad funcional requiere de un análisis del sistema como red.

2.4 Vulnerabilidad física de componentes comunes de sistemas vitales:

Los efectos del movimiento vibratorio sobre los componentes de los sistemas vitales son varios:

- Las estructuras son sometidas a esfuerzos y deformaciones que son proporcionales a la amplitud de las ondas y que en algunos casos pueden sobrepasar los límites para los cuales fueron diseñadas y causarles daños o fallas. La vulnerabilidad física de una estructura es mayor para las ondas cuyas frecuencias coincidan con su frecuencia natural de oscilación, por la ocurrencia de resonancia. El comportamiento de una estructura sometida a vibraciones sísmicas es el objeto de estudio de una extensa rama de la ingeniería estructural. Se busca el diseño más adecuado para que las estructuras resistan los sismos "menores" sin ningún daño, los sismos "moderados" con daños no estructurales y los sismos "severos" con daños estructurales reparables o simplemente sin colapso, de acuerdo con su importancia.
- Los equipos especializados, de gran importancia para el funcionamiento de las instalaciones críticas y de las líneas vitales de electricidad y telecomunicaciones, sufren los mismos efectos que las estructuras, es decir esfuerzos y deformaciones que pueden producir daños en sus componentes, cuando se encuentran anclados directamente sobre el suelo. Colocados sobre una estructura, los equipos sufren además los efectos de la amplificación del movimiento que esta produce y también puede darse resonancia entre la estructura y el equipo o sus componentes, con efectos muy nocivos. Esto es especialmente importante puesto que la mayoría de los equipos especializados no son diseñados para soportar vibraciones sísmicas y deben ser aislados para su buen funcionamiento. Además, tanto sobre el suelo como sobre una estructura, los equipos pueden sufrir daños por desplazamientos, volcamiento, percusión o colisión si no se encuentran provistos de anclaje y conexiones adecuados.
- Las tuberías que funcionan a presión pueden sufrir por la propagación de ondas de presión de gran amplitud (golpe de ariete), que pueden sobrepasar la resistencia del tubo y causar fallas por aplastamiento o agrietamiento. También pueden sufrir deformaciones y curvaturas que excedan la resistencia como consecuencia del movimiento desfasado entre dos puntos, especialmente cuando el eje de la tubería coincide con la dirección de propagación de las ondas. Sin embargo, estos tipos de daños son relativamente escasos.

- Las tuberías de instalaciones críticas, como las de hospitales, sufren en la medida en que el movimiento de la estructura sobre la cual estén ubicadas exceda la tolerancia y flexibilidad de las uniones entre los tubos y con los equipos de abastecimiento, conversión y consumo.

Las deformaciones permanentes en la superficie del terreno pueden ser causadas por deslizamientos de tierra y licuefacción de suelos granulares. Tales deformaciones también causan daños a los componentes de los sistemas vitales e incluso superan la magnitud de los daños causados directamente por la vibración, especialmente si no fueron previstos por el diseño.

Las líneas eléctricas, los acueductos, los oleoductos y las carreteras interurbanas generalmente están expuestas al peligro de los efectos indirectos de la vibración.

La vulnerabilidad física de las líneas vitales ante las deformaciones permanentes del terreno, es mucho mayor que ante las vibraciones, especialmente las carreteras y las tuberías de acueductos y alcantarillados. Las estadísticas demuestran que los mayores daños en tuberías de líneas vitales han sido causados por deslizamientos de tierra y licuefacción del suelo; también han ocurrido daños importantes como consecuencia del fallamiento superficial. Las deformaciones permanentes capaces de producir daños varían entre algunos milímetros y varios metros, dependiendo de la tolerancia del sistema. Los puntos más vulnerables de las tuberías son las uniones, especialmente las rígidas. Los materiales más vulnerables son los más rígidos y poco dúctiles (frágiles), tales como el hierro fundido y el asbesto-cemento.

En los cuadros siguientes se resume la importancia de los diferentes efectos de los sismos que han causado daños a los componentes de los sistemas vitales en el pasado.

TRATAMIENTO Y SUMINISTRO DE AGUA POTABLE

Componente	Importancia del efecto	
	Vibraciones	Deformaciones
Obras de captación	1	2
Obras de conducción	2	1
Plantas de tratamiento	1	2
Tanques	1	2
Equipo de bombeo	1	2
Red de distribución	2	1

PRODUCCION Y SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD

Componente	Importancia del efecto	
	Vibraciones	Deformaciones
Obras de aprovechamiento de recursos hídricos		
Captación (Represas)	1	2
Conducción	2	1
Centros de generación		
Edificaciones	1	(*)
Equipo	1	(*)
Líneas de transmisión	2	1
Centros de distribución (subestaciones)		
Edificaciones	1	(*)
Equipo	1	(*)
Conexiones con líneas	1	2
Redes de distribución	1	2

RECOLECCION Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Componente	Importancia del efecto	
	Vibraciones	Deformaciones
Redes colectoras (alcantarillados)		
Tuberías	2	1
Pozos	2	1
Plantas de tratamiento		
Tanques	1	2
Edificaciones	1	(*)
Equipo	1	(*)

RED DE TELECOMUNICACION E INFORMACION

Componente	Importancia del efecto	
	Vibraciones	Deformaciones
Edificaciones	1	(*)
Equipo	1	(*)
Torres de transmisión	1	2
Cables aéreos	1	2
Cables enterrados	2	1

VIAS DE TRANSPORTE TERRESTRE

Componente	Importancia del efecto	
	Vibraciones	Deformaciones
Carreteras	(**)	1
Puentes	2	1
Túneles	2	1
Pasos a desnivel	1	2

INSTALACIONES CRITICAS

Componente	Importancia del efecto	
	Vibraciones	Deformaciones
Edificaciones	1	(*)
Equipo	1	(*)

NOTAS:

- 1 Los números designan el nivel de importancia del efecto.
- (*) Los daños causados por deformaciones permanentes del terreno a las edificaciones y el equipo de sistemas vitales han sido mínimos en el pasado. Sin embargo, en caso de ocurrir, superan en magnitud a los daños causados por las vibraciones.
- (**) Las carreteras raramente sufren daños por las vibraciones sísmicas.

2.5 Elementos básicos para la evaluación de la vulnerabilidad funcional de sistemas vitales:

La evaluación de la vulnerabilidad funcional se basa en la identificación de los puntos o componentes críticos del sistema, mediante la aplicación del análisis de redes.

La vulnerabilidad de los sistemas en serie es mayor puesto que la falla de un componente implica la suspensión del flujo dentro de toda la red. El paralelismo o redundancia es, en consecuencia, la propiedad más importante de los sistemas vitales.

La redundancia de un sistema se logra con la duplicidad o multiplicidad de los componentes críticos. Además de existir formas alternas para dar un servicio, los componentes físicos de las diferentes rutas del flujo no deben estar expuestos a la misma amenaza sísmica, puesto que ello aumentaría la vulnerabilidad y eliminaría el nivel de redundancia real del sistema.

En términos generales puede afirmarse que existe poca redundancia en los puntos terminales de inicio de las líneas vitales. Esta situación es condicionada por la naturaleza, dado que los recursos, tales como las fuentes de abastecimiento de agua pota-

ble y los ríos con potencial hidroeléctrico, son escasos y su localización específica.

Otros componentes de las líneas vitales, tales como los ejes de transmisión o eslabones de la red y nudos intermedios, pueden ser localizados con mayor libertad, lo cual reduce la vulnerabilidad funcional del sistema.

La interacción nociva entre sistemas puede ser el resultado de la cercanía física de los componentes. En algunos países es usual que las líneas vitales, como las de electricidad y telecomunicaciones, compartan las estructuras de soporte o el "derecho de paso". Este tipo de interacción puede causar la propagación de daños de un sistema a otro(s).

La existencia de nudos que sean puntos obligados de paso para el flujo reduce la redundancia del sistema. Estos puntos o nudos son relativamente fáciles de identificar dentro de una red.

La vulnerabilidad funcional de los nudos en donde se realizan operaciones sobre el flujo del sistema depende de la existencia de suministros alternos de energía, agua, etc. para el funcionamiento del equipo en caso de emergencia.

La redundancia de las redes de distribución es intrínsecamente alta, que contribuye a reducir su vulnerabilidad funcional en conjunto. Sin embargo, el funcionamiento de todo el sistema puede verse afectado si ocurren interrupciones múltiples, tales como las ocasionadas por rupturas de las tuberías en el acueducto o de los cables en los sistemas eléctricos y telefónicos. Esas interrupciones reducen la capacidad de operación del sistema y retrasan la restauración del nivel normal.

3. CONCLUSIONES

El análisis de riesgo sísmico de los sistemas vitales, de importancia fundamental en la preparación de planes de mitigación, es de mayor complejidad que su equivalente para estructuras aisladas. Para estas últimas existe una metodología desarrollada, que parte del supuesto de que el movimiento del terreno en el sitio es el único efecto de los sismos al cual debe hacerle frente una estructura. Esta simplificación no es válida para los sistemas vitales por las siguientes razones:

1. Las estructuras no son los únicos componentes de los sistemas vitales; también los equipos y las tuberías son componentes importantes.
2. La extensión de los sistemas vitales, especialmente de las líneas vitales, impide la escogencia de único nivel de los efectos de los sismos como representativo de lo que serán las sollicitaciones en todo el sistema.
3. La vibración o movimiento del terreno no es el único efecto de los sismos que afecta a los sistemas vitales; las deformaciones permanentes del terreno son más importantes en muchos casos.
4. La vulnerabilidad física de los diferentes componentes no es suficiente para definir la vulnerabilidad sísmica de todo el sistema; igualmente importante para el funcionamiento resultan otros factores como la redundancia o paralelismo.

5. Las pérdidas económicas pueden ser consecuencia no sólo de los daños materiales, sino también del mal funcionamiento o interrupción de los servicios. Por lo tanto, el análisis de riesgo sísmico de los sistemas vitales debe determinar también la probabilidad de ocurrencia de niveles de severidad en los efectos de los sismos que, sin causar daños materiales, puedan causar pérdidas económicas.

En consecuencia, de acuerdo con la complejidad del sistema que se analice, las teorías de redes deberán ser empleadas dentro de los estudios de riesgo sísmico de los sistemas vitales. Asimismo, dada la importancia de las deformaciones permanentes del terreno, la evaluación de la amenaza sísmica debe ser refinada al nivel de microzonificación, en la cual las condiciones locales adversas queden identificadas.

REFERENCIAS

1. The current state of knowledge of lifeline earthquake engineering. California: Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of the American Society of Civil Engineers, 1977.
2. Hidalgo L., Ileana. "Análisis de vulnerabilidad sísmica en los sistemas del anexo del Hospital Dr. Rafalel A. Calderón Guardia". Informe de Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería: Universidad de Costa Rica, 1984.
3. Jiménez A., Rodrigo. "Riesgo sísmico del Sistema Nacional Interconectado de Electricidad". Informe de Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería: Universidad de Costa Rica, 1982.
4. Lifeline earthquake engineering, the current state of knowledge, 1981. California: Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of the American Society of Civil Engineers, 1981.
5. Los recientes sismos de Chile y México, fuente de experiencia para Costa Rica. San José, Costa Rica: Comisión Nacional de Emergencia, 1985.
6. Murillo A., Orlando. "Evaluación sísmica del Sistema Nacional de Telecomunicaciones en el Valle de Cartago". Informe de Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería: Universidad de Costa Rica, 1984.
7. Social and economic impact of earthquakes on utility lifelines, seismic considerations and lifeline planning, siting and design. California: Construction Division of the American Society of Civil Engineers, 1981.
8. Vargas M., William. "Vulnerabilidad Sísmica de los Sistemas Vitales. Algunas consideraciones sobre el terremoto de Pérez Zeledón, 3 de julio de 1983". Informe de Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería: Universidad de Costa Rica, 1985.

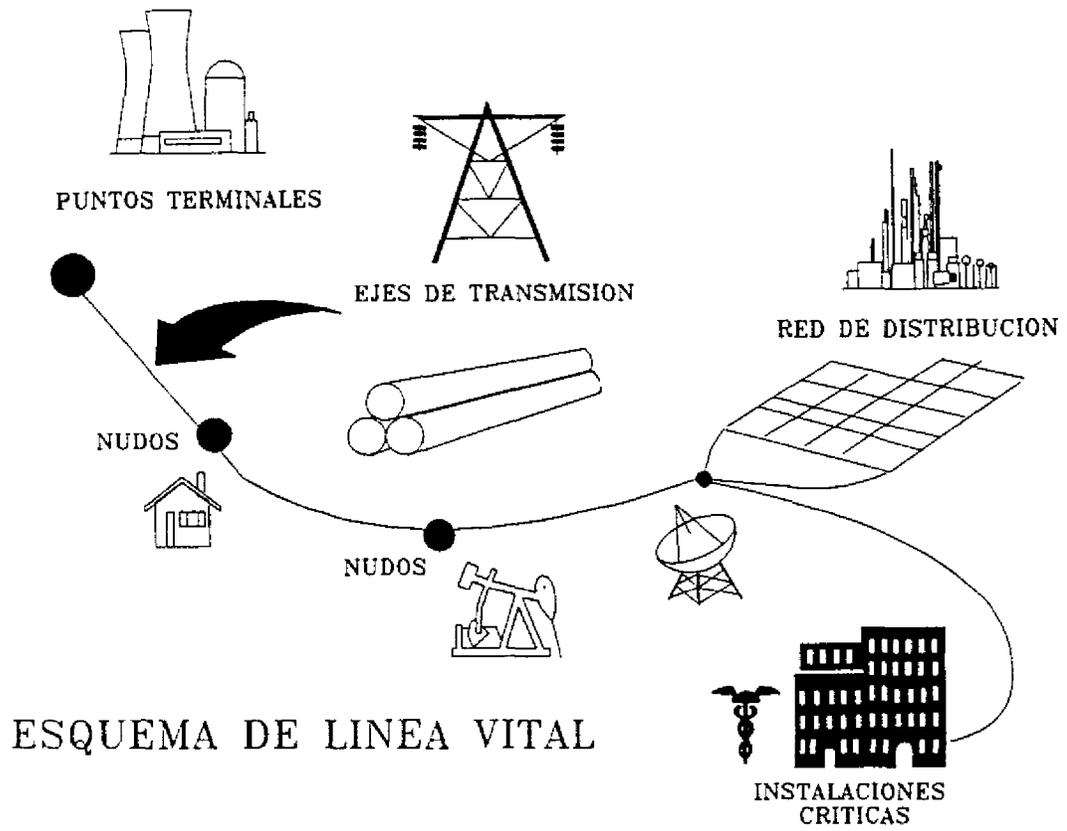


FIGURA 1