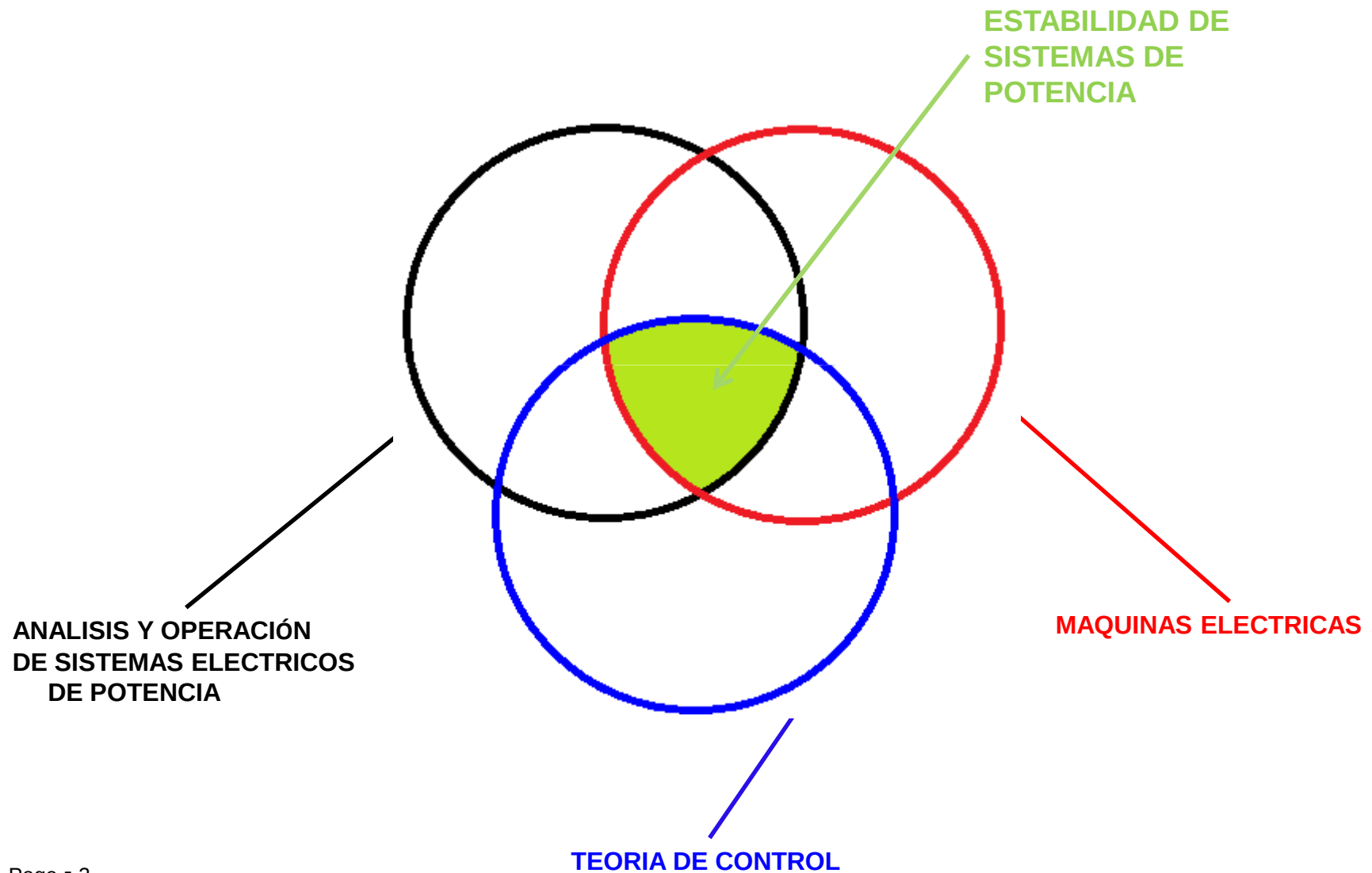




ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

**ROBERTO RAMIREZ ARCELLES
2015**



OBJETIVO

Mostrar al estudiante de ingeniería eléctrica los fenómenos de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, enfatizando en la naturaleza y diferenciando los tipos de estabilidad.

Se muestra el modelamiento de los componentes del sistema de potencia para efectos de los análisis de estabilidad.

Al estudiar cada tipo de estabilidad, se relaciona con los problemas y la experiencia en la estabilidad del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional, así como los estudios realizados y las medidas tomadas.

CONTENIDO

Capítulo 1

- INTRODUCCION, DEFINICIONES Y CONCEPTOS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

Capítulo 2

- MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE POTENCIA EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Capítulo 3

- ESTABILIDAD PERMANENTE

Capítulo 4

- ESTABILIDAD TRANSITORIA

Capítulo 5

- INTRODUCCION A LA ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA

Capítulo 6

- INTRODUCCION A LA ESTABILIDAD DE TENSION

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HEYDT G. T., "COMPUTER ANALYSIS METHODS FOR POWER SYSTEMS", MAC MILLAN PUBLISHING COMPANY, 1986.
2. ELGERD, O. Y., "Electrical Energy Systems Theory: An Introduction", Mc Graw Hill, 1971.
3. BYERLY-KIMBARK, "Power System Stability", IEEE Press, 1975.
4. ANDERSON, P. M. AND FOUAD, A. A., "Power System Control and Stability", Iowa University Press, 1977.
4. VENIKOV, V.A., "Transient Processes in Electrical Power Systems" , MIR, 1980.
5. ARRILLAGA, J. A. AND HARKER, B.J., "Computer Modeling in Electrical Power Systems", John Wiley & Sons, 1984.
6. STAGG, G. AND EL-ABIAD, A.H., "Computer Methods in Power System Analysis", Mc Graw Hill, 1986.
7. P. KUNDUR, "Power System Stability and Control", Mc Graw-Hill, Inc., 1994.
8. R. RAMIREZ, "Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia", Curso Profesional, Colegio de Ingenieros del Perú, Agosto, 1998, 2000 y 2001.
9. R. RAMIREZ, "Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia", Curso Profesional, IEEE Sección Perú, Noviembre 2007.
10. Mediciones de Estabilidad Permanente en el Sistema Interconectado Sur y Centro Norte del SEIN, CESI-COES, Setiembre 2000 y Junio-Noviembre 2002.
11. Mediciones de Estabilidad Permanente en el Sistema Interconectado Sur del SEIN, CESI-COES, 2002.
12. Estudio de Rechazo de Carga/Generación del Sistema Eléctrico Interconectado Peruano, CESI-COES, Julio 2002-Mayo 2003.
13. Estudios de Rechazo de Carga/generación realizados por el COES desde 2004-2014.
14. Experiencia de revisión y aprobación de Estudios de Pre Operatividad y Operatividad de Nuevas Instalaciones , 2006 a la fecha.

CAPITULO 1.

DEFINICIONES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 DEFINICIONES

SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA (SEP)

Es el conjunto de unidades de generación con sus respectivos controladores, transformadores de todos los tipos, líneas de transmisión, cargas, equipos de compensación reactiva (fijos y controlados), equipos de protección y maniobra, etc.

PUNTO DE OPERACIÓN

O condición de operación de un SEP es un grupo de magnitudes que pueden ser medidas o calculadas y que permiten describir o caracterizar al SEP.

CONDICION DE OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DE UN SEP

Es un estado de operación en el cual todas las magnitudes que caracterizan al sistema pueden ser consideradas constantes para propósitos de análisis.

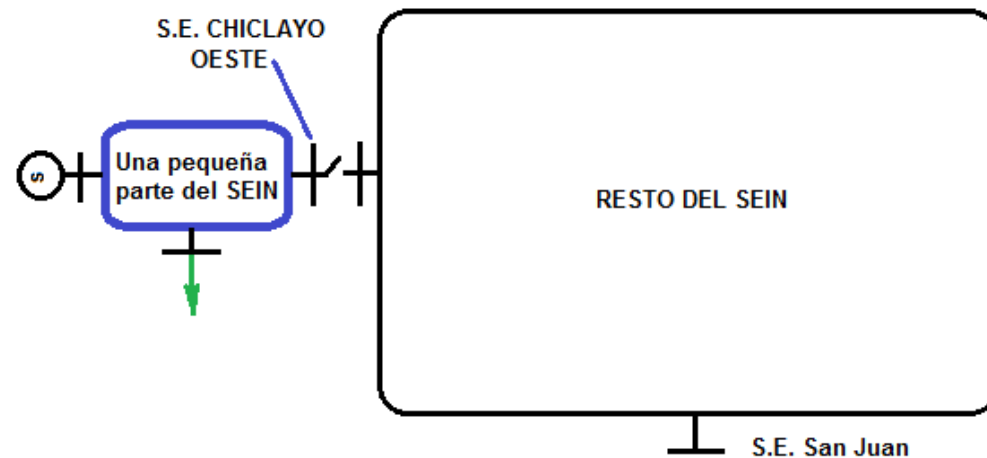
OPERACIÓN SÍNCRONA

Una máquina esta en operación síncrona con la red a la cual esta conectada, si su velocidad angular eléctrica promedio es igual a la frecuencia angular eléctrica de la tensión de la red de alterna.

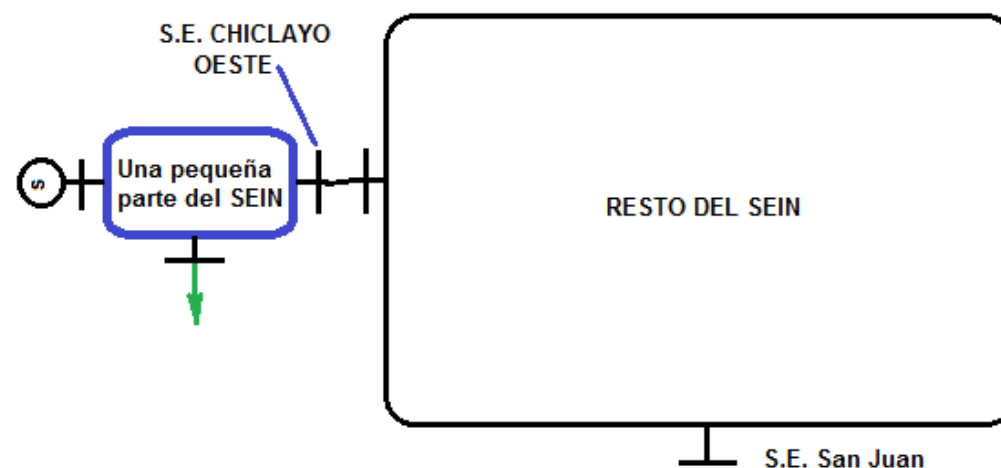
Un SEP esta en operación síncrona si todas sus máquinas síncronas conectadas directamente a la red o mediante un transformador, están en operación síncrona con la red de alterna.



COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA EN UN SISTEMA AISLADO



COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA EN UN SISTEMA INTERCONECTADO



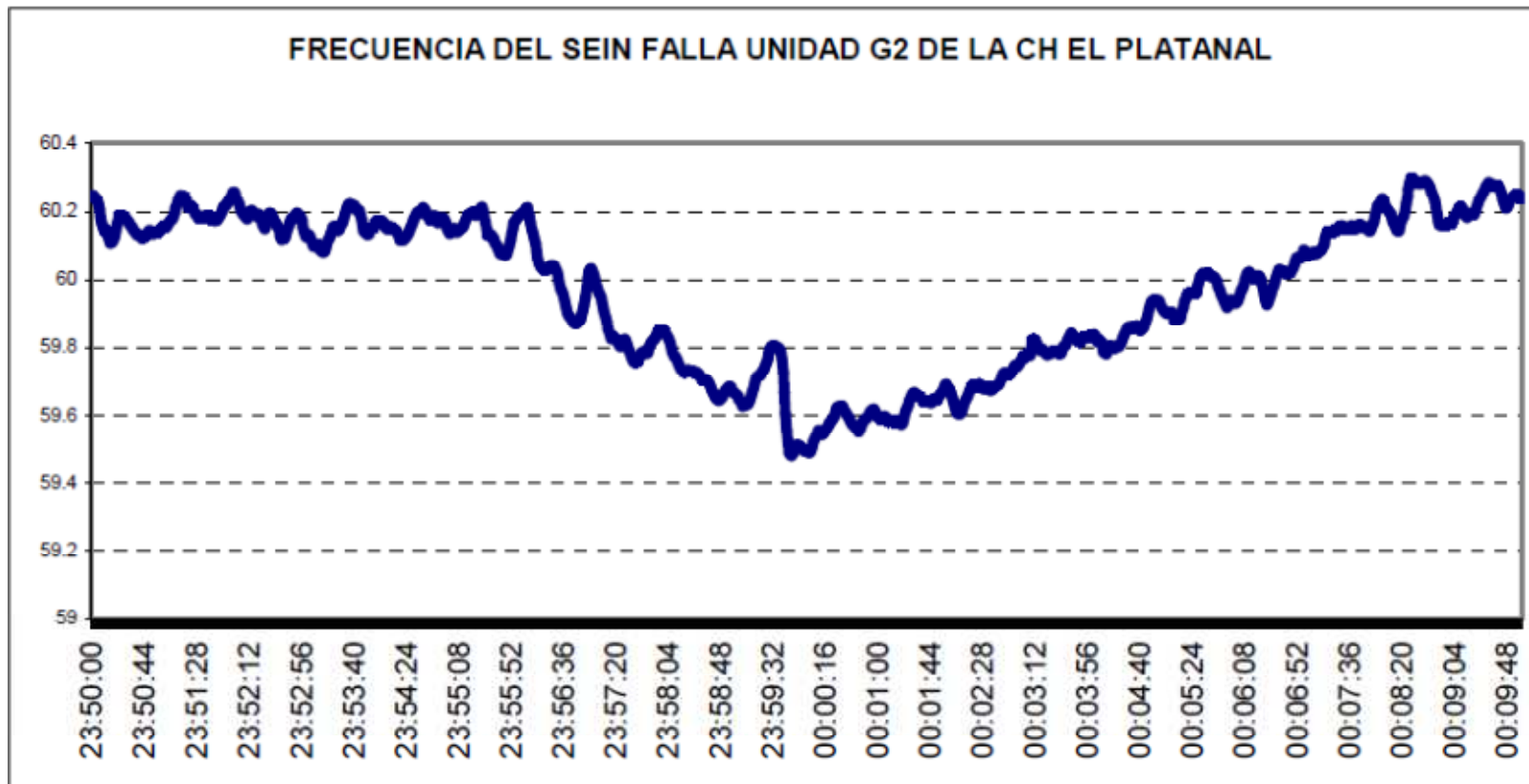
PERTURBACION

Es un cambio o una secuencia de cambios en el SEP.

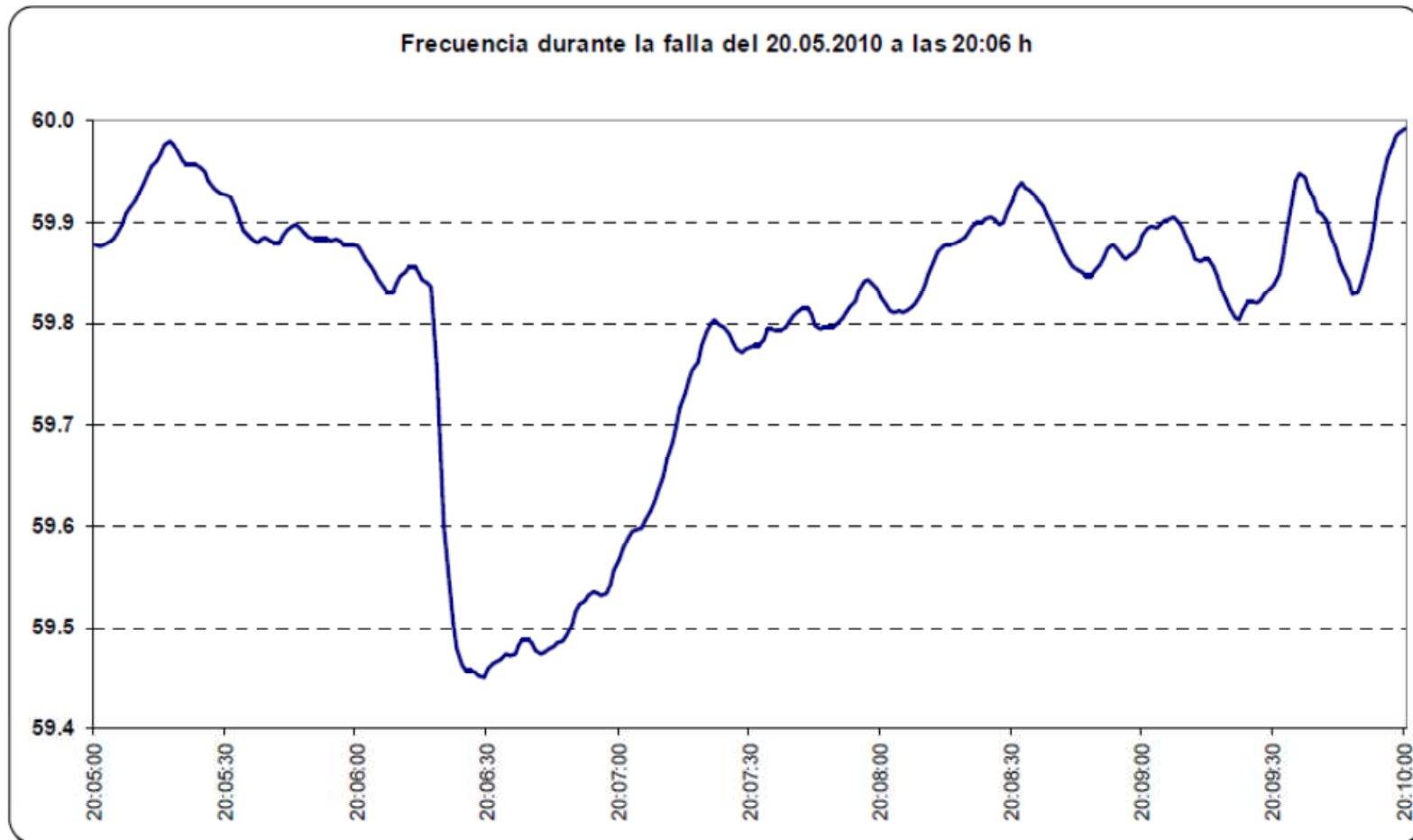
(1) Pequeñas perturbaciones son eventos de pequeña magnitud, que pueden considerarse como normales dentro la operación en estado estacionario del sistema. En este escenario, para propósitos de análisis, es posible linealizar las ecuaciones diferenciales que describen al SEP.

(2) Grandes perturbaciones son eventos de gran magnitud como por ejemplo cortocircuitos, la desconexión intempestiva de una línea o transformador, desconexión de un grupo de generación, pérdida de un bloque importante de carga, etc. Para el análisis de estos eventos, las ecuaciones diferenciales que describen al SEP no pueden ser linealizadas.

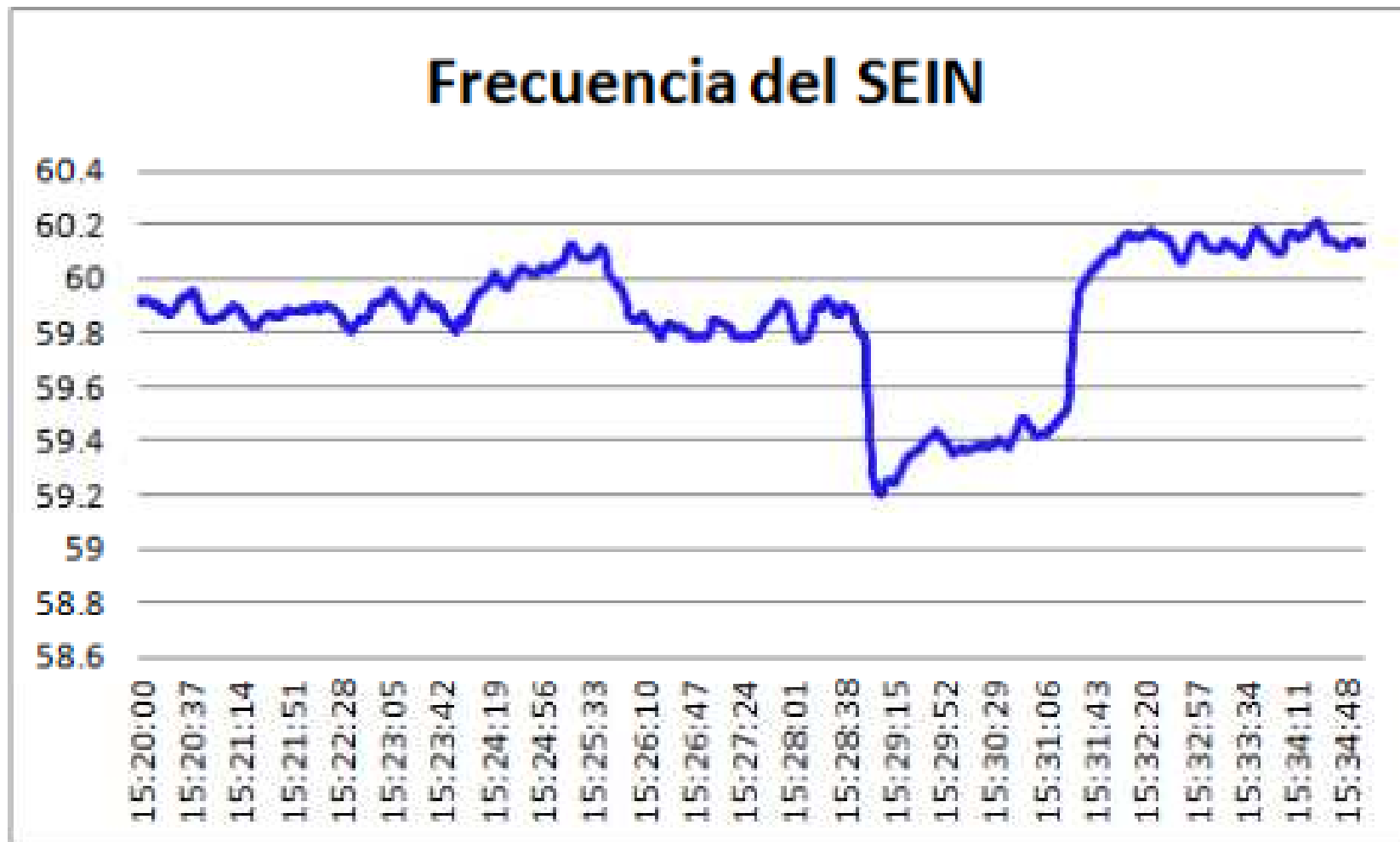
(1) El grupo G2 de la CH El Platanal con 107 MW redujo su generación lentamente por falsa señal del sensor de temperatura del cojinete combinado N°3 (26.04.2010).



(2) Desconectó la unidad G4 de la CH Santiago Antúñez de Mayolo con 98.6 MW por falla mecánica en su sistema de regulación de velocidad.

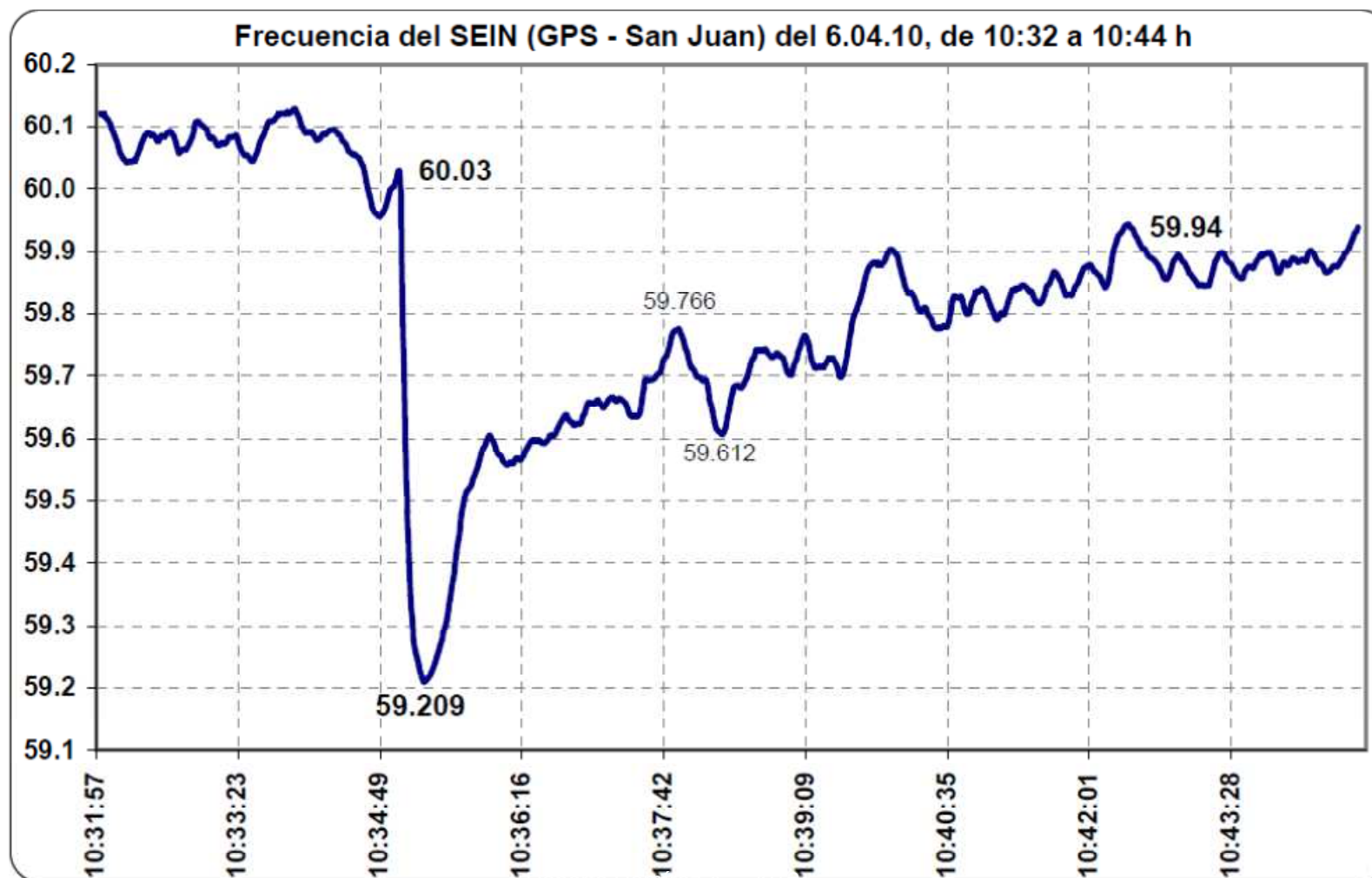


(3) Desconectaron las unidades G1 y G2 de la CH San Gabán II con un total de 110.45 MW.

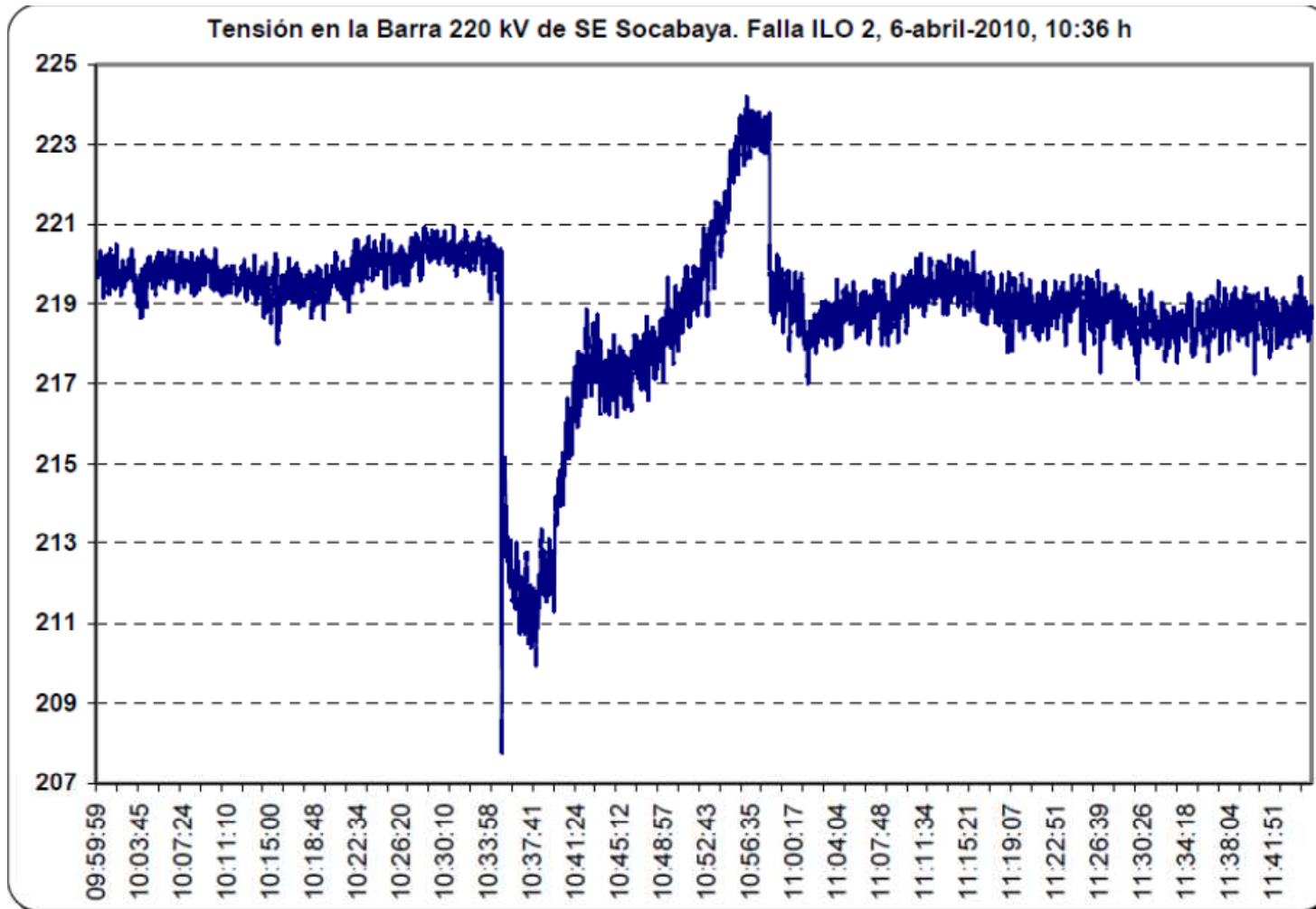


(4) Desconectó la unidad TV21 de la CT Ilo 2 con 134.88 MW

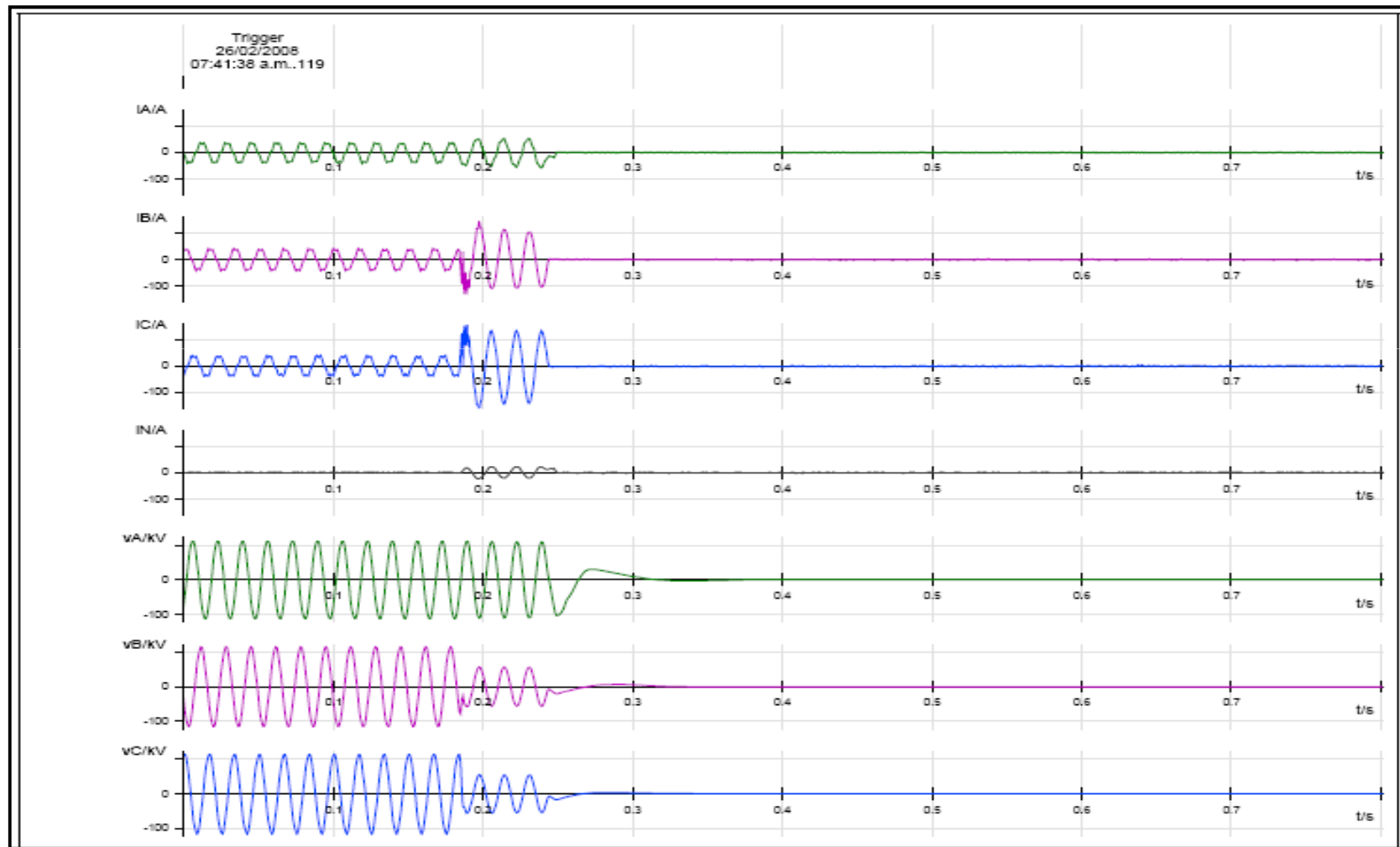
Evolución en el tiempo de la frecuencia.



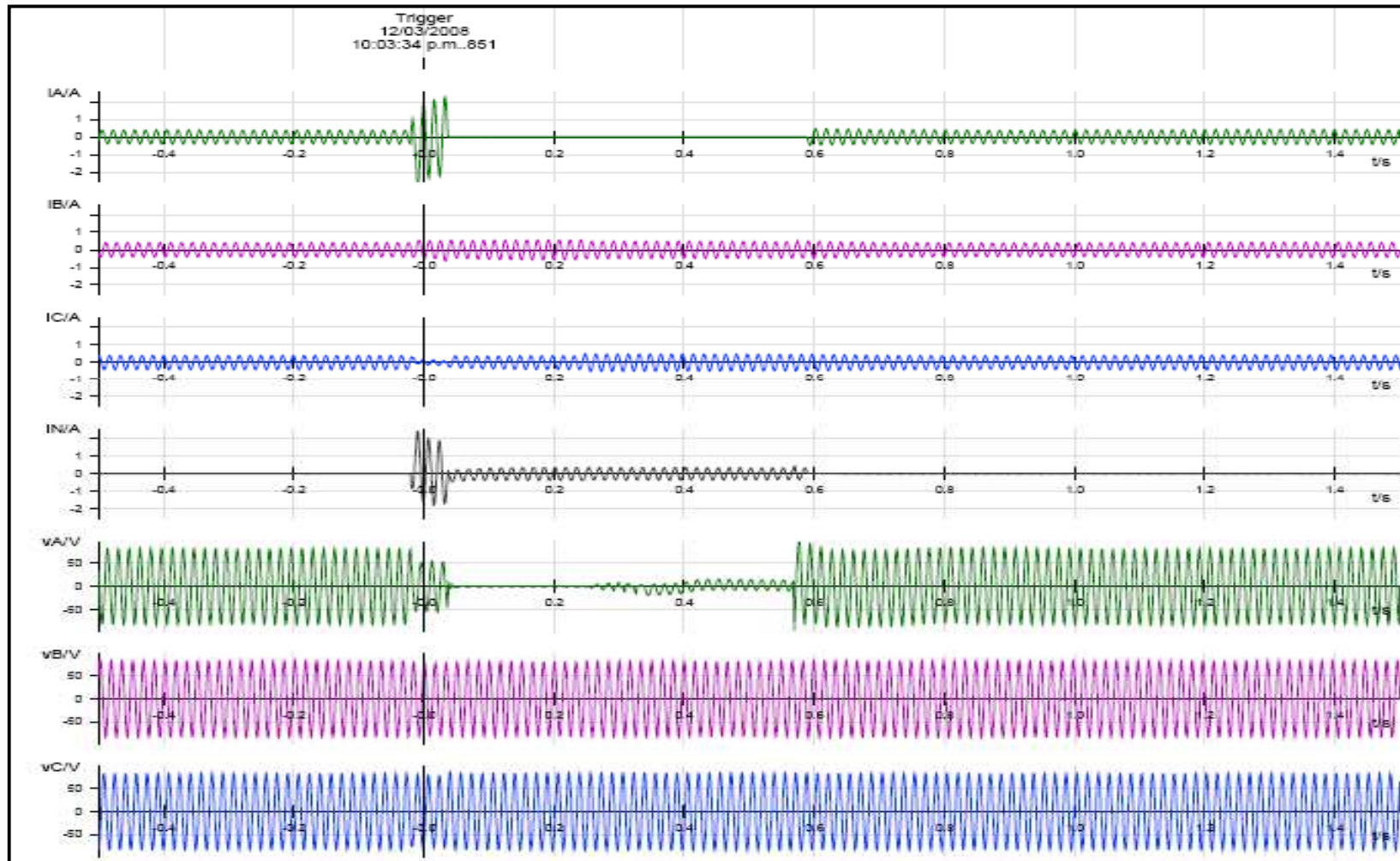
Evolución en el tiempo de la tensión.



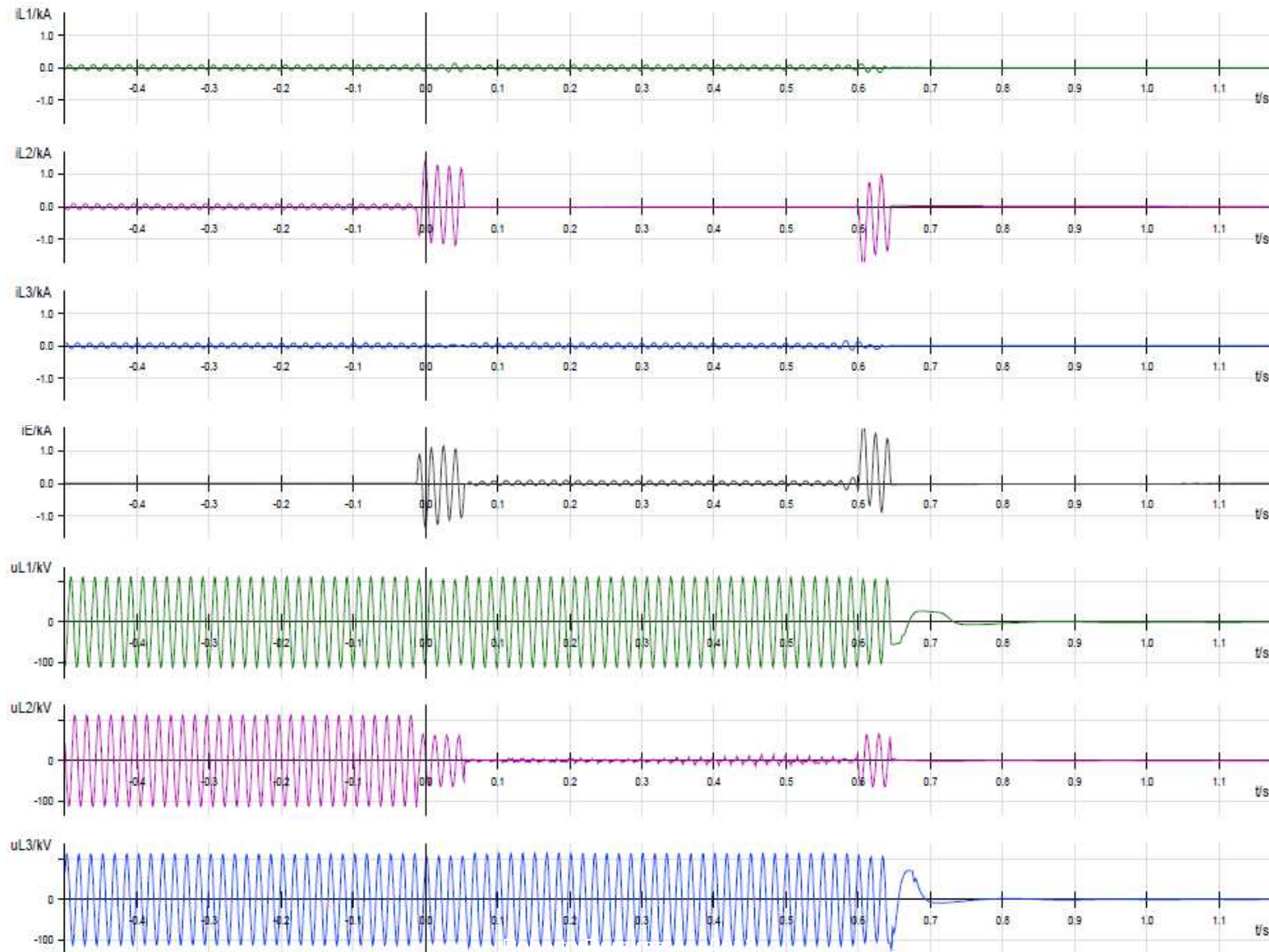
(5) Falla bifásica a tierra en LT 1020 (en S.E. Callalli)



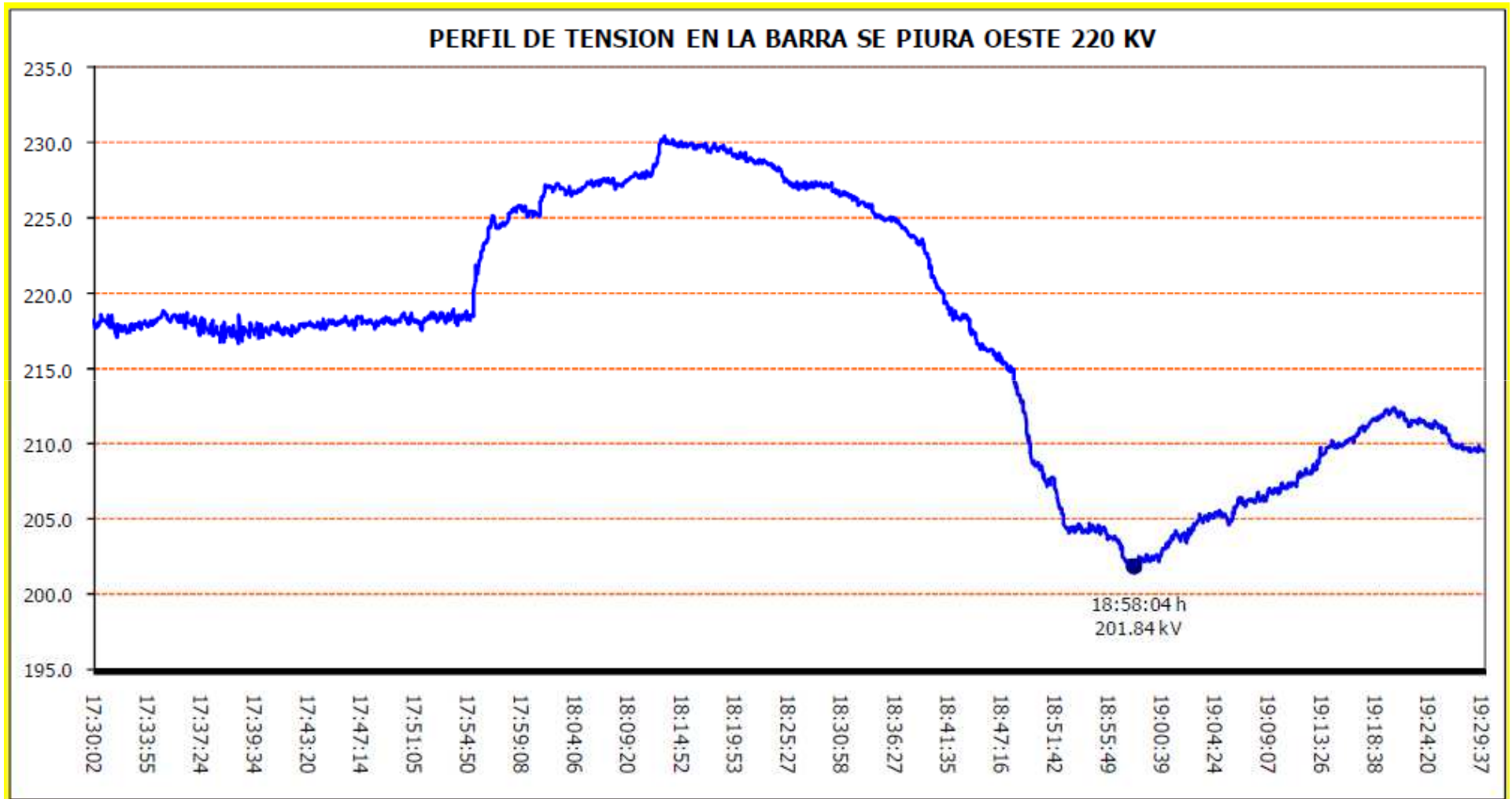
(6) Recierre exitoso en LT 1006 (en S.E. Tintaya)



(7) Recierre no exitoso en LT 1008 (en S.E. Tintaya)



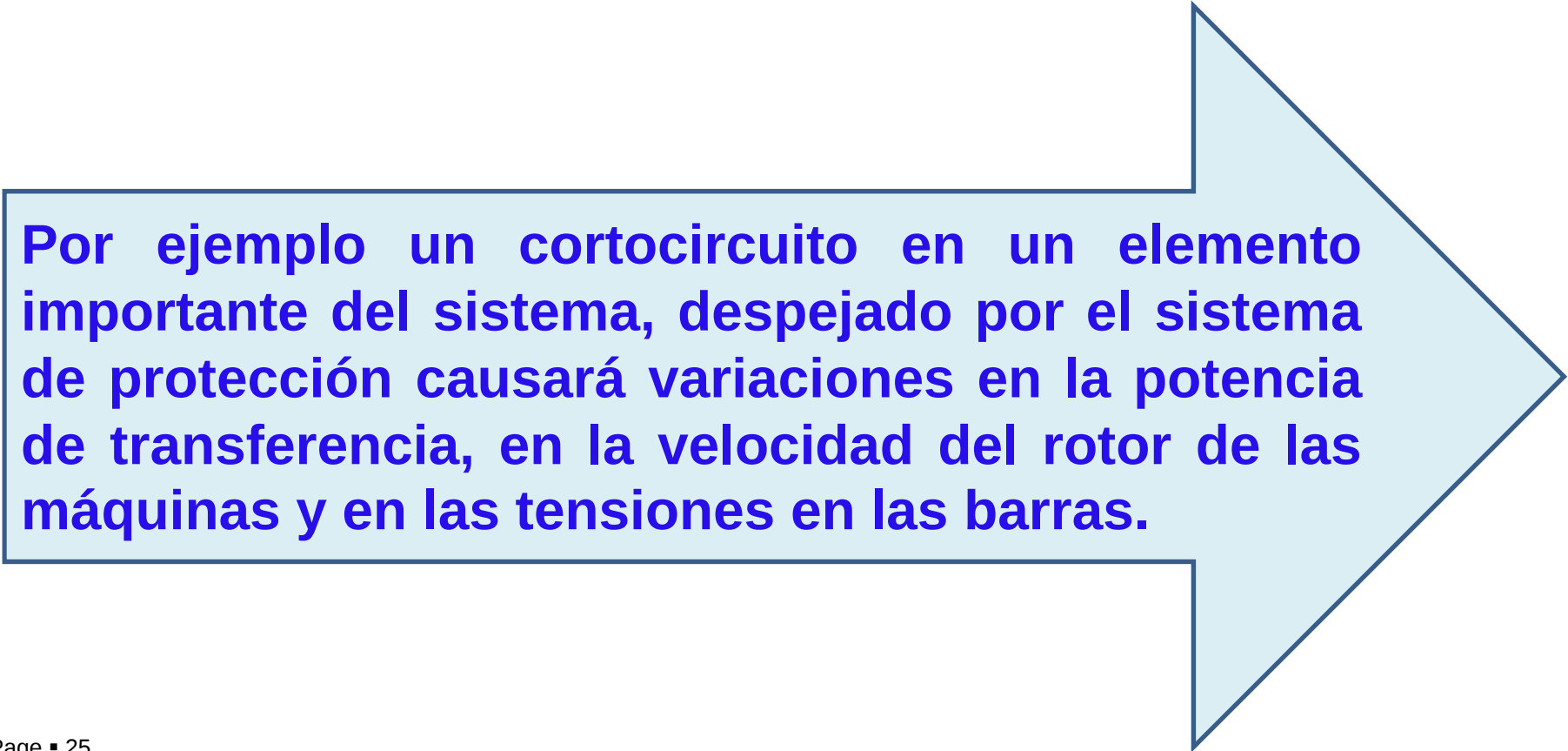
(8) Indisponibilidad de la unidad TGN4 de la CT Malacas(19.12.2010)



1.2 ESTABILIDAD DE UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

Es la habilidad que le permite permanecer en un estado de equilibrio bajo condiciones normales de operación y recuperar un estado de equilibrio aceptable después de haber sido sometido a una perturbación.

La respuesta del sistema a una perturbación involucra a muchos equipos.



Por ejemplo un cortocircuito en un elemento importante del sistema, despejado por el sistema de protección causará variaciones en la potencia de transferencia, en la velocidad del rotor de las máquinas y en las tensiones en las barras.

Las variaciones de tensión provocarán la actuación de los reguladores de tensión de los generadores y equipos de compensación reactiva de la transmisión.



Las variaciones de velocidad provocarán la acción de los gobernadores de las turbinas.



Asimismo, las variaciones de frecuencia y tensión afectarán a las cargas del sistema de acuerdo a sus características individuales.



Adicionalmente, las protecciones de equipos individuales pueden responder a variaciones de frecuencia y tensión del sistema.

El problema es complejo!. Es necesario hacer asunciones ó supuestos para simplificarlo y de este modo focalizar el interés en los factores que influyen sobre el tipo específico de estabilidad.

El entendimiento de los problemas de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia se ve facilitado por una clasificación en categorías, asociadas con:

(1)

- **El sincronismo de los rotores.**

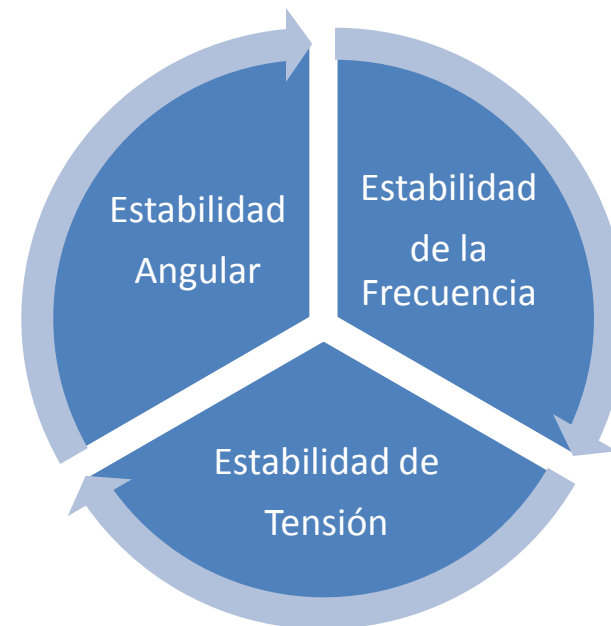
(2)

- **Los fenómenos de control y estabilización de la tensión**

(3)

- **El comportamiento de la frecuencia del sistema.**

Los tipos de estabilidad son:





1.3 ESTABILIDAD DEL ANGULO DEL ROTOR

Habilidad de los generadores síncronos de un SEP para mantenerse en sincronismo después de haber sido sometido a una perturbación.

Esta habilidad de cada máquina síncrona del sistema consiste en que se mantenga o recobre el equilibrio entre el torque mecánico y el torque electromagnético .

COMPONENTES DE TORQUE ELECTROMAGNETICO

Después de una perturbación el torque electromagnético experimenta un cambio, que se interpreta como:

$$\Delta T_e = k_s \Delta \delta + K_D \Delta w$$

Primera componente: torque sincronizante (ΔT_s) y se expresa en función del cambio en el ángulo del rotor. Si es insuficiente provoca la inestabilidad (tendencia de crecimiento aperiódico) del ángulo del rotor.

Segunda componente: torque de amortiguamiento (ΔT_D) se asocia al cambio en la velocidad del rotor. Si es insuficiente provoca inestabilidad oscilatoria.

La estabilidad del ángulo depende de la existencia de ambas componentes de torque en cada una de las máquinas síncronas.

1.3.1 ESTABILIDAD PERMANENTE

La estabilidad permanente ó estabilidad de estado estacionario, estabilidad de pequeña señal ó a pequeña perturbación ó estabilidad oscilatoria, es la capacidad de un SEP para mantenerse en sincronismo ante pequeñas perturbaciones normales durante su operación.

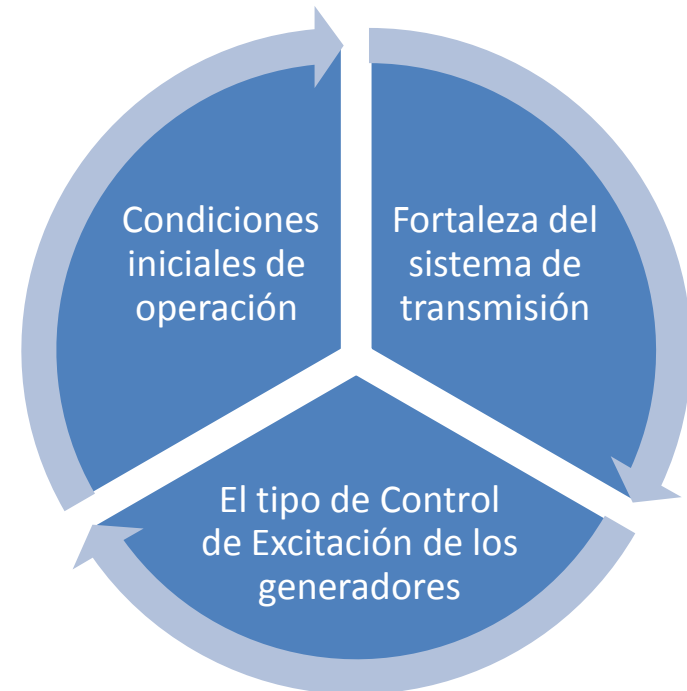
En la literatura americana, era común utilizar el término “*dinámica*” para denotar a la estabilidad permanente y en Rusia, se utilizaba el término “*estática*”.

Debido a la gran confusión que generaban estos términos , CIGRE e IEEE recomendaron utilizar que en vez de éstos términos: ESTABILIDAD PERMANENTE O DE ESTADO ESTACIONARIO O DE PEQUEÑA SEÑAL O ESTABILIDAD OSCILATORIA.

La inestabilidad de estado estacionario puede ocurrir y suele presentarse en dos formas:

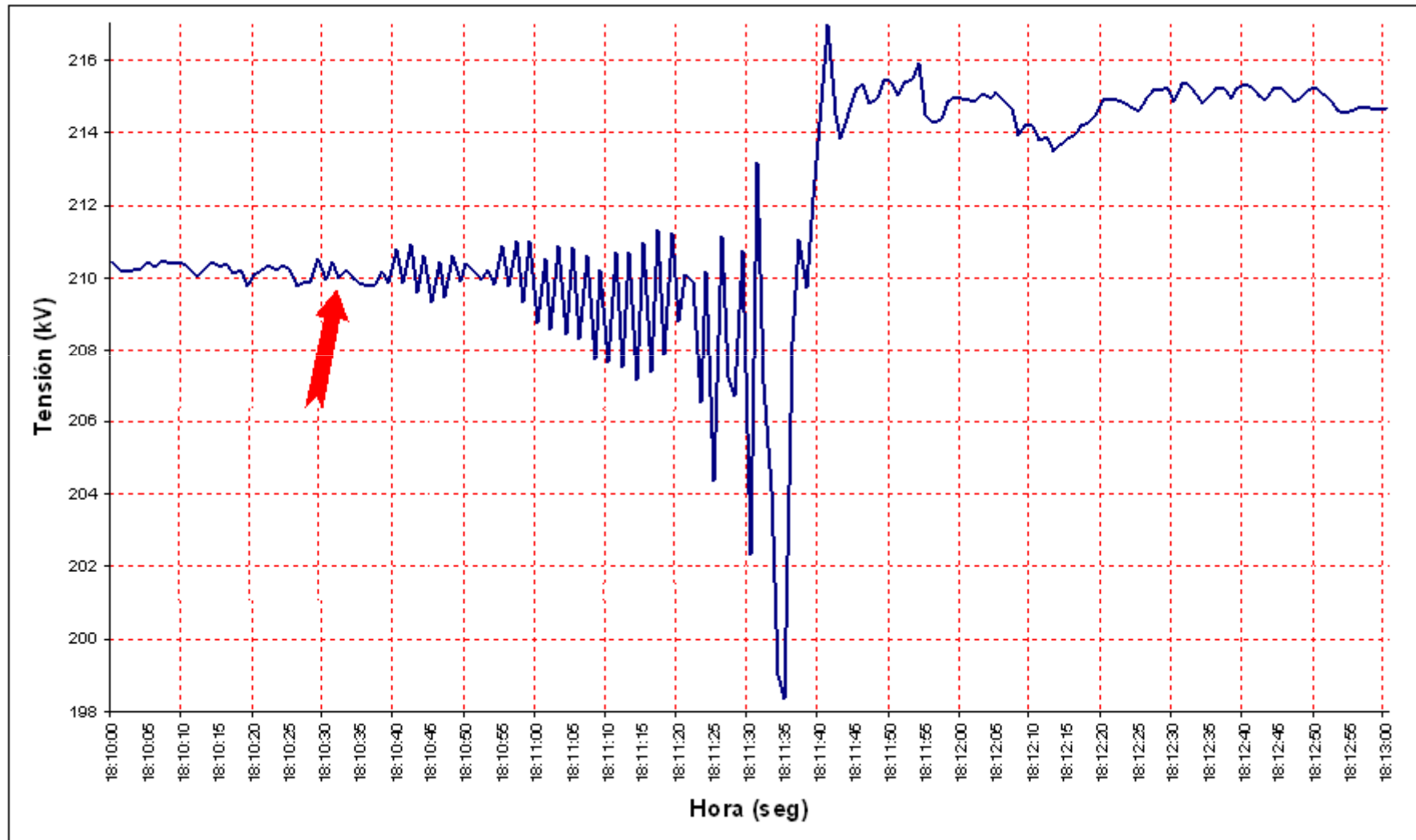
- (1) Un crecimiento sostenido del ángulo del rotor debido a la carencia de torque sincronizante.
- (2) Oscilaciones con amplitudes crecientes del ángulo del rotor porque el sistema no dispone de un adecuado torque de amortiguamiento.

La respuesta del sistema ante pequeñas perturbaciones depende de los siguientes factores fundamentales



Inestabilidad del 25.07.2002

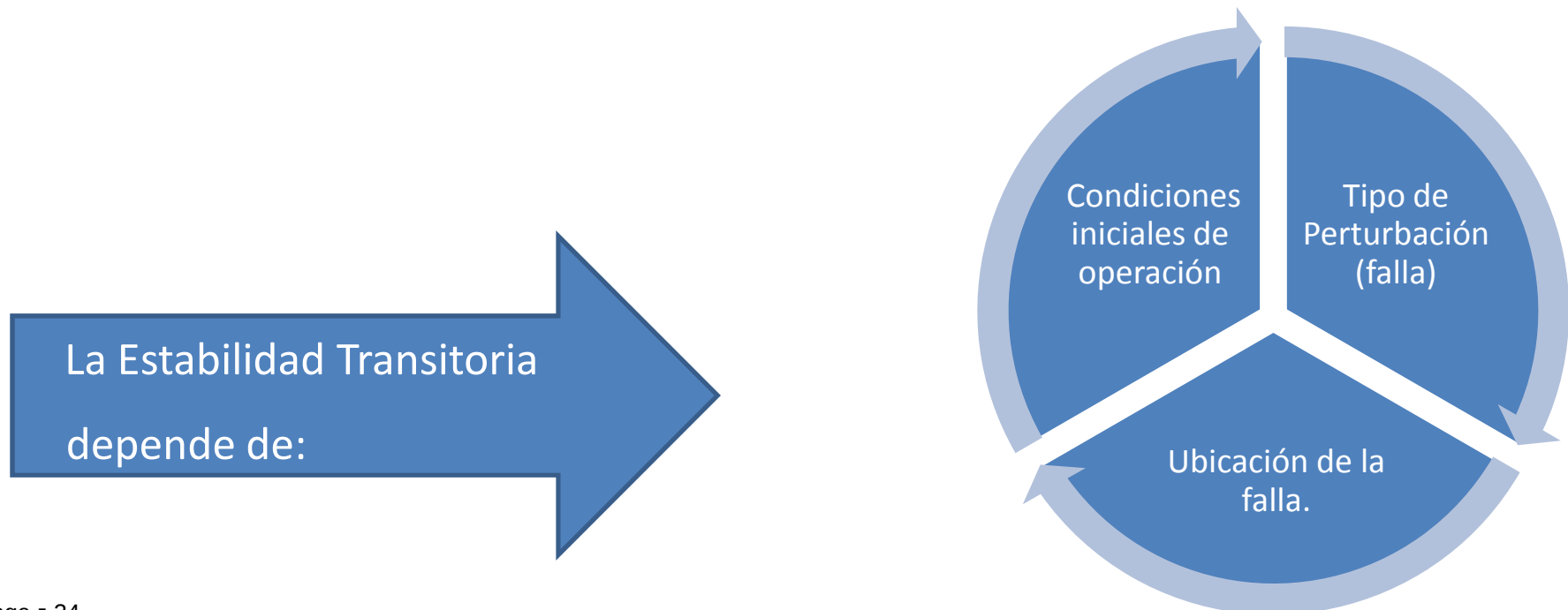
Tensión en la barra de 220 kV de la S.E. San Juan



1.3.2 ESTABILIDAD TRANSITORIA

Capacidad del SEP de mantener el sincronismo cuando es sometido a severas perturbaciones.

La respuesta del sistema involucra grandes cambios en los ángulos del rotor y esta influenciada por la relación no lineal de la característica potencia-ángulo.

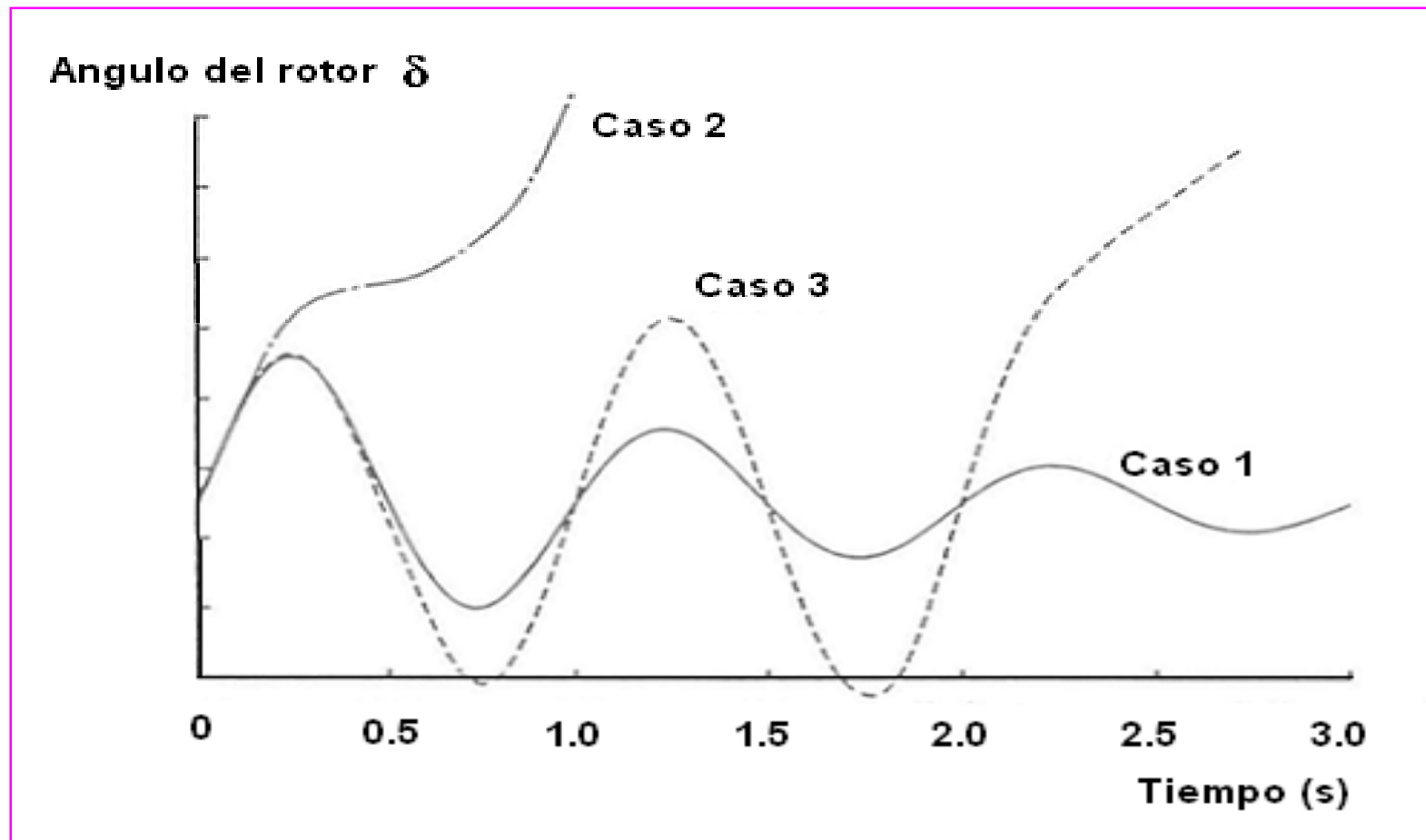


El SEP es diseñado y operado de modo que sea estable para un grupo seleccionado de contingencias, tales como cortocircuitos, de diferentes tipos: monofásico a tierra, bifásico a tierra ó trifásico, asumidos que ocurren en las líneas de transmisión ó cerca de las barras.

Se asume que las fallas son despejadas mediante la apertura de los interruptores correspondientes que aíslan el elemento fallado.

En algunos casos se utilizan operaciones de apertura y recierre monofásico.

En la figura se ilustra el comportamiento del ángulo del rotor de una máquina síncrona de simulaciones de estabilidad.

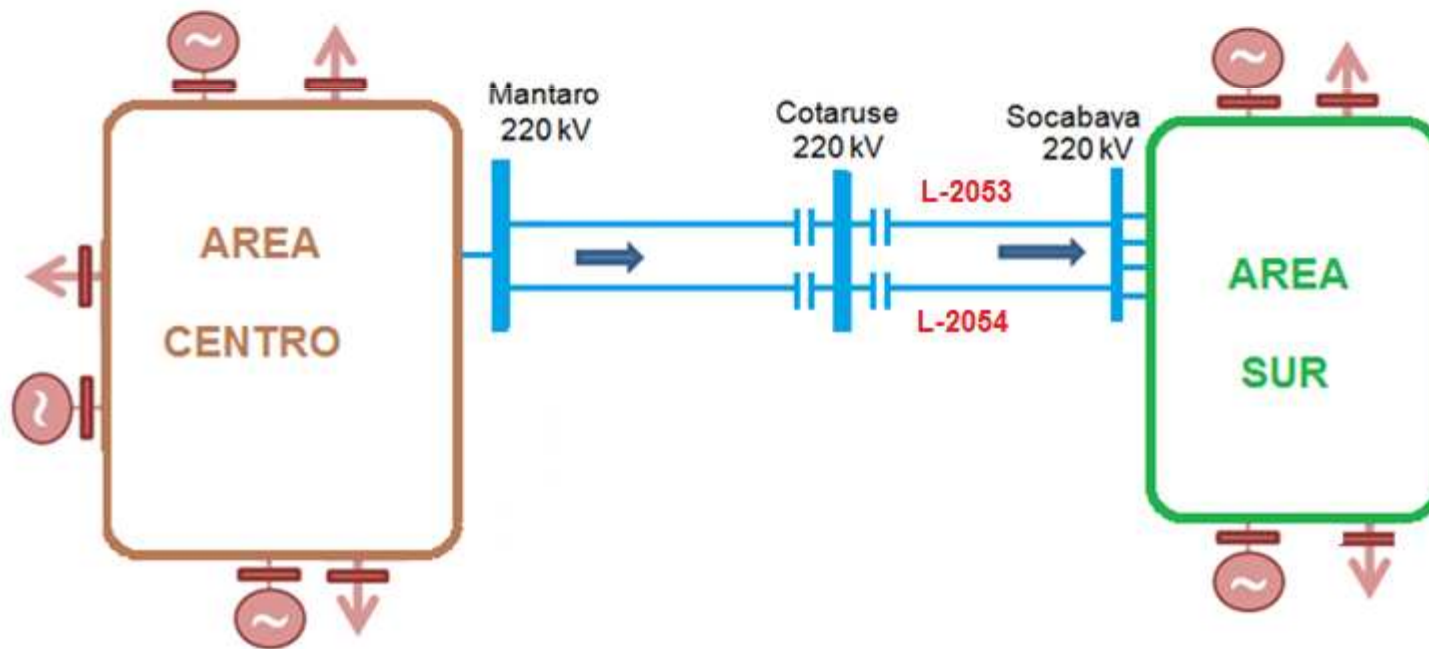


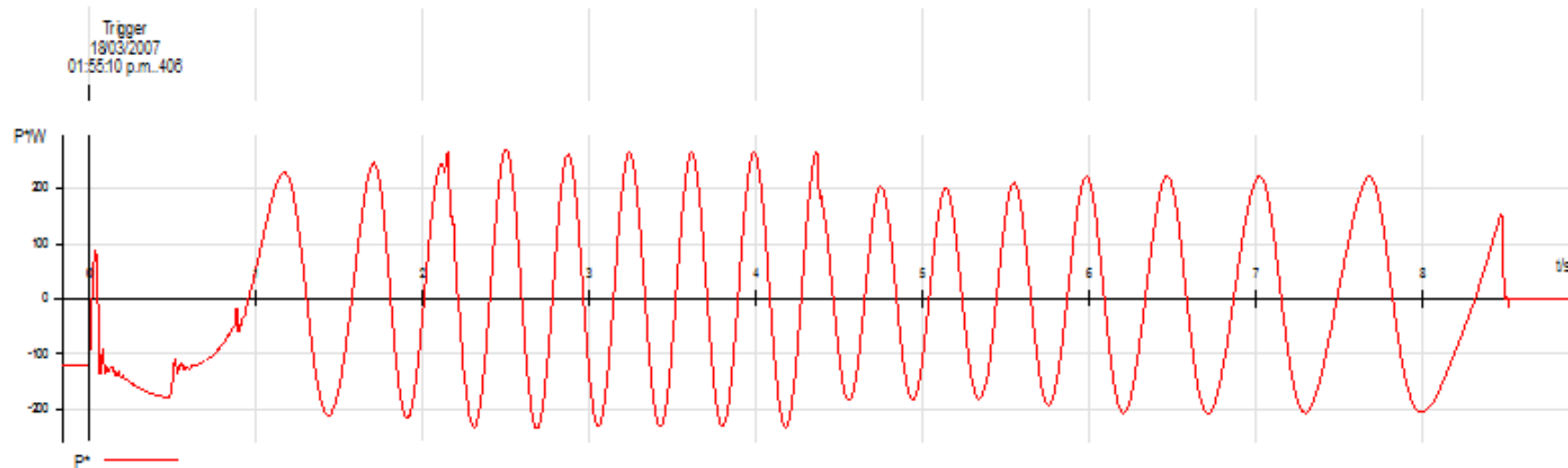
En SEP grandes, la inestabilidad transitoria puede no siempre ocurrir como “inestabilidad de primera oscilación”, la inestabilidad que produce grandes excursiones del ángulo del rotor puede aparecer más allá de la primera oscilación.

(1) El tiempo de interés (simulación) depende del fenómeno que se quiera visualizar.

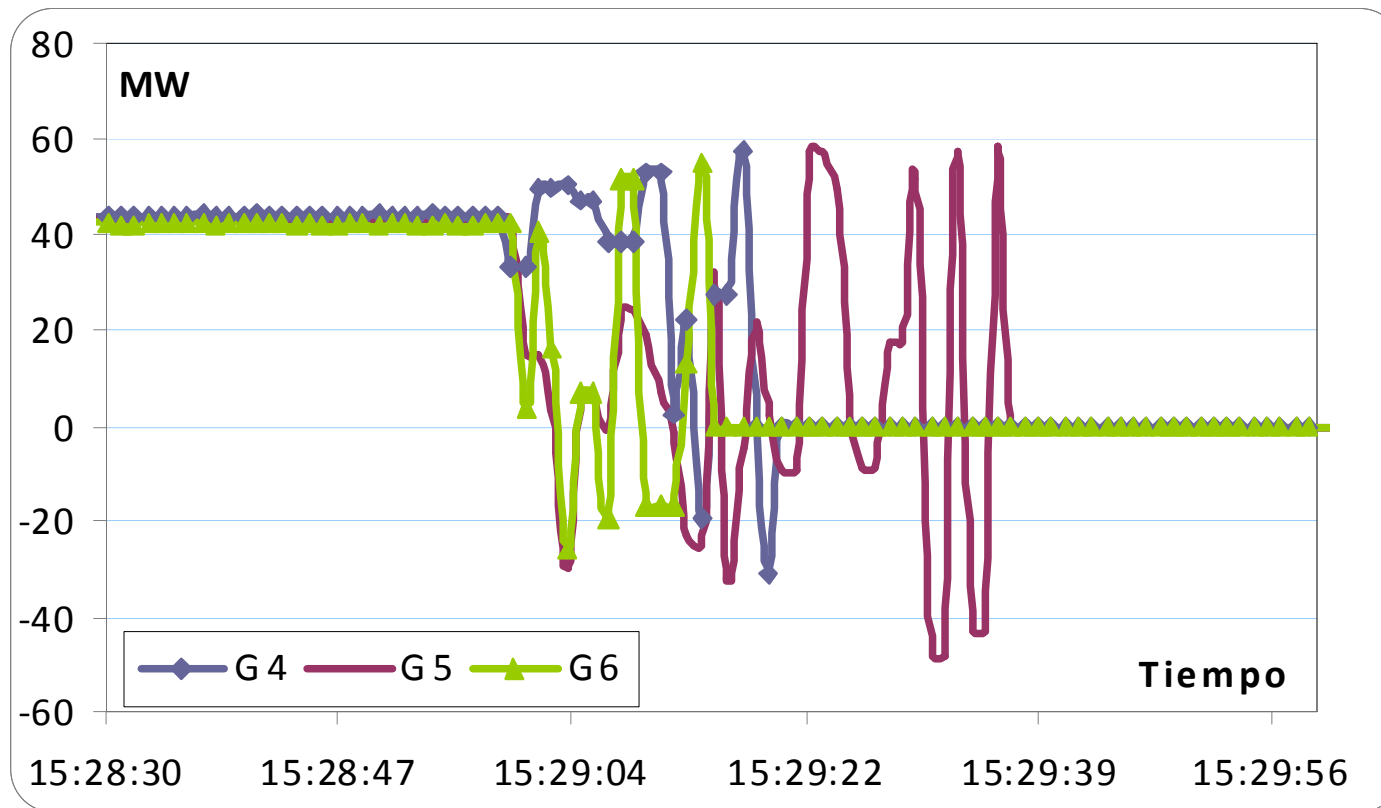
(2) Hasta 1983, algunos autores le habían denominado “*estabilidad dinámica*” habiendo sido utilizado ampliamente en la literatura para denotar esta clase de estabilidad del ángulo del rotor, sin embargo, CIGRE e IEEE recomendaron solo la denominación de “Estabilidad Transitoria”.

En la figura se ilustra el comportamiento de la potencia activa en la línea L-2054 (Cotaruse-Socabaya) en un evento del 18.03.2007. Ocurrió una falla bifásica a tierra en la L-2053, que fue despejada con la apertura definitiva en ambos extremos. Simultáneamente, en la L-2054 se produjo una falla monofásica a tierra, despejada en menos de 100 ms; el recierre se produjo 880 ms después.





Durante un evento del 07 de Febrero del año 2003, los grupos G4, G5 y G6 (C.H. Cañón del Pato) sufrieron fuertes fluctuaciones de potencia. El primer cruce por cero indica la pérdida del sincronismo

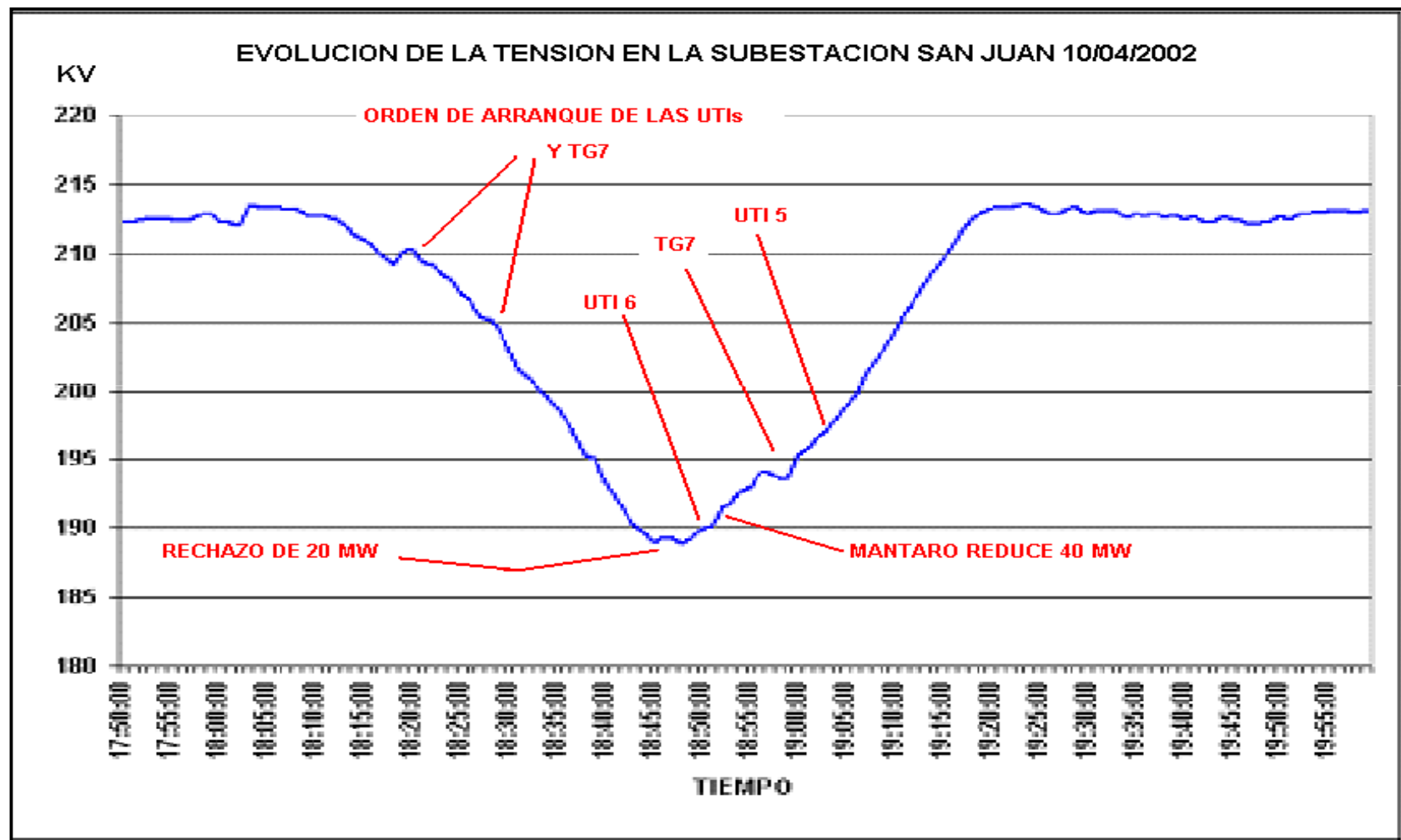


1.4 ESTABILIDAD DE TENSION

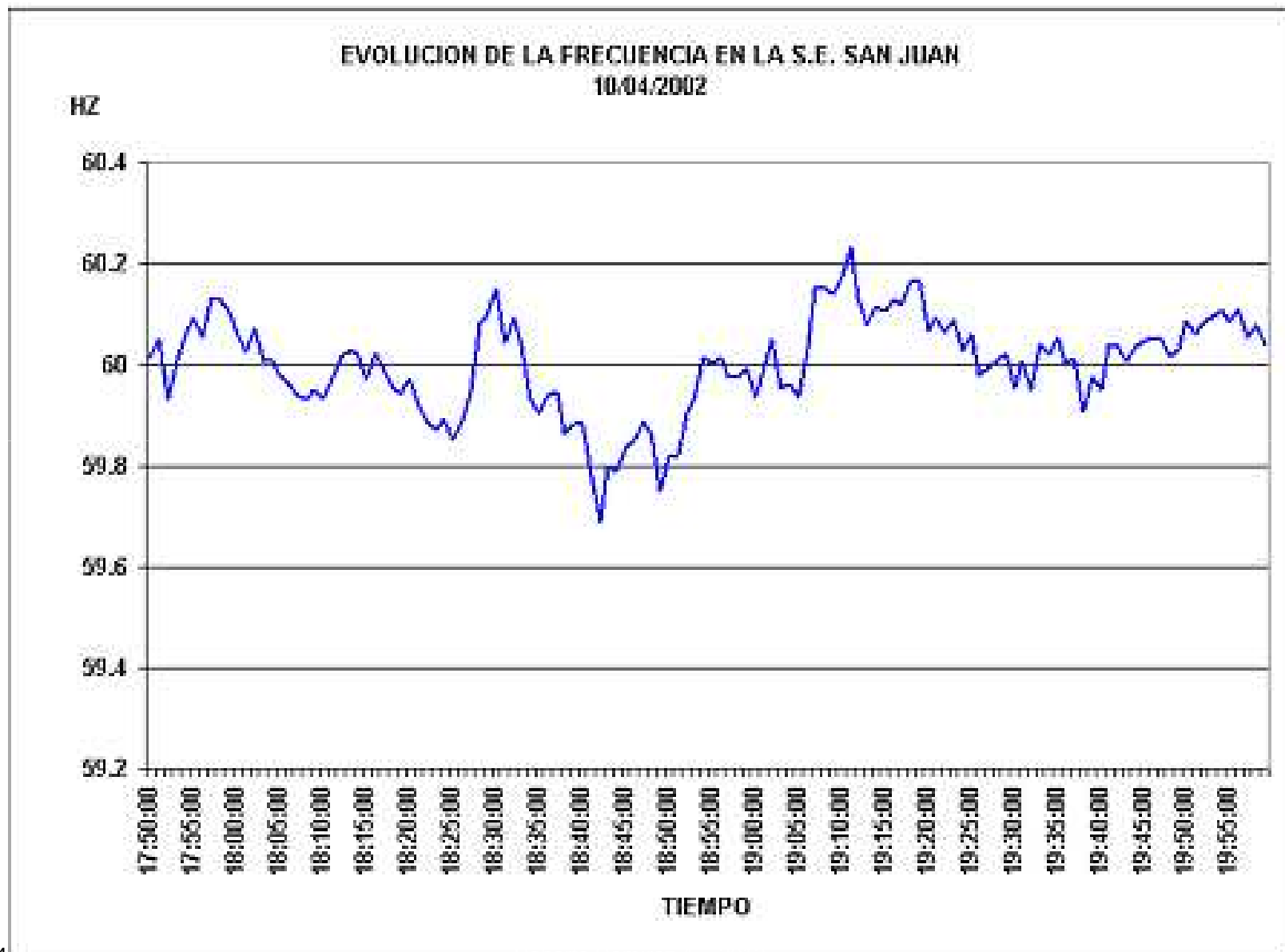
Es la habilidad del SEP para mantener tensiones estacionarias aceptables en todas las barras del sistema bajo condiciones normales de operación y después de haber sido sometido a una perturbación. Depende de la habilidad para mantener o recobrar el equilibrio entre la potencia reactiva exigida por la carga y la potencia reactiva suministrada desde el sistema de potencia.

- (1) Un sistema ingresa a un estado de inestabilidad de tensión cuando una perturbación, un incremento en la demanda de la carga, o un cambio en la condición de operación ó topología del sistema, provoca una progresiva e incontrolable caída en la tensión.
- (2) El factor principal causante de la inestabilidad es la incapacidad del SEP para satisfacer la demanda de potencia reactiva.

La Figura muestra el comportamiento de la tensión en la barra de 220 kV de la S.E. San Juan, cuando esta creciendo la demanda.



Y el comportamiento de la frecuencia en el mismo lapso de tiempo.



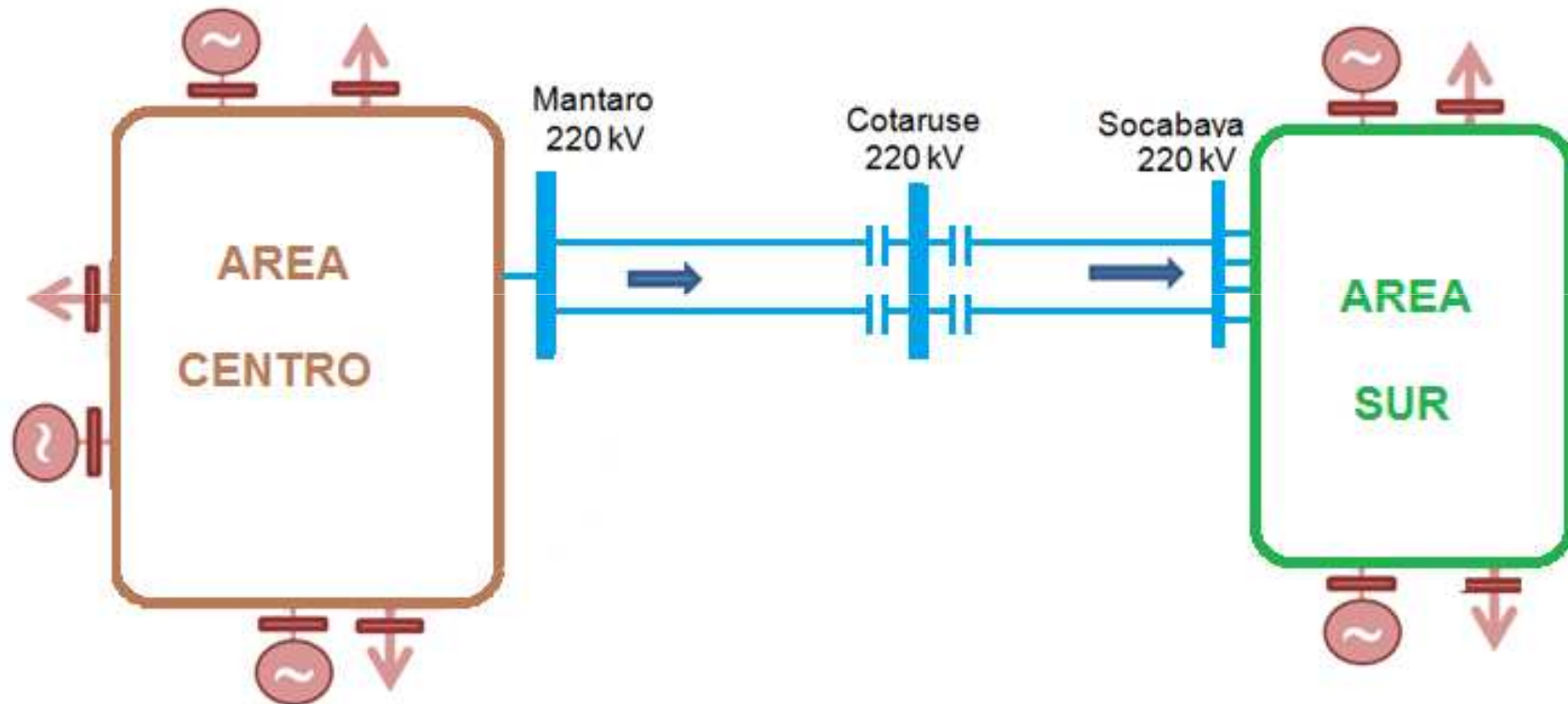
1.5 ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA

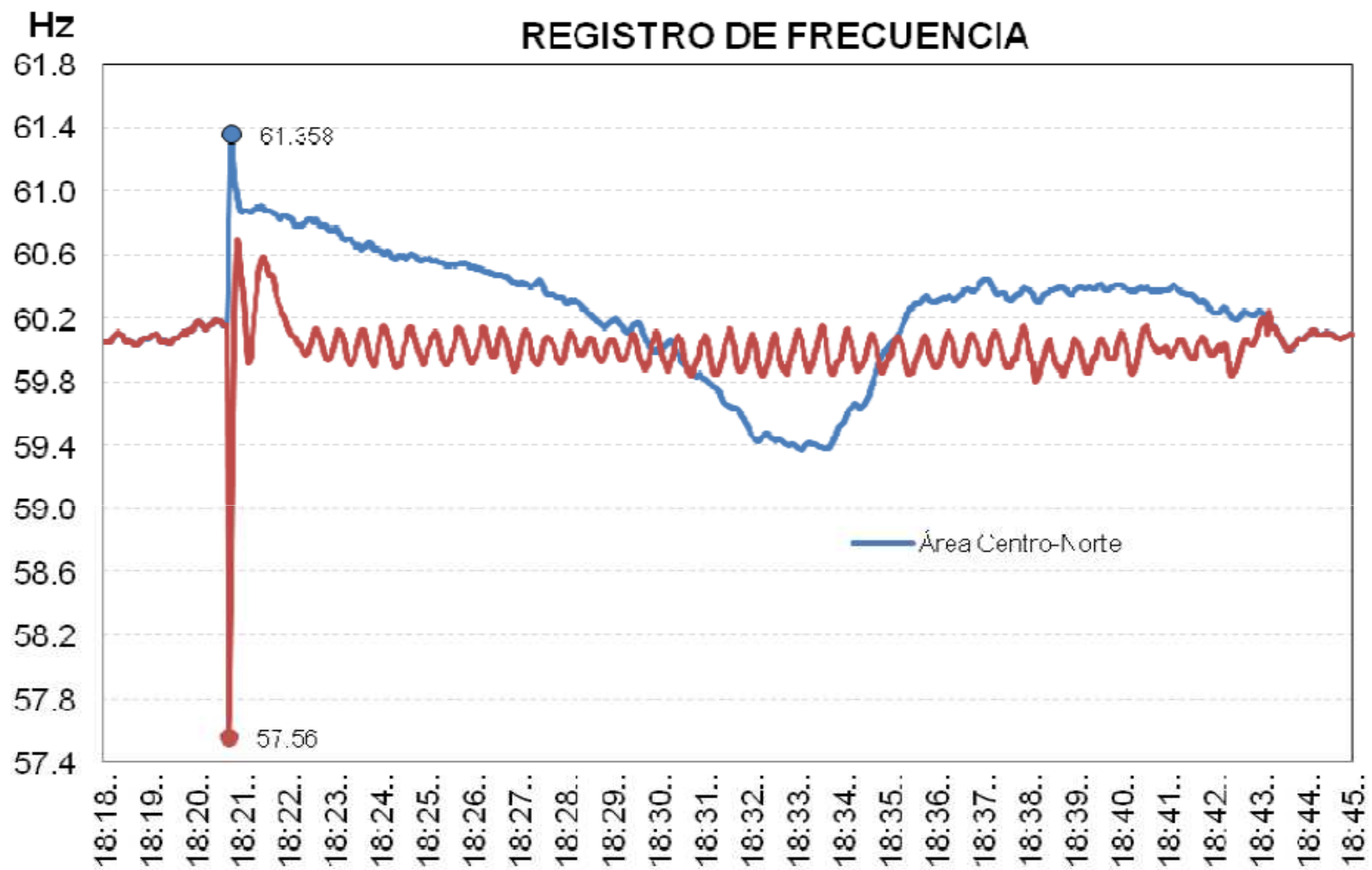
Habilidad del SEP para mantener frecuencias estacionarias luego de severos eventos que provocan desbalances entre la generación y la carga del sistema. Esta habilidad para mantener o recobrar el equilibrio entre la generación y la carga, puede ejecutarse con una desconexión de carga mínima.

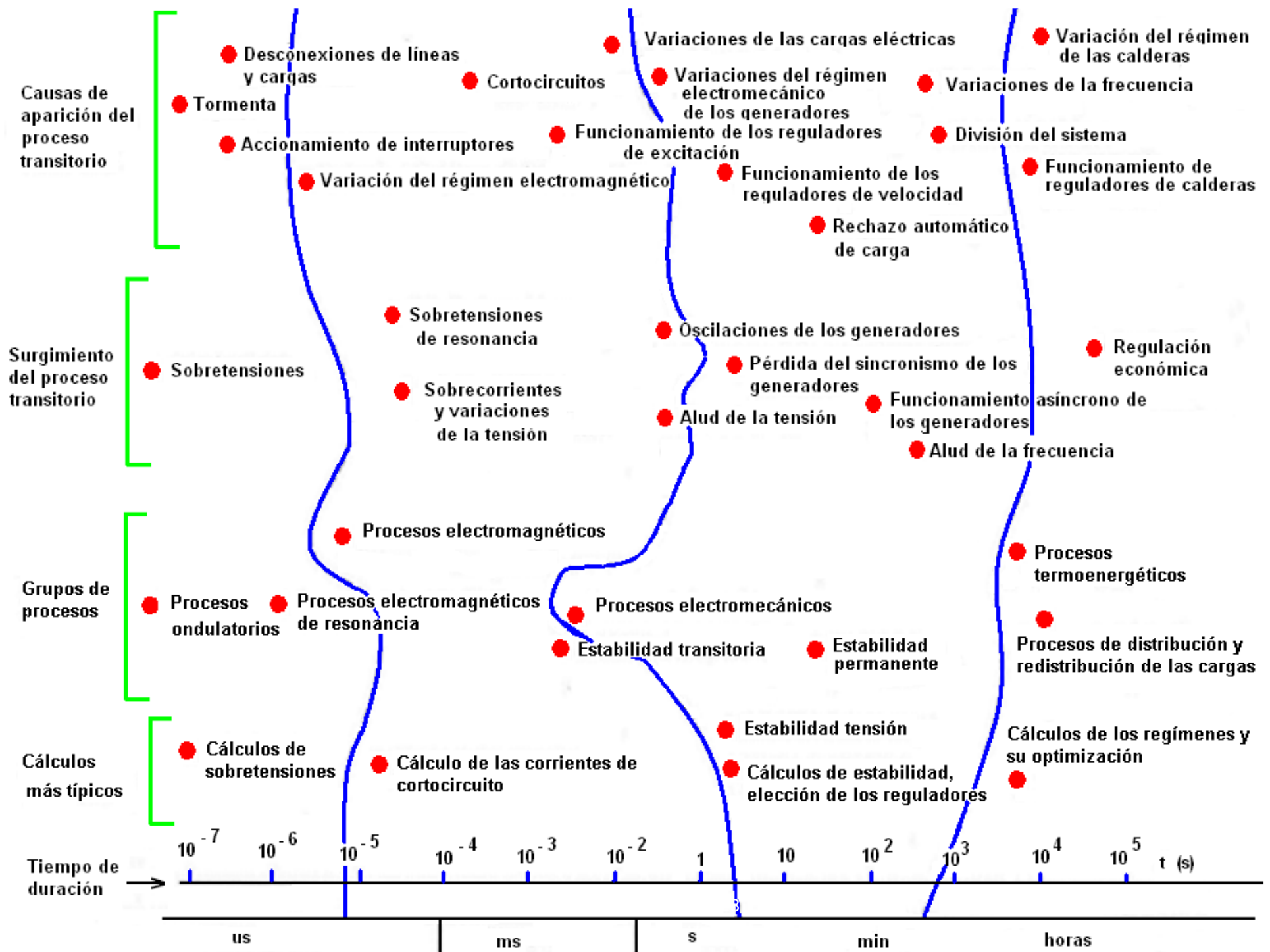
La inestabilidad se presenta con oscilaciones sostenidas de la frecuencia que provocan la desconexión de cargas por subfrecuencia, de unidades de generación por subfrecuencia o sobrefrecuencia y que puede propiciar la formación de sistemas aislados (islas).

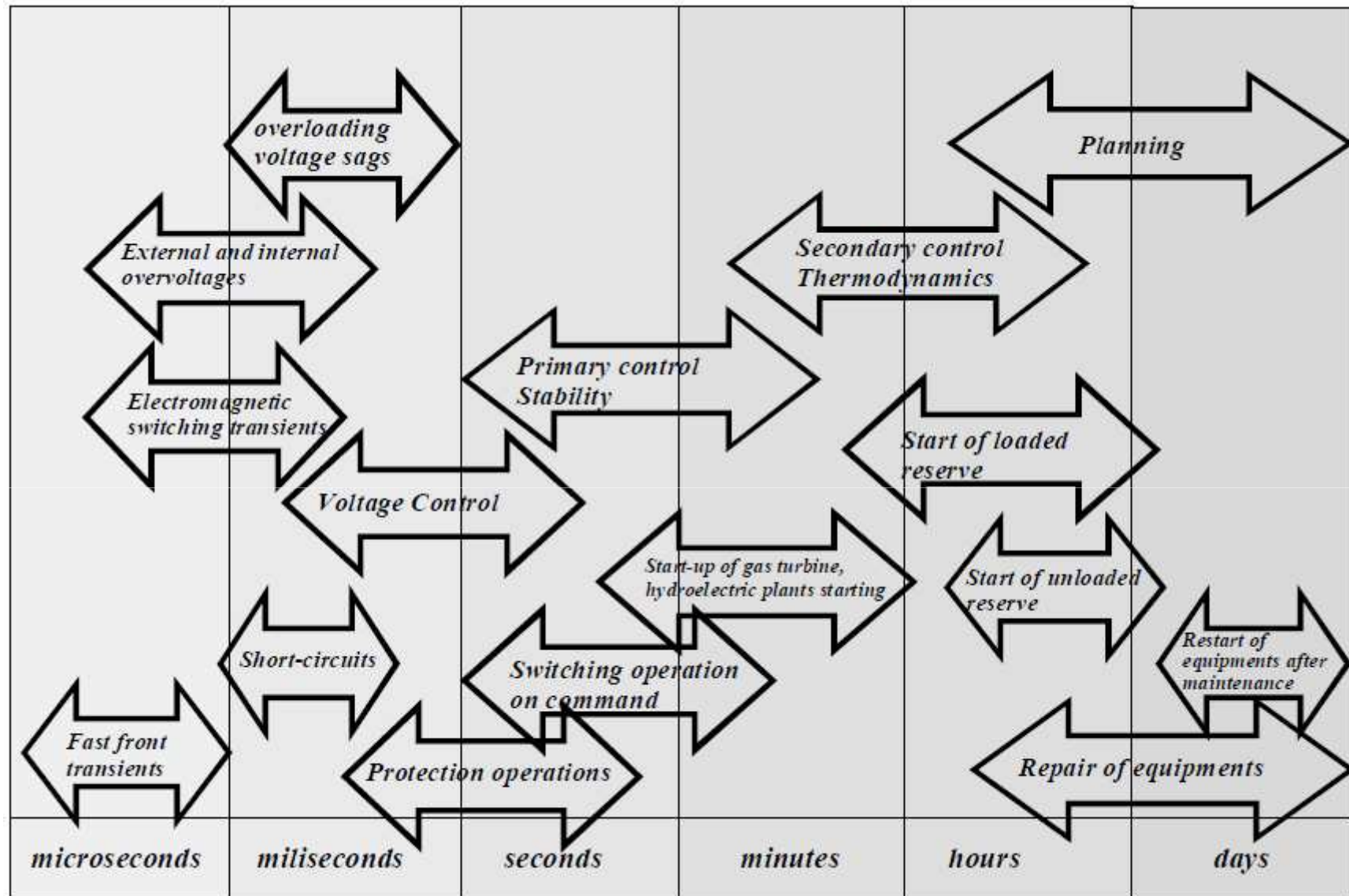
Los problemas de inestabilidad de la frecuencia están asociados con insuficiente reserva de generación en las áreas que conforman un sistema, inadecuados ajustes de protecciones propias de centrales importantes, inadecuada coordinación de las protecciones especiales de frecuencia o de las respuestas de reguladores de velocidad.

A las 18:20 horas del 18.03.2013, desconectaron simultáneamente las líneas L-2051/L-2052 por fallas bifásicas, cuando se transmitía 435.6 MW de Centro a Sur. La separación de los sistemas provocó sobrefrecuencia en el Centro Norte y subfrecuencia en el Sur.









1.5 SEGURIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

Seguridad: es el grado de riesgo en la habilidad para sobrevivir inminentes perturbaciones (contingencias) sin interrumpir el servicio a los usuarios. Depende de la condición de operación y de la probabilidad de ocurrencia de la perturbación.

Para ser seguro un SEP debe:

- (1) Ser estable luego de la contingencia y
- (2) Llegar a una condición de operación tal que no se viole ninguna restricción física.

EL SEP debe también ser seguro frente a contingencias que no estarían clasificadas como problemas de estabilidad (daño a algún equipo).

a.- Estabilidad representa la continuidad de la operación intacta del SEP luego de una perturbación.

b.- Confiabilidad: es la probabilidad de la operación satisfactoria del SEP durante un determinado periodo largo de tiempo. Denota la habilidad para suministrar un adecuado servicio eléctrico con pocas interrupciones sobre un determinado periodo.

Estabilidad y Seguridad son atributos variables en el tiempo. Confiabilidad es una función de un comportamiento promedio en el tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1. Definition and Classification of Power System Stability, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS; VOL. 19; No 2, MAY, 2004.**