

## Interrupción de procesos industriales en una planta petroquímica por medición inexacta en relés de frecuencia

## Interruption of industrial processes in a petrochemical plant due to inaccurate measurement in frequency relays

Herivelto de Souza Bronzeado <sup>1</sup>, Alessandro Villa Rivas <sup>2</sup>, Sérgio Luiz Zimath <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional - MIDR, Brasil, bronzeado@ieee.org

<sup>2</sup> Centro Nacional de Despacho, CORPOELEC, MPPEE, Venezuela, avilla@corpoelec.gob.ve

<sup>3</sup> AQtech Power Prognostics, Brasil, sergio.zimath@gmail.com

Recibido: 17/07/2023, Aceptado: 22/08/2023. Versión final: 01/10/2023

### Resumen:

Los esquemas de desconexión de carga basados en el monitoreo de sub-frecuencia se emplean normalmente para desconectar las cargas de modo que se restablezca el equilibrio entre la generación y la carga del sistema. Este procedimiento debe ser muy confiable y bien ajustado. En este trabajo se presenta un caso de estudio donde un proceso industrial de una planta petroquímica fue desconectado por relés de frecuencia que no debían operar ya que las perturbaciones del sistema no estaban asociadas al desequilibrio entre carga y generación, sino por una falla (cortocircuito) en el sistema de transmisión. Este caso de estudio se basa en datos reales registrados, que muestran evidencias de que las fallas (cortocircuitos) pueden afectar las mediciones de frecuencia, lo que lleva a interrupciones de carga que deben evitarse. Se discuten recomendaciones para prevenir este tipo de falsos disparos.

**Palabras clave:** esquema de desconexión de carga, interrupción de procesos industriales, medición de frecuencia, protección de desequilibrio carga-generación.

### Abstract:

Load shedding schemes based on sub-frequency monitoring are typically employed to shed loads so that the balance between generation and system load is restored. This procedure must be very reliable and well adjusted. This paper presents a study case where an industrial process of a petrochemical plant was disconnect by frequency relays that should not operate since the disturbances in the system were not associated with the imbalance between load and generation, but rather due to a fault (short circuit) in the transmission system. This study case was based on actual recorded data, showing evidence that faults (short circuits) can affect frequency measurements, leading to load interruptions that must be avoided. Recommendations to prevent this type of false triggering are discussed.

**Keywords:** load-shedding scheme, interruption of industrial processes, frequency measurement, frequency protection of load-generation imbalance.

## 1. Introducción

Se conoce que las fallas en los sistemas de energía que causan huecos de voltaje son la fuente principal de un número considerable de interrupciones de procesos industriales. Además, afectan las mediciones de otros parámetros importantes de calidad de energía.

La norma de medición de la calidad de la energía IEC 61004-30 [1] adopta el concepto de registrar los huecos de voltaje para tener en cuenta su influencia en las mediciones de los parámetros de calidad de la energía. Además de la ocurrencia de fallas que causan huecos de voltaje, las prácticas de operación y los esquemas de protección, que incluyen esquemas de desconexión de carga basados en el comportamiento de la frecuencia en el sistema, también puede afectar la calidad del suministro.

Los estudios sobre el desempeño de la desconexión de carga en la literatura se centran principalmente en el comportamiento dinámico del generador después de la desconexión de la carga [2]. Métodos apropiados de medición de voltajes y corrientes para las funciones de monitoreo y protección deben definirse cuidadosamente en este contexto [3].

Teniendo en cuenta estas cuestiones interrelacionadas, este artículo presenta un caso de estudio sobre interrupciones en una gran planta petroquímica en Brasil debido a disparos por desviación de la frecuencia no asociados al desequilibrio entre carga y generación, sino a una falla en el suministro del sistema de transmisión.

Esta falsa desviación de frecuencia fue causada por un cambio rápido de fase en la tensión que ocurrió durante el hueco de voltaje, lo que llevó al relé de protección de frecuencia a una operación inesperada.

## 2. Ajuste del relé de desconexión de carga

El agente regulador del sistema eléctrico nacional en Brasil ha aprobado una resolución [4], en la que se ha asignado al Operador Nacional Independiente del Sistema (ONS) brasileño el monitoreo del comportamiento de carga y frecuencia, para definir los esquemas de desconexión de carga para mantener la estabilidad del sistema interconectado brasileño de potencia.

Las variaciones de frecuencia de una señal de tensión se pueden representar matemáticamente mediante la tasa de cambio del ángulo de fase en el tiempo ( $df/dt$ ), con la evaluación de la frecuencia que es altamente dependiente del período de tiempo utilizado en los cálculos. Cuando el sistema está operando en una condición estable, esta tasa de cambio es cero.

La ONS ha establecido la cantidad de carga que se desconectará para las diferentes etapas de la tasa de cambio de frecuencia, con la protección de respaldo basada en niveles absolutos de frecuencia, lo que permite una configuración de tiempos de retardo adecuados para desconectar las cargas.

El ajuste instantáneo de disparo basado en valores absolutos de frecuencia se ha definido para desviaciones de frecuencia relativamente altas. La Tabla 1 muestra el esquema de desconexión de carga adoptado en el sistema eléctrico de la región Noreste de Brasil.

Tabla 1. Ajustes de Relés para Desconexión de Carga

Etapa	Ajuste $df/dt$	Frecuencia Absoluta (Respaldo)	
		Tiempo de Retardo	Instantáneo
1º	0.7 Hz/s	58.5 Hz, 10s	57.3 Hz
2º	1.1 Hz/s	58.5 Hz, 11s	57.2 Hz
3º	1.5 Hz/s	58.5 Hz, 12s	57.1 Hz
4º	1.7 Hz/s	-	56.8 Hz
5º	1.9 Hz/s	-	56.5 Hz

## 3. Medidas de frecuencia y técnicas de estimación

La estimación de la frecuencia del sistema requiere un adecuado procesamiento de señal y ajustes de parámetros, en lo que respecta a la ventana de tiempo, la frecuencia de muestreo de la señal y la estrategia de filtrado.

Cualquiera que sea el método que se emplee para la estimación de la frecuencia, debe mencionarse algunas cuestiones importantes.

Por ejemplo, estimar la frecuencia con base en la señal de tensión de una sola fase puede conducir a un error apreciable cuando la fase en cuestión falla. En este caso, la tensión se aproxima a cero, siendo la señal comparable en magnitud al ruido.

Además, dependiendo del punto de ocurrencia de la falla en la onda de tensión, puede haber un componente de CC significativo (decayendo exponencialmente) que también puede generar errores en las mediciones de frecuencia.

Para evitar o mitigar el efecto de dicha fuente de errores, la estimación de frecuencia se puede realizar utilizando la secuencia positiva de las señales de tensión (trifásicas), lo que conduce a mejores resultados.

El texto a continuación, revisa los métodos de medición y estimación de frecuencia para apoyar el análisis de las ocurrencias mencionadas anteriormente en una planta petroquímica.

### 3.1. Transductores de medición de frecuencia

Algunos transductores de medición de frecuencia proporcionan una señal de corriente de salida con una magnitud entre 4 y 20 mA proporcional a la frecuencia de la señal de entrada

Estos transductores todavía se utilizan en gran medida, incluso considerando que equipos digitales modernos se han empleado en el monitoreo y la protección del sistema de energía.

Uno de los inconvenientes de este tipo de medición de frecuencia es el tiempo de respuesta del transductor, que se retarda por la necesidad de filtrado previo de las señales de entrada.

Sin filtrado, la medición no será satisfactoria y se verá afectada por ruido aleatorio.

Sin embargo, es exactamente este filtrado lo que hace que la medición de frecuencia de estos transductores sea estable e insensible al ruido relacionado con los huecos de tensión.

Entonces, para el caso de eventos dinámicos como el desequilibrio de carga y generación, este método de medición de frecuencia es muy utilizado.

### 3.2. Estimación de frecuencia basada en cruce por cero

El método más tradicional para la estimación de la frecuencia se basa en la medición del tiempo entre dos puntos consecutivos de cruce por cero de la forma de onda, como se muestra en la Figura 1.

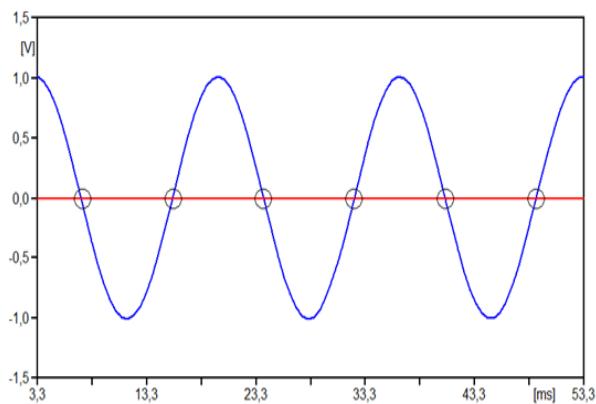


Figura 1 Puntos de cruce por cero en una onda sinusoidal.

Medición del tiempo  $T$  entre dos puntos consecutivos de cruce por cero

$$f = 1/2T \quad (1)$$

En un sistema con una frecuencia de 60 Hz, el período de forma de onda a medir es de 16,67 ms.

Si por ejemplo la frecuencia aumenta a 61 Hz, el período a medir será de 16,36 ms.

La metodología de estimación de frecuencia basada en los puntos de cruce por cero se emplea a menudo debido a su fácil implementación y bajos requisitos de procesamiento.

La implementación práctica de este método involucra la aplicación de una señal de entrada en un amplificador operacional de alta ganancia para saturar la señal de salida. Esto conduce a una forma de onda cuadrada en la salida del amplificador. Esta señal digitalizada luego se procesa, para obtener los instantes de tiempo de cruce por cero.

Este método es muy susceptible a los saltos de fase de la señal que ocurren con frecuencia durante los huecos de tensión debido los cortocircuitos y también debido a la caída exponencial del componente de CC que es muy común en las fallas del sistema que ocurren cerca del pico de la onda de tensión.

En este caso de estudio, la ventana de tiempo utilizada para evaluar la frecuencia del sistema para dar un disparo instantáneo considera solo un ciclo y medio de la señal de tensión.

Esta filosofía de protección de alta velocidad, había sido considerada por los ingenieros de protecciones, ya que el disparo a medio ciclo, siempre ha sido deseado, para la protección de equipos.

Esto quizás explique por qué los relés de frecuencia se han configurado para operar instantáneamente.

Esta práctica, sin embargo, ha llevado al disparo involuntario de la planta industrial con esquema de desconexión de carga, causando pérdidas económicas elevadas.

### 3.3. Cálculo de frecuencia basado en el estándar IEC C37.118 [5]

El estándar IEEE C37.118 para sincrofases en sistemas de potencia, proporciona las pautas para las mediciones de fasores en las aplicaciones actuales que utilizan el sistema GPS (Satélite de posicionamiento global).

Como las tensiones trifásicas o los fasores de corriente, se miden utilizando ventanas de tiempo de tamaño fijo y de dimensión pre-especificada, el ángulo de fase de los fasores estimados, se mantiene constante durante los pasos consecutivos de análisis.

Las variaciones de frecuencia en la señal analizada, conducen a oscilaciones en el ángulo de fase de los fasores medidos, ya que la ventana de tiempo acompaña a las variaciones de tiempo de la señal.

Usando este estándar, la frecuencia de la forma de onda en un sistema de potencia a 60 Hz se puede estimar mediante (2):

$$f = 60 + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de los sincrofasores.

La Tabla 2 ilustra las variaciones de ángulo verificadas en una señal de entrada cuando el sistema cambia su frecuencia de 60 a 61 Hz. Este método de medición de frecuencia es muy estable y utiliza la variación de frecuencia (DFR) que resulta en una medición estable con bajos requerimientos de procesamiento, pero que no es comúnmente empleado.

Tabla 2 Diferencia de muestras entre fasores de señales a 60 Hz y 61 Hz

Time	Fractional Time	Synchrophasor - 60 Hz		Synchrophasor - 61 Hz		
		Frame number	Fractional second	Synchrophasor (0 degrees)	Synchrophasor (-90 degrees)	
k-1	9	0.900000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, -36°	X <sub>0</sub> /2, -126°
k	0	0.000000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 0°	X <sub>0</sub> /2, -90°
k	1	0.100000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 36°	X <sub>0</sub> /2, -54°
k	2	0.200000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 72°	X <sub>0</sub> /2, -18°
k	3	0.300000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 108°	X <sub>0</sub> /2, 18°
k	4	0.400000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 144°	X <sub>0</sub> /2, 54°
k	5	0.500000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 180°	X <sub>0</sub> /2, 90°
k	6	0.600000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 144°	X <sub>0</sub> /2, 126°
k	7	0.700000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 108°	X <sub>0</sub> /2, 162°
k	8	0.800000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 72°	X <sub>0</sub> /2, -162°
k	9	0.900000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, -36°	X <sub>0</sub> /2, -126°
k+1	0	0.000000	X <sub>0</sub> /2, 20°	X <sub>0</sub> /2, -90°	X <sub>0</sub> /2, 0°	X <sub>0</sub> /2, -90°

#### 4. Caso de estudio

Esta sección presenta los datos registrados que motivaron el caso de estudio de este artículo. Después de revisar los registros de perturbaciones, se extraen sugerencias importantes para evitar sucesos similares.

La Tabla 3 muestra el ajuste de los relés para la desconexión de carga en la planta petroquímica, los cuales constituyen el punto central del análisis.

Tabla 3. Ajustes del Relé para Desconexión de Carga en la Planta Petroquímica

Tiempo de retardo del disparo		Disparo instantáneo	
Frecuencia (Hz)	Tiempo (s)	Frecuencia (Hz)	Tiempo (s)
58.5	10.0	57.3	0.0
58.5	11.0	57.2	0.0
58.5	12.0	57.1	0.0
-	-	56.8	0.0
-	-	56.5	0.0

#### 4.1. Registro de la perturbación

La Figura 2 muestra las tensiones y corrientes de fase de la línea de transmisión a 230 kV que alimenta la planta petroquímica durante dos perturbaciones diferentes causadas por un cortocircuito entre fases en la red de 500 kV [6].

Estas fallas fueron provocadas por un incendio en un área de cultivo de caña de azúcar, las cuales son comunes que se coloquen debajo de las líneas de transmisión en esa región.

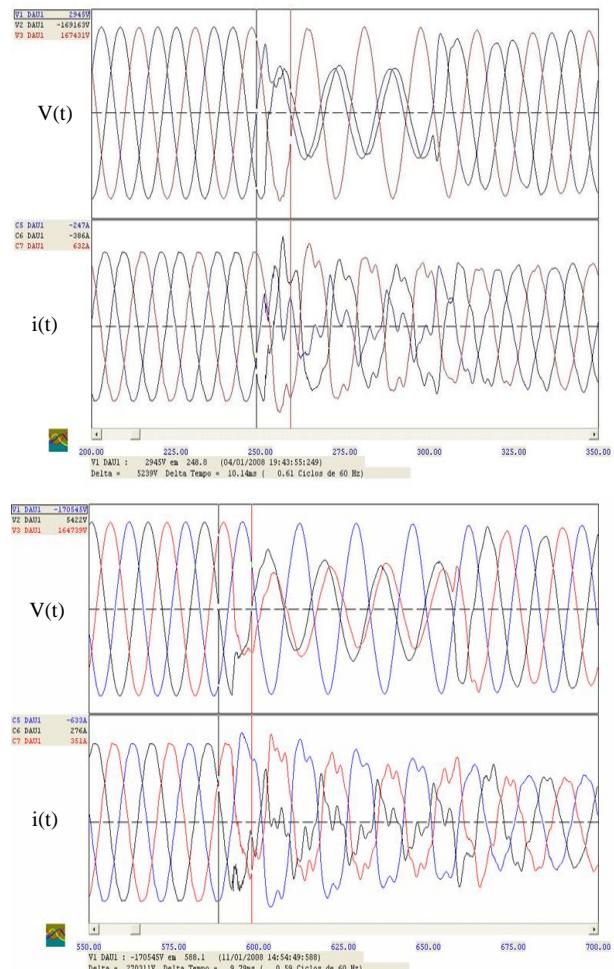


Figura 2. Ondas de tensiones  $V(t)$  y corrientes  $i(t)$  en línea a 230 kV que alimenta la planta petroquímica durante dos perturbaciones diferentes en red a 500 kV causadas por un cortocircuito fase a fase

La Figura 3 muestra una de las tensiones de fase de la red de 500 kV durante la perturbación. Un análisis detallado de las formas de onda de tensión, muestra que hay un

salto de fase de la tensión, el tiempo “t2” es mayor al tiempo “t1”, que fue señalado como la causa de la operación de los relés de frecuencia. Esta condición se aprecia también en las corrientes de la Figura 2.

En realidad, no hubo variación de frecuencia en el sistema ya que no hubo desbalance generación-carga ni un potencial problema de estabilidad. Sin embargo, las funciones de protección asociadas a este tipo de eventos actuaron, con base en el ajuste presentado anteriormente en la Tabla 3, por lo que la planta petroquímica fue desconectada.

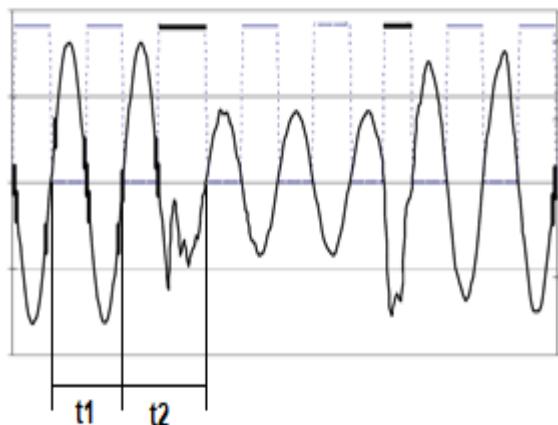


Figura 3: Forma de onda de tensión de 500 kV de fase a tierra durante la falla por incendio en la red a 500 kV.

La estimación de frecuencia procesada por el relé instalado en la planta petroquímica, registró una desviación de frecuencia instantánea de 54 a 66 Hz al inicio y al final del hueco de tensión.

De hecho, se encontró que la ventana de tiempo para estimar la frecuencia del sistema en los relés, se basó en solo 3 medios ciclos a 60 Hz de la señal de tensión y los relés se habían configurados con disparo instantáneos [7].

Cabe recalcar que la desconexión de una planta petroquímica como la analizada en este estudio constituye un gran inconveniente.

En ocasiones, se tarda uno o dos días en recuperar el estado operativo original de los procesos, provocando grandes pérdidas económicas.

Como los relés no presentaron ningún mal funcionamiento, se debe analizar cuidadosamente una puesta a punto instantánea para evitar a futuro, inadecuadas desconexiones de carga.

En la figura 3 se puede ver que se verificó una diferencia de tiempo relativamente mayor entre dos puntos de cruce por cero consecutivos (t1 y t2) justo después del inicio de

la falla. Además, se verifica una diferencia de tiempo menor entre dos puntos de cruce por cero consecutivos justo después de la eliminación de la falla.

Estas observaciones se referían al estado de frecuencia normal del sistema antes del inicio de la falla.

## 5. Conclusión

Dado que no se percibió ningún mal funcionamiento del equipo de protección en el análisis del caso de estudio presentado en este documento, la protección de frecuencia relacionada con la filosofía actual de desconexión de carga, que ha llevado a la interrupción de una gran planta industrial, debe pensarse mejor.

El elemento de protección instantánea basado en variaciones de frecuencia podría ajustarse mejor para evitar ocurrencias similares. En este contexto, una propuesta válida para mejorar la calidad y continuidad de la energía es utilizar un método de estimación de frecuencia para evitar este tipo de disparos instantáneos, dando tiempo para eliminar las fallas [8].

Por lo tanto, los procedimientos de red actualmente recomendados podrían mejorarse para lograrlo. Esto se puede hacer simplemente cambiando el “disparo instantáneo de frecuencia” a un disparo temporizado de algunos ciclos.

El balance generación-carga, en tal situación, continuaría siendo satisfactorio ya que la frecuencia de un generador no puede cambiar abruptamente debido a la inercia involucrada en la dinámica del generador.

De esta forma, una falla en el sistema de energía no debe ser interpretado por el relé de frecuencia con ajuste de desconexión de carga instantáneo como una desviación de frecuencia y no se produciría una interrupción de la alimentación de carga.

## 6. Referencias

- [1] IEC61000-4-30 Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, IEC, 2003.
- [2] Rebizant, W. and Terzija, V., Asynchronous Generator Behavior after a Sudden Load Shedding, IEEE Bologna Power Tech Conference, Vol. 2, Issue 23-26, June, 2003, 7 pp
- [3] W. Rebizant, J. Szafran and M. Michalik: “Adaptive estimation of wide range frequency changes for power generator protection and control purposes”, IEE Proc. – Generation, Transmission and distribution, vol. 146, no. 1, pp. 31-36, Jan. 1999
- [4] ANEEL 140/02. Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasil, 2002.

- [5] IEEE Standard C37.118, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, 2005.
- [6] Bronzeado, H. S., Zimath, S. L and Coser, J., “Effect of Voltage Dips on Frequency Relays: Case Study of Power Quality Improvements in a Petrochemical Plant”, International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP, Greece, 2008.
- [7] “Woodward: MRF3-Frequency Relay, Manual”, Revision A, 2008.
- [8] Hassan, A.A.M., Kandeel, T.A., “Effectiveness Frequency Relays on networks with multiple distribute generation”, Journal of Electrical Systems and Information Technology 2 (2015) pages 75-85, 2015.