

## Deslaste de carga en sistemas de potencia

---

El deslaste de carga como herramienta poderosa para corregir grandes perturbaciones en un sistema de potencia, se presenta en términos de consideraciones prácticas relativas a la carga total por deslastar y la distribución de esta carga en etapas y los demás parámetros que definen un esquema de deslaste. Se explican las características de un programa de computador específicamente desarrollado para el estudio, el cual comprende el modelado del sistema de potencia adicionado al problema enfrentado. Lo anterior se complementa con un análisis de casos para una de las empresas de energía, haciendo énfasis en la metodología adoptada.

Las conclusiones establecen la importancia del deslaste de carga para el sistema cuando está operando en condiciones críticas, ocasionadas por fallas en la generación, sin respaldo en la generación interna o asistencia de los sistemas vecinos a través de las líneas de interconexión. Como parte de las conclusiones se recalcan aquellos resultados que pueden ser aplicables a cualquier sistema de potencia.

---

**RENATO CESPEDES**  
Ingeniero Electricista  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional

**BERNARDO RESTREPO M.**  
Ingeniero Electricista  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional

**HERNANDO ROA**  
Ingeniero Electricista  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional

### INTRODUCCION

El adecuado planeamiento en cuanto a recursos de generación y transmisión de un sistema de potencia asegura su correcto funcionamiento en presencia de la mayoría de las contingencias previsibles. Sin embargo, en caso de posibilidades severas el sistema no puede, con los mecanismos normales, seguir manteniendo el balance generación-carga.

En estos casos extremos, detectados principalmente por condiciones de baja frecuencia, es deseable contar con mecanismos que restablezcan el equilibrio necesario entre la generación y la carga: los mecanismos analizados en este documento se relacionan con la desconexión de parte de la carga suministrada por el sistema en un momento dado, mecanismo que tradicionalmente se ha denominado deslaste de carga. Ante la aparición de perturbación en el sistema (pérdida de generación o aumento súbito de carga) los gobernadores de velocidad de las unidades generadoras llevan al sistema de potencia a una nueva condición de operación, aumentando la potencia generada por las unidades. Si la perturbación es extrema, los gobernadores, a causa de la lentitud de su respuesta o debido a limitaciones de potencia de las unidades, no alcanzan a corregir la perturbación. La velocidad de las máquinas (y por tanto la frecuencia del sistema) decaerá progresivamente. Este fenómeno ocasiona las pérdidas, en cadena, de unidades generadoras, llegando en ocasiones a producir colapsos totales o "apagones" de un sistema eléctrico.

Lo anterior sugiere la necesidad de un mecanismo complementario que sea eficaz para restablecer el balance generación-carga en un sistema de potencia. El objetivo fundamental de este trabajo es el de estudiar la factibilidad del deslaste de carga en sistemas de potencia en Colombia, para lo cual se analiza un conjunto de esquemas de deslastes y sus parámetros más importantes (carga total deslastada, número de etapas de deslaste, cargas específicas para desconectar por etapa), con el fin de desarrollar una metodología que permita seleccionar el valor de dichos parámetros. Este análisis requirió el desarrollo de un programa de computador adecuado a las características del problema.

## DESLASTRE DE CARGA GENERALIDADES

Posterior a la situación crítica que se vivió durante el "apagón" del noreste de los Estados Unidos se dio mayor importancia a los estudios tendientes a establecer mecanismos y programas que recuperaran el sistema durante condiciones de operación a bajas frecuencias. El resultado de estas investigaciones llevó a la conclusión de que el deslastre de carga era un mecanismo eficaz para restablecer el balance generación-carga, si la acción reguladora de los gobernadores de velocidad era infructuosa.

### Métodos utilizados para la ejecución del deslastre de carga

En general, las operaciones de deslastre de carga en un sistema de potencia pueden llevarse a cabo de las siguientes formas:

- Operación manual
- Supervisión desde un centro de control
- Acción de relevos.

Este estudio trata la última de las formas mencionadas, es decir, la operación de deslastre realizada por relevos de baja frecuencia, los cuales están en capacidad de detectar el estado de frecuencia y actuar automáticamente ordenando el disparo de ciertos interruptores.

### Límites de frecuencia de operación del sistema

El programa de deslastre debe diseñarse para que actúe dentro de un rango de frecuencias específico. La amplitud del rango de frecuencia está limitada por las características de diseño de las turbinas y generadores así como también por los puntos de operación de las protecciones de supravoltaje e infravoltaje.

Tomando en consideración los puntos anteriores, se llegó a la conclusión de que las operaciones de deslastre debían mantener los valores de frecuencias comprendidos entre 57 y 61 Hz. durante el transitorio y una estabilización entre 59.5 y 60.5 Hz una vez estabilizado el sistema.

### Etapas de deslastre y magnitudes de carga a deslastres por etapa

El deslastre de carga debe actuar en forma tal que no ocasione problemas adicionales. Un desbalance puede evitarse deslastando una cantidad de carga de magnitud cercana a la sobrecarga inicialmente impuesta. Sin embargo, desconectar una gran carga es contraproducente por los sobrevoltajes que puede ocasionar. Además, la excursión de frecuencia puede alcanzar valores muy altos (por arriba de 60 Hz). Lo anterior sugiere la ejecución del deslastre en forma gradual, es decir, desconectando la carga necesaria para la recuperación de la frecuencia, en varias etapas.

En cuanto a la cantidad de carga por deslastar en cada etapa, el criterio generalizado es el de tratar de disminuir la rata inicial de decaimiento de la frecuencia con el objetivo de evitar grandes excursiones de la misma. Para lograr este objetivo, la carga total por deslastar se distribuye en fracciones

seleccionando deslastres mayores sobre las primeras etapas. El nivel de frecuencia al cual se comienza a deslastar comúnmente es tomado 59.5 Hz. Los demás puntos se seleccionan con intervalos de 0.2 a 0.4 Hz entre etapas.

### Determinación de la cantidad total que hay que deslastar

Los criterios usados para evaluar la cantidad total de carga que se deslasta en un sistema se basan en la coordinación con los relevos de protección de los grupos turbina-generador. A partir de éstos, la carga total debe cumplir los siguientes requisitos:

- La cantidad total que hay que deslastar deberá ser efectiva para prevenir las excursiones de frecuencia por debajo de 57 Hz, durante un tiempo no mayor a 30 ciclos.
- La frecuencia del sistema debe recuperarse lo más rápidamente posible para evitar que actúen las protecciones de los grupos turbina-generador.
- El sobrepaso de frecuencia debido a un deslastre debe limitarse a 61 Hz como máximo.

### MODELO DEL SISTEMA DE POTENCIA

Un alto grado de atención se ha dado a la modelación del sistema de potencia con el objetivo de obtener una respuesta del sistema lo más próxima a la realidad para el tipo de perturbaciones analizadas.

El modelo general está constituido por:

- Máquinas sincrónicas
- Control de excitación
- Turbinas (hidráulicas-térmicas).
- Generadores de velocidad.
- Relevos de baja frecuencia (electrónicos).
- Red de transmisión (líneas, transformadores, cargas).

Como resultado de esta modelación se presentan dos grupos de ecuaciones, a saber:

$$h(x, y) = 0 \quad 3-1$$

$$\dot{x} = g(x, y, t) \quad 3-2$$

**X:** Variables de estado (dinámico)

**Y:** Variables asociadas con la red de transmisión.

La ecuación 3-1 describe el comportamiento en estado estacionario de la red. La ecuación 3-2 describe el funcionamiento dinámico de la máquina sincrónica y sus controles.

Para la solución de las ecuaciones 3-1 y 3-2 se ha adoptado una estrategia de solución del tipo alternado, algebraizando previamente las ecuaciones diferenciales por intermedio de la regla trapezoidal de integración.

### CASOS ESTUDIADOS

Uno de los objetivos primordiales de este trabajo es el de probar esquemas de deslastre que tengan aplicación directa a los sistemas de potencia colombianos. Para este estudio se seleccionó el

Tabla I

Esquema	Porcentaje de la carga total a ser deslastrada (SLD)	Porcentaje de la carga por deslastrar por etapa (% SLD)		
		1a. etapa	2a. etapa	3a. etapa
3.A.a	40	33 1/3	33 1/3	33 1/3
3.A.b	40	50	30	20
3.A.c	40	20	30	50
3.A.d	40	40	30	30
3.B.a	30	33 1/3	33 1/3	33 1/3
3.B.b	30	50	30	20
3.B.c	30	20	30	50
3.B.d	30	40	30	30
3.C.a	20	33 1/3	33 1/3	33 1/3
3.C.b	20	50	30	20
3.C.c	20	20	30	50
3.C.d	20	40	30	30

Tabla II

Esquema	Porcentaje de la carga total a ser deslastrada (SLD)	Porcentaje de la carga por deslastrar por etapa (% SLD)			
		1a. etapa	2a. etapa	3a. etapa	4a. etapa
4.A.e	40	25	25	25	25
4.A.f	40	40	30	20	10
4.A.g	40	10	20	30	40
4.A.h	40	15	20	25	40
4.B.e	30	25	25	25	25
4.B.f	30	40	30	20	10
4.B.g	30	40	20	30	40
4.B.h	30	15	20	25	40
4.C.e	20	25	25	25	25
4.C.f	20	40	30	20	10
4.C.g	20	10	20	30	40
4.C.h	20	15	20	25	40

sistema de la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá (EEEB), por considerarlo representativo de los existentes en el país, de tal forma que las conclusiones obtenidas puedan ser extendidas en sus características generales al caso colombiano.

#### Perturbación máxima y mínima seleccionadas

El deslastre de carga debe restablecer el balance generación-carga, en el caso de presentarse una perturbación de gran magnitud, como también ante el establecimiento de una perturbación pequeña. Lo anterior sugiere la existencia de un rango en el cual el deslastre debe operar. Teniendo en cuenta que la capacidad instalada en el sistema de EEEB para el año 1980 es de 1045 MW, se escogieron como perturbaciones (máxima y mínima) las siguientes:

Pérdida máxima de generación: 350 MW  
Pérdida mínima de generación: 50 MW

En otras palabras, los esquemas de deslastre deben estar en capacidad de recuperar el sistema para cualquier sobrecarga en el rango (5.3%-50.35%) calculadas a partir de la siguiente ecuación:

$$\%OL = \frac{A}{B - A} * 100$$

%OL = Porcentaje de sobrecarga (equivalente)

A = Pérdida de generación

B = Generación inicial (antes de la perturbación).

#### Esquemas de deslastre

En este estudio se escogieron esquemas de deslastre de tres y cuatro etapas. Estos se programaron para deslastrar cargas totales de 20, 30, 40% en tres configuraciones de carga por etapa a saber:

- Cargas iguales que hay que desconectar por etapa.
- Cargas mayores sobre las primeras etapas (esquemas descendentes).
- Cargas mayores sobre las últimas etapas (esquemas ascendentes).

Las Tablas I y II presentan los esquemas (3 y 4 etapas) seleccionados.

#### Resultados y análisis

Los resultados cuantitativos pueden observarse en

Tabla III

Caso	Esquema	Perturbación	%				%	Frecuencia mínima Hz	Sobre-paso	Tiempo para 57 Hz (Sec)	Tiempo para 60 Hz (Sec)	Etapas ejecutadas	Estabilización de frecuencia	
			1a.	2a.	3a.	4a.								carga total
1	4A.e	Min	4	25	25	25	25	40	59.5	61.7	—	15	1	60.16
2	4B.e	Max	4	25	25	25	25	30	58.5	60.4	—	10	4	59.93
3	4B.e	Min	4	25	25	25	25	30	59.5	61.2	—	15	1	60.09
4	4C.e	Max	4	25	25	25	25	20	54.2	—	19.2	—	4	59.6
5	4B.h	Max	4	15	20	25	40	30	58.4	60.2	—	7.2	4	59.9
6	4B.h	Min	4	15	20	25	40	30	59.5	60.5	—	12.6	59.99	
7	4C.h	Max	4	15	20	25	40	20	53.8	—	20.5	—	4	59.6
8	4A.g	Min	4	10	20	30	40	40	59.5	60.4	—	12	1	59.97
9	4A.g	Max	4	10	20	30	40	40	58.6	62.2	—	15	4	60.21
10	4B.g	Max	4	10	20	30	40	30	58.4	60.3	—	9.6	4	59.9
11	4B.g	Min	4	10	20	30	40	30	59.5	60.2	—	11.4	1	59.94
12	3C.a	Max	3	33	33	33	—	20	54.2	—	22	—	3	59.6
13	3B.c	Max	3	20	30	50	—	30	58.6	60.3	—	10.5	3	59.91
14	3B.c	Min	3	20	30	50	—	30	59.5	61	—	14.7	1	60.15
15	4C.f	Min	4	40	30	20	10	20	59.5	61	—	17	1	60.09
16	4C.f	Max	4	40	30	20	10	20	54.1	—	—	—	4	59.6

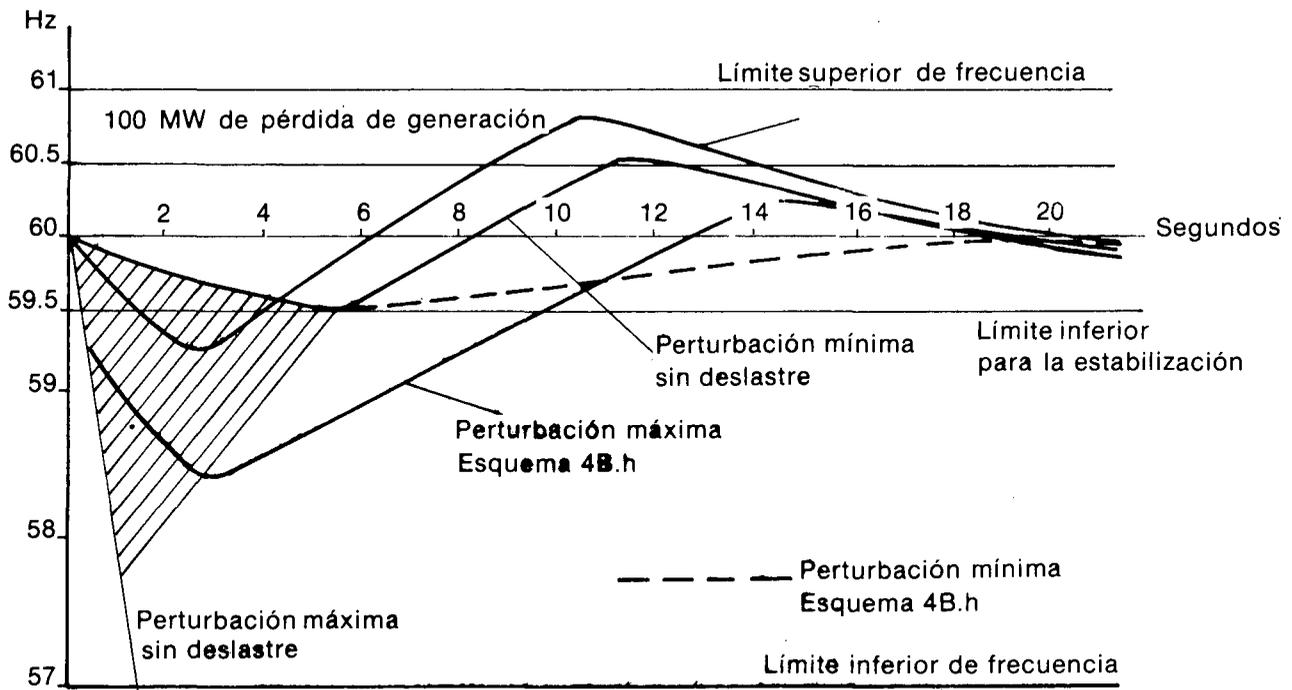


FIGURA 1.

la Tabla III. En ella se presenta una descripción del esquema y las características principales del comportamiento de la frecuencia.

La Figura 1 presenta un caso ilustrativo del comportamiento dinámico de la frecuencia.

Dentro de esquemas de tres etapas, sólo uno de ellos (3BC) presenta un buen comportamiento. Sin

embargo, la respuesta del sistema a los esquemas de cuatro etapas es superior. Centrando la atención sobre los esquemas de 4 etapas se considera que los denominados 4B<sub>g</sub> y 4B<sub>h</sub> están en capacidad de proteger al sistema bajo perturbaciones en el rango de 50-350 MW y 50 MW. En la Figura 2 este rango estaría representado por el área sombreada, com-

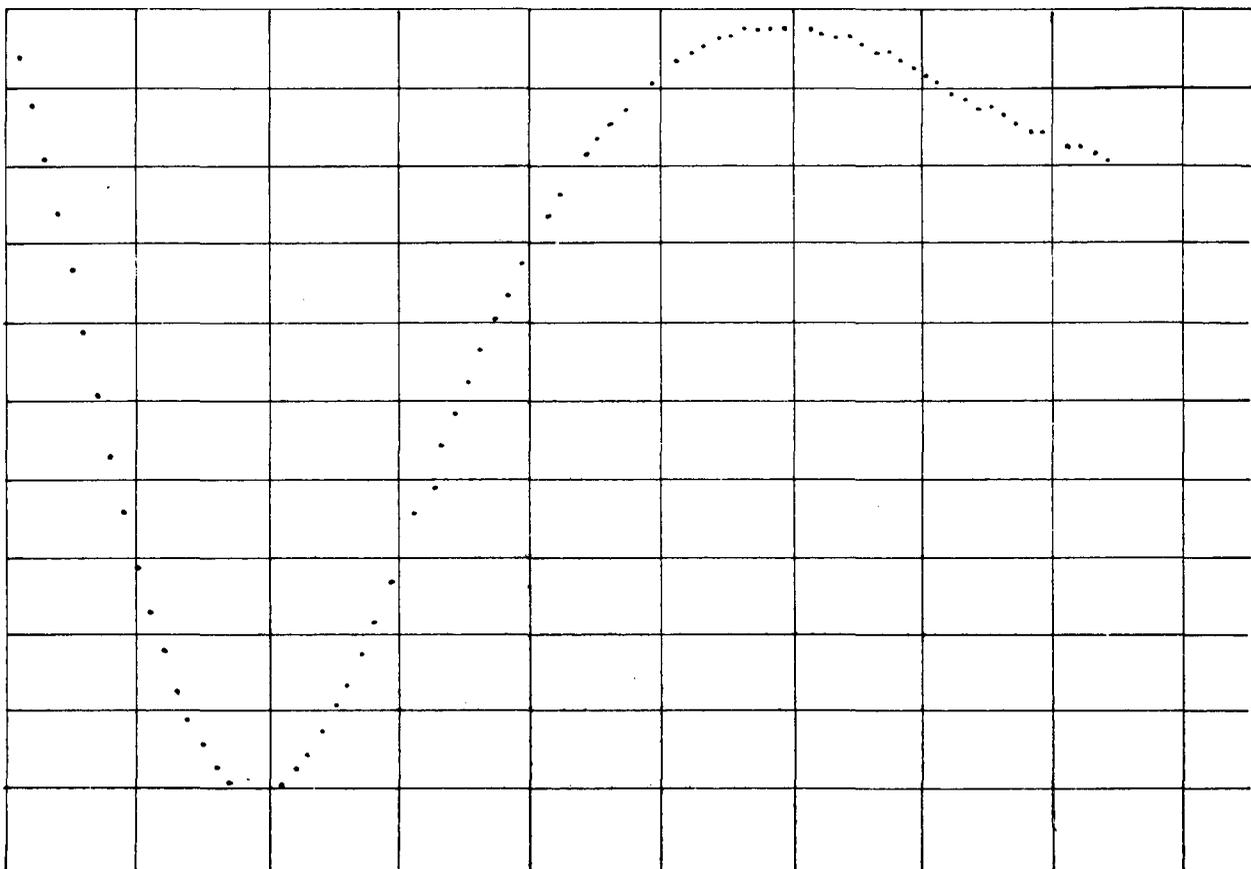


FIGURA 2. Curva de la frecuencia del sistema.

preendida entre las curvas de frecuencia del sistema para las dos perturbaciones y sin deslastrar carga.

### CONCLUSIONES

- El deslastre de carga es un mecanismo de protección eficaz para contrarrestar desbalances entre la generación y la carga en un sistema de potencia.
- El total de carga programada para el deslastre debe corresponder en magnitud a la perturbación máxima contra la cual se desee proteger al sistema bajo estudio.
- El porcentaje de carga que hay que desconectar en la primera etapa debe ser del mismo orden de magnitud que la perturbación mínima contra la cual se desee proteger al sistema.
- Un esquema de deslastre de cuatro etapas presenta un mejor comportamiento que los de tres etapas propuestos.
- La distribución porcentual de carga por etapa en forma ascendente (pequeños porcentajes sobre las primeras etapas), presenta un mejor comportamiento desde el punto de vista de la protección que debe proporcionarse a la perturbación mínima contemplada en el estudio.
- El número de etapas de deslastre efectivamente utilizadas depende de la magnitud de la perturbación que se presente.

### BIBLIOGRAFIA

- IEEE Committee Report. **Dynamic Models for Steam and Hydroturbines in Power System Studies**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-92, pp. 1904-1915, December 1973.
- IEEE Committee Report. **Computer Representation of Excitation Systems**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp. 1460-1464, June 1968.
- R. Podmore. **Power System Dynamic Simulation Program — User's Manual**. University of Saskatchewan, January 1974.
- F. P. Dommel, N. Sato. **Fast Transient Stability Solution**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp. 1643-1650, July-August, 1972.
- R. M. Maliszewsky, R. D. Dunlop, G. L. Wilson. **Frequency Actuated Load Shedding and Restoration Part I — Philosophy**, IEEE Transaction Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, pp. 1452-1459, Nº 4, 1971.
- S. H. Horowitz, A. Politis, A. F. Gabrielle. **Frequency Actuated Load Shedding and Restoration — Part II — Implementation**, IEEE Transaction Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, 1460-1468, Nº 4, 1971.
- H. E. Lokay, V. Burtnyk. **Application of Under frequency Relays for Automatic Load Shedding**, IEEE Transaction Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, pp. 776-783, 1968.
- D. W. Smaha, C. R. Rowland, J. W. Pope. **Coordination of Load Conservation with Turbine — Generator — Under Frequency Protection**. IEEE Transaction Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 1137-1150, Nº 3, May/June, 1980.
- B. Restrepo, H. Roa. **Deslastre de Carga en Sistemas de Potencia**, Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad Nacional de Colombia, 1982.