



COMISION DE INTEGRACION ENERGÉTICA REGIONAL
1. COMITE NACIONAL BRASIL
Código: III CONCIER-BR-95-D
III CONGRESO CIER DE LA ENERGÍA –CONCIER 2007
ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO REGIONAL – RETOS Y PERSPECTIVAS –
Medellín, 27-30 de Noviembre de 2007

TÍTULO DEL TRABAJO:
SUMINISTRO DE RESERVAS OPERATIVAS A TRAVÉS DE LA GENERACIÓN
DISTRIBUIDA.

Lugar y fecha de elaboración del documento: Campinas, Brasil 15 Septiembre 2007

Subtema: D4

Área: Generación Distribuida

Autor/es: FRANCISCO D MOYA CH (a), Dr GILBERTO DE MARTINO JANNUZZI (b), Dr LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA (c), GERARDO MIGUEL AGURTO LESCANO (d)

Empresa o Entidad: Universidad de Campinas, UNICAMP, Brasil

Cargo: (a) Doctorando en Planeamiento de Sistemas Energéticos, (b) Profesor asociado Plan. de Sistemas Energéticos, (c) Profesor asociado Facultad de Ingeniería Eléctrica, (d) Doctorando Facultad de Ingeniería Eléctrica.

PALABRAS-CLAVE: Generación Distribuida, Reservas Operativas, Servicios Auxiliares.

DATOS DEL AUTOR REPOSABLE

Dirección: Rua Leopoldo Amaral 299

Teléfono: 55-19-35213285

Fax: 55-19-32893722

E-Mail: framo@fem.unicamp.br

Cargo: Estudiante de Doctorado

diferentes resultados del trabajo son descritos en el análisis de tensión y pérdidas de energía activa como reactiva.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de confiabilidad encierra dos atributos en un sistema de potencia eléctrico: seguridad y suficiencia. La seguridad se describe como la habilidad del sistema para enfrentar diferentes disturbios, esto con el uso de equipos de protección, despachos obligados de máquinas y otros servicios auxiliares. Suficiencia representa la habilidad del sistema para responder los requerimientos de todos los consumidores para cualquier periodo de tiempo.

En términos económicos, el concepto de seguridad puede ser visto como un bien público. Los sistemas de tránsito, la infraestructura de defensa nacional, las leyes así como muchos otros, son referenciados como un bien público. Algunos autores consideran la seguridad del sistema como un bien público [1], siendo entonces el tema de reservas operativas de un sistema eléctrico un

RESUMEN:

Para los actuales y futuros mercados de electricidad, los servicios auxiliares representan un importante rol para la operación de sistemas eléctricos. Dentro de todos los servicios auxiliares, las reservas operativas ocupan un significativo campo de investigación, el cual cubre desde su forma de entrega hasta el precio de venta y compra. Actualmente, la Generación Distribuida entra como un nuevo participante en el suministro de servicios auxiliares, y su uso es primordial en el tema de reservas operativas. Este trabajo muestra algunas de las ventajas y desventajas técnicas en la utilización de la Generación Distribuida en el suministro de reservas operativas. Fueron simulados diferentes escenarios en donde la generación de energía eléctrica fue realizada en forma centralizada y de forma descentralizada. Los

elemento clave de seguridad. Similar a otros bienes públicos, la seguridad de un sistema de potencia no tiene claras indicaciones de su costo por usuario. Algunos usuarios pueden refutar la idea de pagar por las reservas operativas cuando se piensa que estos usuarios no consumen estas reservas, y si están pagando por una seguridad extra para otros usuarios. El problema entonces es decidir el nivel de adquisición óptima para cada usuario en el sistema y derivar un método para realizar esta adquisición así como el cálculo de sus costos.

Los mercados de electricidad en diferentes países, se diferencian en gran medida en los métodos ó procedimientos en el manejo de las reservas operativas. Por ejemplo, en Gran Bretaña las reservas son adquiridas a través de contratos de largo plazo. En el mercado Nord Pool, las empresas de energía son obligadas a suministrar servicios auxiliares específicos, cuando estas desean participar en el mercado de electricidad. En California existe un mercado de reservas independiente y paralelo al mercado de energía eléctrica. En Nueva Inglaterra existe un mercado de capacidad, similar a un mercado de reservas operativas. En Brasil, la legislación establece una reserva operativa total para el sistema eléctrico, igual a la capacidad del mayor generador de energía en el sistema. En la actualidad, la central de Itaipu con 6,3 GW establece el tope máximo de reservas operativas. La capacidad instalada actual del sistema eléctrico brasilero es de 91,17 GW, siendo entonces la reserva operativa brasilera un 6,9% del valor total instalado.

Los nuevos sistemas eléctricos están cambiando y con la Generación Distribuida (GD), las redes de distribución dejan de ser entes pasivos para ser nuevas redes de distribución activas [2]. Los nuevos y futuros esquemas de GD presentan una amplia posibilidad de nuevos suministradores de energía eléctrica y otros complementarios como los servicios auxiliares, dentro de los cuales se contempla el suministro de reservas operativas. La GD entra como un nuevo participante en los actuales y futuros sistemas eléctricos en la programación y despacho de reservas operativas [3].

El despacho de unidades centralizadas exige un nivel mayor de generación de energía, el cual

debe suministrar energía a todos los puntos de la red cubriendo la potencia de carga y aquella que se pierde en toda la red desde los niveles de transmisión hasta los puntos finales en la red de distribución [4]. La entrega de reserva de potencia activa a través de generadores en la red de distribución cercanos a las cargas, permite la disminución de pérdidas, mejorando los niveles de tensión e incrementando la seguridad al sistema [5].

Este trabajo muestra algunas de las ventajas técnicas y económicas en la utilización de la GD para la programación y entrega de reservas de potencia activa. En la siguiente sección, se describe la metodología utilizada. Seguidamente, son presentados los diferentes resultados del trabajo en dos aspectos principales: análisis de tensión y análisis de pérdidas. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

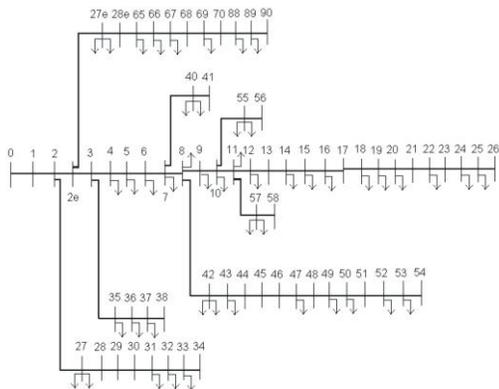
2. DESARROLLO DEL TRABAJO

ANALISIS TECNICO

En este trabajo se realizo la simulación de diferentes escenarios con el fin de comparar aspectos técnicos de generación de forma centralizada, contra generación de forma descentralizada con la participación de GD. Los escenarios incluyen la programación de reservas operativas de forma centralizada en los grandes generadores, así como de forma descentralizada en generadores ubicados en las redes de distribución.

Estos escenarios fueron realizados mediante el cálculo de flujo de carga en régimen permanente. Se tomo como referencia el sistema IEEE30 para realizar las simulaciones en donde fueron desagregados dos nodos de carga en media tensión para crear las redes de distribución en baja tensión [6]. En cada uno de los dos nodos fue instalado utilizando un sistema de distribución de 70 nodos TS2 [7] el cual se puede ver en la Figura 1. Dentro de los métodos para el cálculo de flujo optimo, fueron utilizados el de Newton-Raphson y Newton desacoplado rápido. Para la realización de las simulaciones fue utilizado el programa para análisis de sistemas de potencia MATPOWER [8].

Figura 1 Circuito de distribución utilizado



Fuente: [7]

ANALISIS ECONOMICO

Para la realización del análisis económico, fueron utilizadas dos herramientas computacionales para el análisis de despacho de sistemas eléctricos.

MODELO DE DESPACHO CON RESERVAS

El modelo de despacho económico de energía básica y reservas operativas es formulado de la siguiente forma:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i(P_i + PR1_i + PR2_i + PR3_i) + c_i(P_i^2 + PR1_i^2 + PR2_i^2 + PR3_i^2))$$

en donde se busca la minimización de costos de operación. La variable P representa la potencia activa básica y las variables PR1, PR2, PR3 representan los montos de las reservas operativas primaria, secundaria y terciaria respectivamente. Dentro de las restricciones establecidas se tiene en cuenta que la suma de la energía básica y las reservas sea menor ó igual a la potencia máxima instalada. La suma de las reservas debe ser menor ó igual al máximo valor de la reserva terciaria $PR3_i^{\max}$. De este modo, el despacho de energía es programado teniendo en cuenta las reservas operativas que deben estar presentes en un sistema eléctrico que permiten tener un nivel de seguridad adecuado. Los diferentes escenarios tomaron en cuenta la curvas de costos para algunas de las tecnologías mejor indicadas para el suministro de reservas operativas (como lo son las micro turbinas a gas y diesel, las cuales tienen un menor tiempo de respuesta). Es programado entonces un despacho de reservas en sistemas

centralizados y son comparadas con la entrega de estas reservas con la utilización de la GD. MODELO DE DESPACHO MARTPOWER

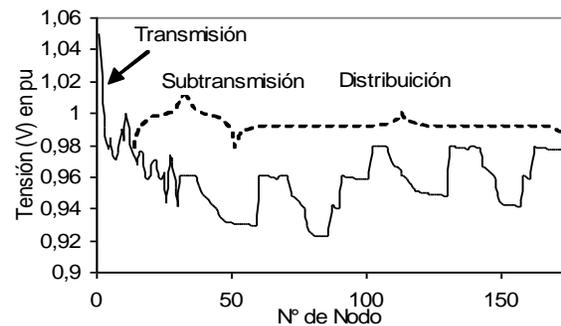
En la realización de las diferentes simulaciones, fue configurado el programa para que realizar un despacho buscando la minimización de costos. El programa utiliza diferentes funciones de minimización, teniendo en cuenta las curvas de costos de los generadores (lineal ó cuadrática).

3. RESULTADOS ANALISIS TÉCNICO

ANALISIS DE TENSION

Para realizar el estudio técnico, fue creado inicialmente el escenario base, en el cual la generación de energía activa (P) y reactiva (Q) fue entregada de forma centralizada a través de los generadores de grande porte. La Figura 2 muestra el perfil de tensión (V) para cada uno de los niveles: transmisión, subtransmisión y distribución. Los resultados de flujo de carga muestran que los niveles de tensión disminuyen desde los niveles de transmisión, hasta los nodos más lejanos en la red de distribución. Para la simulación del caso base, fue considerado la siguiente situación: los generadores centralizados aportan la energía activa y reactiva total demandada por el sistema eléctrico, suponiendo que están entregando también las reservas operativas programadas con anterioridad. En este estudio, no se considero el tipo de reservas catalogadas según el tiempo de respuesta.

Figura 2 Tensión (V) para cada nodo del Sistema



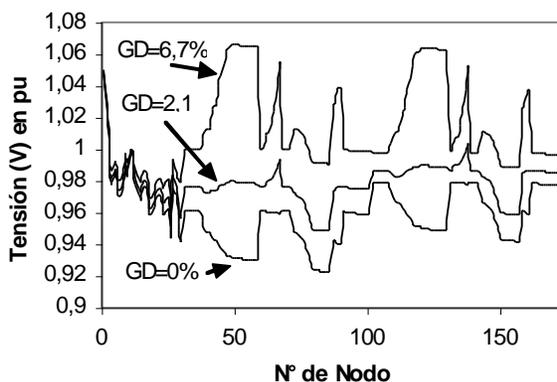
Fuente: Elaboración del autor

Otros escenarios fueron simulados incrementando los valores de entrega de energía activa (P) en la

red de distribución a través de diez (10) generadores de pequeño porte. De este modo, se simula la entrega de reservas operativas por parte de los generadores en la red de distribución. La Figura 3 muestra los resultados del caso base y otros dos escenarios donde la GD entrega potencia activa en valores de 2,1% e 6,7% de la carga total del sistema.

En Brasil, la reglamentación técnica establece que los valores mínimos y máximos para redes de electricidad con niveles de tensión menor a 231 KV, no deben superar el 95% y 105% respectivamente. La Figura 3 muestra que los niveles de tensión en el caso base, violan los niveles mínimos. La misma figura muestra que los niveles de tensión mejoran con la entrada de la GD aportando la reserva operativa programada. En los escenarios simulados se incremento la entrega de energía activa hasta completar un 10% de la generación total requerida por el sistema. La configuración del sistema analizado, comprueba que la entrega de potencia activa a través de la GD en un nivel de 2,5% de la carga total, es suficiente para cumplir con los niveles de tensión reglamentarios.

Figura 3 Tensión (V) para cada nodo del sistema con presencia de GD



Fuente: Elaboración del autor

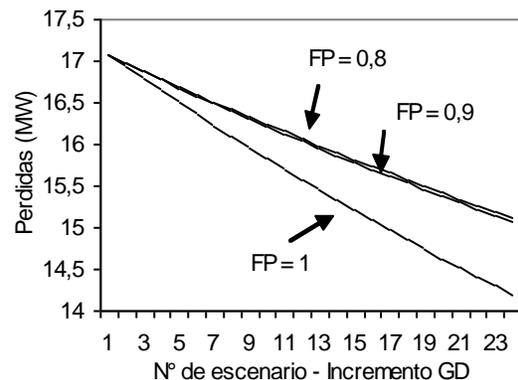
En la Figura 3 es posible observar que los límites máximos de tensión son violados cuando la participación de la GD es superior al 6,7% de la carga total. Al incrementar la entrega de potencia activa en la red de distribución, pueden presentarse niveles de sobre tensión, principalmente en la red de distribución y en menor

grado en las redes de subtransmisión y transmisión. Una alternativa para evitar tales violaciones, sería incluir mayor número de generadores de porte pequeño en las redes de distribución, lo que se denominaría como un aumento del nivel de penetración de GD con generadores de baja potencia.

ANALIS DE PÉRDIDAS

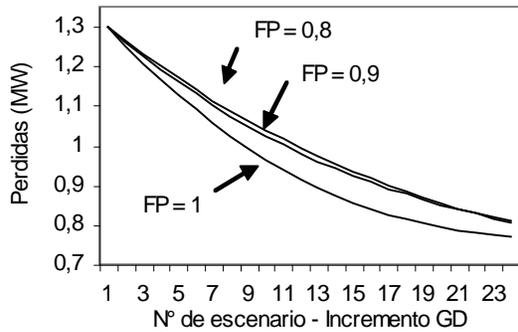
Las ventajas y desventajas de la GD también pueden ser conferidas en el tema de las pérdidas de energía activa y reactiva en los diferentes niveles de tensión del sistema eléctrico. Las Figuras 4 y 5 muestra la disminución de los niveles de pérdidas en la red de transmisión y subtransmisión respectivamente, en la medida en que el suministro de energía activa a través de la GD es incrementado. Para cada escenario, los incrementos fueron de 0.1 MW para cada generador distribuido. Fueron utilizados 10 generadores en las redes de distribución, por tanto, cada caso tiene un incremento de 1 MW en la entrega de energía activa a través da GD. Para el estudio realizado, en la red de transmisión la reducción del nivel de pérdidas fue de 2.88 MW, es decir, una disminución de casi 17%, dado que el nivel total en el caso base fue de 17 MW en la transmisión, 1.3 MW en subtransmisión, y 0.135 MW en distribución. En la red de subtransmisión, la reducción fue de 0,53 MW, reducción de casi 40%.

Figura 4 Pérdidas (MW) en Transmisión con diferentes FP en GD



Fuente: Elaboración del autor

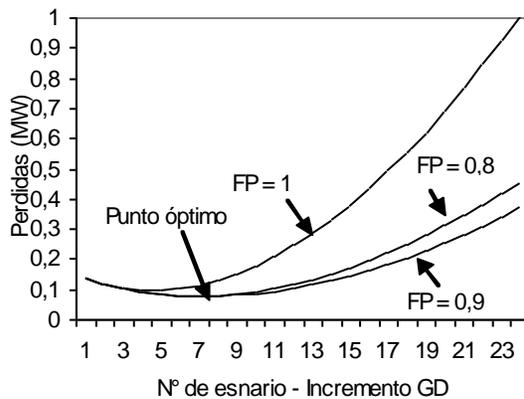
Figura 5 Perdidas (MW) en Subtransmisión con diferentes FP en GD



Fuente: Elaboración del autor

Los resultados de este análisis, indican que la GD presenta ventajas en la disminución de pérdidas sobre la red de distribución hasta cierto nivel de generación. En el sistema eléctrico analizado, la GD beneficia la disminución de pérdidas solo hasta cuando se genera un 2,5 % de energía activa del valor total de la carga del sistema. De acuerdo con este análisis, el aporte de la GD entregando reservas operativas, presenta mayores ventajas en el tema de pérdidas en las redes de transmisión y subtransmisión.

Figura 6 Perdidas (MW) en Distribución con diferentes FP en GD



Fuente: Elaboración del autor

En los casos simulados, los generadores en la red de distribución operaron con diferentes niveles de FP. Se puede observar que en la red de transmisión y subtransmisión, la entrega de reactivos por parte de la GD, no mejora el nivel de

pérdidas tanto como es logrado con el suministro de energía activa a través de la GD sin reactivos (FP=1). Por otro lado, en la Figura 6, es posible observar que generando potencia activa con reactivos (FP=0.9 e FP=0.8), existe una mejoría considerable en el nivel de pérdidas en la red de distribución. Sin embargo, también existe un límite en la disminución de pérdidas sobre la red de distribución, es decir, existe un valor óptimo para la entrega de energía activa y reactiva en las redes de distribución.

En este trabajo, el caso número nueve (9) (2,8% de energía activa generada en la GD) es considerado un punto óptimo de generación de energía a través da GD. De acuerdo con el análisis, el uso de pequeños generadores en la red de distribución, mejora el nivel de pérdidas de energía activa en los sectores de transmisión, subtransmisión y considerablemente en la red de distribución hasta un punto óptimo. El punto óptimo depende de las variables técnicas del sistema y se puede decir que el valor de ese punto puede ser mejorado con un número mayor de generadores de menor capacidad conectados a la red de distribución, lo que significa una mayor dispersión de la GD de pequeño porte.

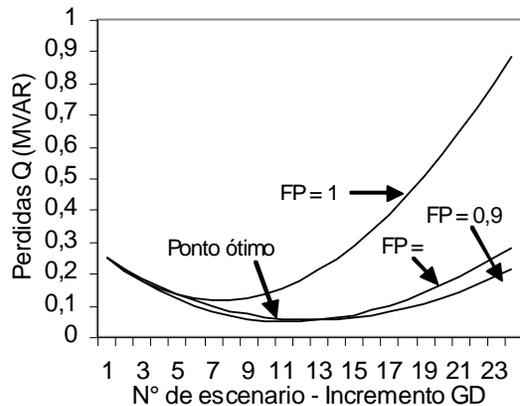
ANALISIS DE PERDIDAS REACTIVAS Q

De forma similar al análisis realizado en el tema de pérdidas de energía activa (P), se realizó el análisis de pérdidas de energía reactiva (Q) con la entrega de reactivos a partir de la GD. La Figura 7 muestra los resultados de las pérdidas en las redes de distribución, con generación de energía a través da GD y diferentes niveles de FP.

Al igual que para el caso de la energía activa, también existe un límite en el aporte de la utilización de la GD para reducir las pedidas de energía reactiva (Q). Los resultados indican nuevamente que existe un valor óptimo para el suministro de energía activa y reactiva. Así, la GD mejora el nivel de pérdidas de reactivos en las redes de transmisión, subtransmisión y considerablemente en las redes de distribución hasta un punto óptimo. Como fue mencionado anteriormente, ese punto óptimo depende de las variables técnicas del sistema y puede deducirse también, que el punto óptimo puede ser mejorado

al tener una mayor dispersión ó penetración de la GD con generadores de pequeño porte.

Figura 7 Perdidas Q (MVAR) en Distribución con diferentes FP en GD



Fuente: Elaboración del autor

4. RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO

MODELO DE DESPACHO CON RESERVAS

De acuerdo con lo descrito en el numeral dos (2), los resultados de este trabajo son producto de dos simulaciones realizadas utilizando dos tipos de programas para el análisis de despacho de sistemas eléctricos. En el primero, se han programado el despacho teniendo en cuenta las reservas operativas en cuatro valores de acuerdo a la carga total del sistema, es decir, en un 3, 5, 8 y 10% de la carga. En estas simulaciones fueron tomados en cuenta curvas de costos según costos de inversión, costos operativos, y factor de capacidad referenciados al año 2005 los cuales pueden verse en la Tabla 3.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de un despacho centralizado, en un sistema de plantas hídricas en donde las reservas son entregadas por estas mismas plantas de forma centralizada. Se puede observar que el costo total de energía generada (por hora), aumenta cuando las reservas programadas aumentan, lo cual es de esperar ya que tener mayores reservas, implica un mayor gasto. En otras palabras, la seguridad del sistema tiene un costo.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de un despacho con cinco generadores en un sistema de distribución. Las curvas de costos utilizados en estas simulaciones para los generadores distribuidos, corresponden a una de las tecnologías más aceptadas por su costo y su desempeño adecuado para el suministro de reservas operativas. La tecnología seleccionada es la de Turbinas a Gas, y datos de costos pueden verse también en la tabla. En estas simulaciones en donde se tiene GD, se presenta una disminución en el costo de generación de energía hasta un 13% cuando la entrega de reservas por parte de la GD llega a un 10% de la carga total del sistema.

Tabla 1 Despacho con Reservas Centralizadas

Reservas	3%	5%	8%	10%
Reservas	8,4	14,0	22,5	28,1
Costo Total Reservas	545,7	909,3	1454,5	1817,8
Generación Total Básica	283,7	283,6	283,5	283,4
Costo Total Energía Básica	18923,7	19281,9	19817,2	20174,2
Costo Total	19469,4	20191,2	21271,7	21992,0
Perdidas	5,4	5,3	5,1	4,9

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 2 Despacho con Reservas en GD

Reservas	3%	5%	8%	10%
Reservas	8,5	14,2	22,7	28,4
Costo Total Reservas	550,6	918,3	1469,2	1836,5
Generación Total Básica	285,4	285,5	285,8	286,3
Costo Total Energía Básica	18110,3	17859,7	17504,3	17280,5
Costo Total	18660,9	18777,9	18973,6	19117,1
Perdidas	2,1	2,1	2,5	3,0

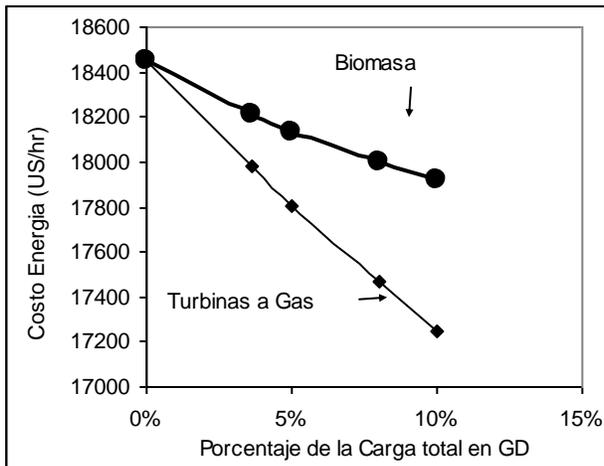
Fuente: Elaboración del autor

MODELO DE DESPACHO CON MATPOWER

De forma similar a los resultados presentados en el ítem anterior, las simulaciones en esta parte del trabajo, muestran el despacho de energía llevando en cuenta valores de reserva del 3, 5, 8 y 10% de la carga total del sistema. En estas simulaciones se tomaron en cuenta dos tecnologías para la GD: Biomasa y Turbinas a Gas, para las cuales se tomaron en cuenta los costos presentados en la

Tabla 3. La generación centralizada se continúa tomando la curva de costos de las centrales hídricas. En la Figura 8 puede observarse que el costo total de generación disminuye con el aumento de las reservas entregadas por parte de la GD.

Figura 8 Costos de Energía según Valores de Reservas en GD



Fuente: Elaboración del autor

En la Figura 9 puede observarse que la generación total disminuye según las reservas operativas entregadas por la GD aumenta. Esto hasta un cierto punto, en donde la generación total aumenta debido al aumento de las pérdidas.

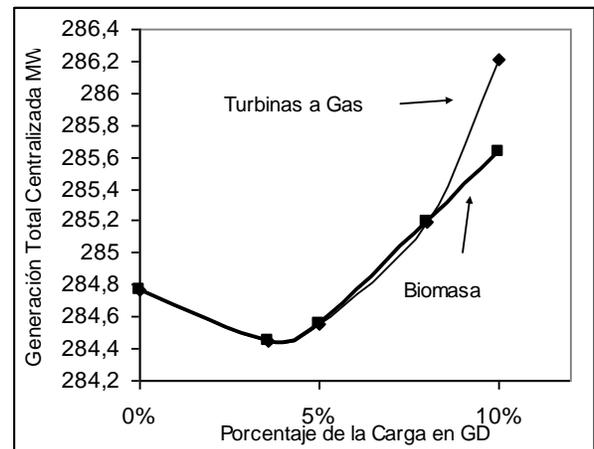
En la Figura 10 se muestra que el nivel de perdidas disminuye hasta un valor de reservas cercano al 4% para el sistema eléctrico simulado. Con esto comprobamos nuevamente que la entrega de reservas por parte del a GD tiene un límite en cuanto a ventajas técnicas se refiere.. Sin embargo podemos observar nuevamente la figura tal y ver que aún con el aumento de perdidas, el costo total de energía producida, disminuye al aumentar el valor de reservas.

5. CONCLUSIONES

La entrega de reservas operativas por parte de la GD hace que los grandes generadores centralizados reduzcan sus valores programados como reservas operativas. Por lo tanto, esos grandes generadores pueden disponer de su

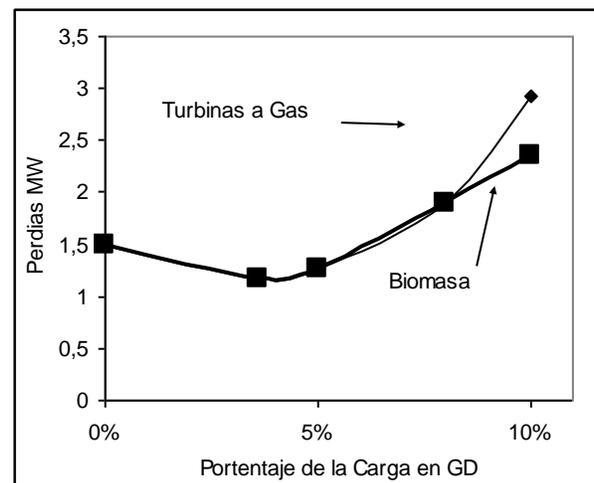
capacidad total de generación para ser entregada al sistema. De igual forma, pueden aprovechar toda su potencia instalada para el suministro de energía básica. Se propone entonces aumentar el grado de penetración de la GD en los sistemas eléctricos para el suministro de servicios auxiliares que permiten tener un mejor grado de seguridad sobre estos sistemas.

Figura 9 Generación Total Centralizada según Valores de Reserva en GD



Fuente: Elaboración del autor

Figura 10 Nivel de Pérdidas según Valores de Reservas en GD



Fuente: Elaboración del autor

Con el uso de la GD, pueden presentarse niveles de sobre tensión, principalmente en la red de

distribución y en menor grado en las redes de subtransmisión y transmisión. Una alternativa para evitar esas sobré tensiones, está en el incremento del nivel de penetración de GD con generadores de baja potencia, o sea, una mayor dispersión de la GD.

El aporte de la GD entregando reservas operativas, presenta mayores ventajas en el tema de perdidas en las redes de transmisión y subtransmisión y considerablemente en las redes de distribución hasta un punto óptimo. El punto óptimo depende de las variables técnicas del sistema, y se puede deducirse que el punto óptimo puede ser mejorado al tener una mayor dispersión de la GD.

Tabla 3 Costos de Tecnología Según Curvas de aprendizaje

		2005	2010	2015	2020	CAU1	CAU2	CAU3	CAU4
Celulas de Combustible	Costo Capital (\$/kW)	1400	1250	1200	1000	46,71	41,41	39,97	33,72
	Factor de Capacidad (%)	85	85	85	85				
	O&M	6,5	5,5	5,5	5				
Biomasa Ciclo Ranking	Costo Capital (\$/kW)	1100	1100	1100	1100	43,57	43,57	43,57	43,57
	Factor de Capacidad (%)	80	80	80	80				
	O&M (\$/MWh)	10	10	10	10				
Biomasa Gasificación	Costo Capital (\$/kW)	2200	2100	2000	1900	79,14	76,09	73,04	69,99
	Factor de Capacidad (%)	80	80	80	80				
	O&M (\$/MWh)	12	12	12	12				
Motores Diesel	Costo Capital (\$/kW)	1000	1000	1000	1000	89,39	89,39	89,39	89,39
	Factor de Capacidad (%)	30	30	30	30				
	O&M (\$/MWh)	8	8	8	8				
Turbinas a Gas	Costo Capital (\$/kW)	495	470	450	420	20,14	19,47	18,94	18,15
	Factor de Capacidad (%)	92	92	92	92				
	O&M (\$/MWh)	7	7	7	7				
Hidroelectricas Grandes Plantas	Costo Capital (\$/kW)	1570	1570	1570	1570	64,78	64,78	64,78	64,78
	Factor de Capacidad (%)	63,5	63,5	63,5	63,5				
	O&M (\$/MWh)	4,41	4,41	4,41	4,41				

Fuente: [9][10]

REFERENCIAS

[1] L. Wang, C.W. Yu, F.S. Wen, "ECONOMIC THEORY AND THE APLICATION OF INCENTIVE CONTRACTS TO PROCURE OPERATION RESERVES", Copyright Material Electric Power Systems Research, 2007, N°77, pp. 518-526.

[2] Bayegan, M., "A Vision of the Future Grid", IEEE Power Engineering Review, Vol. 21, pp. 10-12, December 2001.

[3] Fang Z, "Editorial Special Issue on Distributed Power Generation", IEEE Transactions on Power Electronics, V 19, N° 5, September 2004.

[4] Lescano Gerardo, Ohishi Takaaki, "Um Modelo de Despacho Econômico Para

Reservas Operativas”, Dissertação Mestrado FEEC, Unicamp, 2004

- [5] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D’haeseleer W., “Distributed generation: definition, benefits and issues”, Energy Policy, N° 33, 2005.
- [6] Power Systems Test Case Archive, http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm
- [7] Mesut E. Baran, FelixF. Wu, “OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT ON RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS”, Copyright Material IEEE Transactions on Power Delivery, Vol4, N°1, pp. 725-734.
- [8] PSERC, Matpower, A Matlab Power System Simulation Package, V 3, www.pserc.edu/matpower/
- [9] Schaeffer R, Szklo A, “Future electric power technology choices of Brasil: a possible conflict between local pollution and global climate change”, Energy Policy, N° 29, 2001.
- [10] McDonald A., Schratzenholzer L., “Learning rates for energy technologies”, Energy Policy, N° 29, 2001.