

Abastecimiento de Combustible para el Sector Eléctrico Ecuatoriano

Galo Nina

Corporación Centro Nacional de Control de Energía - CENACE

Resumen - Se considera el problema de abastecimiento de combustible global para el Sector Eléctrico tomando en consideración la programación energética a largo plazo que establece las cuotas energéticas de forma probabilística de acuerdo a la estocasticidad hidrológica. El resultado de esta programación determina las políticas para el manejo de los inventarios en terminales de forma de abastecer la demanda del Sector Eléctrico, así como en forma general también las políticas para el manejo de los inventarios en los tanques de almacenamiento de las centrales térmicas.

Este es un problema estocástico pues recibe la distribución probabilística de energía producto de la planificación energética de largo plazo. Ha sido estudiado en teoría de inventarios y estaría bajo el concepto de inventario de múltiples productos con múltiples niveles con demanda probabilística.

Palabras Clave - Administración de combustibles, inventario de múltiples productos con múltiples niveles de demanda probabilística, Programación Lineal.

1. INTRODUCCIÓN

El CENACE realiza la planificación de la operación del SNI utilizando un horizonte de planificación de largo plazo. Un resultado de esta planificación es la cantidad de combustible que debe ser utilizado por las centrales térmicas.

Los resultados de la cantidad de combustible necesario tanto a nivel mensual como semanal son utilizados por Petrocomercial para realizar la programación de asignaciones de compra de combustibles para las centrales térmicas. Esta programación utiliza también como datos para la programación: las disponibilidades de combustibles en terminales, las importaciones previstas de combustible a nivel nacional y el nivel de los tanques de almacenamiento de cada una de las centrales térmicas. De esta manera se establecen las entregas día a día de los combustibles a las centrales que están previstas a operar en la programación del CENACE.

Dependiendo de la cantidad de combustible en los terminales estos son entregados a las centrales térmicas mediante varios medios de transporte, así se emplean poliductos, buques cisterna y auto tanques, el medio de transporte que debe utilizarse es programado también por Petrocomercial.

De acuerdo al transporte utilizado existe un tiempo que transcurre entre el despacho del combustible en las terminales y la llegada a la central.

Las unidades de generación en este esquema de funcionamiento supervisan el nivel de combustible y lo reportan diariamente al CENACE y de acuerdo a la programación aprobada reciben el combustible.

Bajo estas consideraciones cuando la provisión de combustible es considerada sin limitaciones, el esquema establecido es suficiente para garantizar un abastecimiento adecuado de las centrales térmicas.

De esta manera la coordinación de las condiciones de la existencia de combustible de los terminales, el transporte y las unidades que deben operar configuran un problema en el cual se deben tomar varias decisiones que están interrelacionadas unas con otras.

Petrocomercial no solamente abastece al Sector Eléctrico de combustible, este Sector sin embargo tiene un consumo representativo. Se considera que en época de estiaje la demanda para cierta clase de combustibles para el sector Eléctrico constituye un 50% de la demanda total. En el caso citado entonces se debe establecer el problema de abastecimiento de combustible global para el Sector Eléctrico tomando en consideración la programación a largo plazo que establece las cuotas energéticas de forma probabilística de acuerdo a la hidrológica estocástica. El resultado de esta programación debe establecer las políticas para el manejo de los inventarios en refinerías, terminales, poliductos y transferencias en auto tanques de forma de abastecer la demanda del Sector Eléctrico, así como en forma general también las políticas para el manejo de los inventarios en

los terminales y tanques de almacenamiento de las centrales térmicas.

El problema a resolver es un problema de planificación jerárquico con dos niveles como se muestra en la Fig. 1. Ver Nina 2008 para una mayor comprensión del segundo nivel jerárquico.

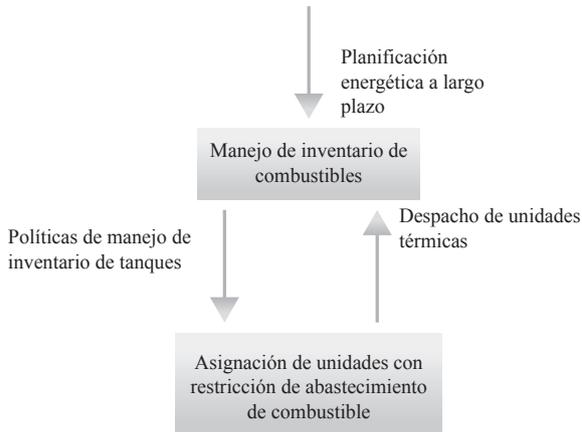


Figura 1. Planificación Jerárquica para Manejo de Combustibles y Asignación de Unidades

El primer problema es un problema estocástico pues recibe la distribución probabilística de energía producto de la planificación energética de largo plazo y por lo tanto de la demanda de combustible. Este problema ha sido estudiado en teoría de inventarios y estaría bajo el concepto de inventario de múltiples productos con múltiples niveles con demanda probabilística. En este trabajo se aborda este problema. Este problema a su vez retroalimenta al nivel inferior con las políticas de manejo de inventario en los tanques de almacenamiento de las centrales térmicas.

Las refinерías, terminales y tanques de abastecimiento de las centrales térmicas forman una red de abastecimiento compleja que en caso ecuatoriano se muestra en la Fig. 2. Los poliductos, buques de cabotaje, transferencias con auto tanques completan esta red.

Este problema ha sido estudiado extensivamente en la literatura así Federgruen y Zipkin 1984 tratan este como programación dinámica y encuentran las políticas para el tratamiento del inventario en una red de abastecimiento de dos niveles. Paksoy et Al 2009 tratan este problema como de múltiples objetivos y como programación entera mixta. Otra forma de abordar este problema es mediante Algoritmos Genéticos Ataka y Gen 2008, Lin et Al 2007. Estos últimos trabajos tratan redes de abastecimiento con múltiples niveles.

Peña 2007 estudio este problema en el sistema ecuatoriano considerando inventarios solamente en los tanques de almacenamiento de las centrales térmicas.

La solución del problema en este trabajo se realiza en dos fases, Axsäter 2006, se asume en la primera fase que la demanda es determinística y está dada por la media de la distribución probabilística de la demanda de combustibles en cada una de las centrales. De esta manera se determina las cantidades de combustibles que deben ser transportadas en la red de abastecimiento mediante un modelo de Programación Lineal. Las variaciones estocásticas de la demanda de combustible son tomadas en cuenta en la segunda etapa donde se determinan los inventarios de seguridad según el modelo de Federgruen y Zipkin 1984.

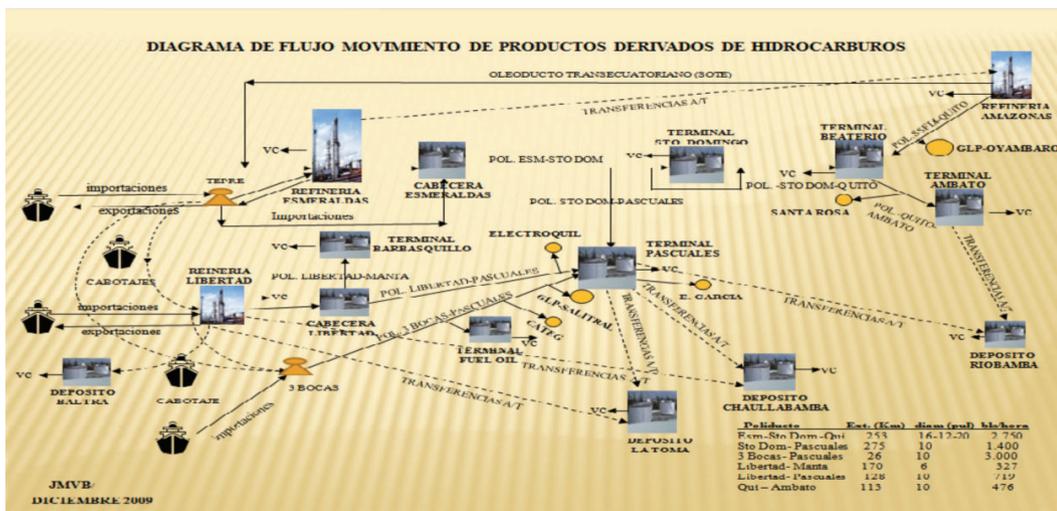


Figura 2. Diagrama de Flujo Movimiento de Productos Derivados de Hidrocarburos

2. DETERMINACIÓN DEL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE EN LA RED DE ABASTECIMIENTO

2.1. Supuestos

- S1. La capacidad máxima de las terminales y centrales térmicas en la red de abastecimiento es conocida.
- S2. La capacidad de las refinerías es ilimitada.
- S3. La demanda de combustibles en las centrales es conocida.
- S4. La disposición de las refinerías, terminales y centrales térmicas en la red de abastecimiento es conocida.
- S5. Los costos unitarios de transporte entre las instalaciones de la red de abastecimiento son conocidos y no varían en el tiempo de estudio. Estos dependen de los tiempos en los cuales transcurre el transporte.
- S6. Los combustibles que son transportados entre las instalaciones de la red de abastecimiento son conocidos.
- S7. No se consideran los inventarios de seguridad tanto en las terminales así como en las centrales térmicas.
- S8. Una refinería alimenta solo a una terminal.
- S9. Una central térmica es alimentada solamente por una terminal.

2.2. Formulación del Problema

Se emplea la siguiente notación para el modelo empleado.

Índices

- κ Numero de refinerías ($\kappa = 1, \dots, \kappa$).
- j Numero de terminales ($j = 1, \dots, J$)
- i Numero de centrales térmicas ($i = 1, \dots, I$)
- p Numero de combustibles ($p = 1, \dots, P$)
- t Periodo de tiempo ($t = 1, \dots, T$).

Variables

- y_{jpt} Cantidad de inventario en la terminal j de combustible p en el periodo t .
- u_{ipt} Cantidad de inventario en la central térmica i de combustible p en el periodo t .

q_{kjpt} Cantidad transportada desde la refinería k a la terminal j del combustible p en el periodo t .

x_{jipt} Cantidad transportada desde la terminal j a la central térmica i del combustible p en el periodo t .

$z_{jj'pt}$ Cantidad transportada desde la terminal j a terminal j' del combustible p en el periodo t .

Parámetros

d_{ipt} Demanda de la central térmica i del combustible p en el periodo t .

a_{jp} Capacidad máxima de la terminal j de combustible p .

b_{ip} Capacidad máxima de la central térmica i de combustible p .

f_{kj} Capacidad máxima de transporte de la refinería k a la terminal j

$f_{jj'}$ Capacidad máxima de transporte de la terminal j a la terminal j'

f_{ji} Capacidad máxima de transporte de la terminal j a la central térmica i

c_{kjp} Costo unitario de transporte de la refinería k a la terminal j del combustible p

c_{jip} Costo unitario de transporte de la terminal j a la central térmica i del combustible p

$c_{jj'p}$ Costo unitario de transporte de la terminal j a la terminal j' del combustible p

h_{jp} Costo de mantenimiento de inventario en la terminal j del combustible p .

h_{ip} Costo de mantenimiento de inventario en la central térmica i del combustible p .

Función Objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_t \left\{ \sum_k \sum_j \sum_p c_{kjp} q_{kjpt} + \sum_j \sum_j \sum_p c_{jj'p} z_{jj'pt} \right. \\ & \left. + \sum_j \sum_i \sum_p c_{jip} x_{jipt} \right\} \\ & + \sum_j \sum_p h_{jp} y_{jpt} + \sum_i \sum_p h_{ip} u_{ipt} \end{aligned}$$

Sujeto a:

Inventario en terminales

$$y_{jpt+1} = y_{jpt} + q_{kjpt} - \sum_j z_{jjpt} - \sum_i x_{jipt} \quad \forall j \quad \forall t \quad \forall p \quad (2)$$

Inventario en centrales térmicas

$$u_{ipt} = u_{ipt} + x_{jipt} - d_{ipt} \quad \forall i \quad \forall p \quad \forall t \quad (3)$$

Capacidad terminales

$$y_{jpt} + q_{kjpt} \leq a_{jp} \quad \forall j \quad \forall p \quad \forall t \quad (4)$$

Capacidad de centrales térmicas

$$u_{ipt} + x_{jipt} \leq b_{ip} \quad \forall i \quad \forall p \quad \forall t \quad (5)$$

Capacidad de poliductos y auto tanques

$$q_{kjpt} \leq f_{kj} \quad \forall k \quad \forall j \quad \forall p \quad \forall t \quad (6)$$

$$z_{jjpt} \leq f_{jj} \quad \forall j \quad \forall j \quad \forall p \quad \forall t$$

$$z_{jipt} \leq f_{ji} \quad \forall j \quad \forall i \quad \forall p \quad \forall t$$

$$y_{jpt}, u_{ipt}, q_{kjpt}, x_{jipt}, z_{jjpt} \geq 0 \quad \forall k \quad \forall j \quad \forall i \quad \forall p \quad \forall t \quad (7)$$

La función objetivo del modelo considera los costos unitarios de transporte entre los diferentes elementos de la cadena de suministro y el costo de mantenimiento de inventario en los terminales y centrales térmicas.

La restricción (2) establece el equilibrio en el inventario en las terminales, se considera que las refinerías tienen una capacidad ilimitada, también se considera que existe la posibilidad que exista un intercambio de transporte entre las diferentes terminales de combustible. Se considera que una refinería solamente está conectada con una terminal mediante un poliducto

La restricción (3) establece de la misma manera el equilibrio del inventario en las centrales térmicas. Aquí también se considera que una central térmica es solamente alimentada por una terminal y no puede serlo por varias terminales.

Las restricciones (4) y (5) garantizan que la capacidad en las terminales y centrales se cumpla. No se toma en cuenta la existencia de inventarios de

seguridad que son determinados en la siguiente fase del modelo.

Las restricciones (6) consideran la capacidad máxima de transporte de combustible a través de poliductos, buques cisterna y auto tanques

Las ecuaciones (7) consideran que las variables no sean negativas.

3. DETERMINACION DE INVENTARIOS DE SEGURIDAD

De acuerdo a estructura de la red de abastecimiento cada una de las terminales alimenta a las centrales en un sistema similar al ilustrado en la Fig. 3, supuesto S8. De esta manera la determinación de los inventarios de seguridad puede ser realizada tomando en cuenta la metodología de Federgruen y Zipkin 1984, para el caso en el que existe una revisión periódica del inventario. Silver, Pyke y Peterson 1998.

Para este propósito se usa la siguiente notación.

R Periodo de revisión.

S Inventario de seguridad de todo el sistema.

B Costo de desabastecimiento en las centrales térmicas.

L_i Tiempo de espera de una orden de la terminal a la central térmica i .

L_j Tiempo de espera de una orden de la terminal j a la refinería.

\hat{d}_i Demanda esperada de la central térmica i en un periodo determinado.

σ_i Desviación estándar de la central térmica i en un periodo determinado.

h_i Costo de mantenimiento de inventario de la terminal j .

$$\hat{d} = \sum_i \hat{d}_i$$

$$\sigma = \sum_i \sigma_i$$

$$\tilde{\sigma}^2 = \sum_i \sigma_i^2$$

La forma en que se escoge S es la siguiente:

Seleccionar S de tal manera que

$$\frac{1}{R} \sum_{i=0}^{R-1} \{1 - p(k_i)\} = \frac{B}{B + h_j} \quad (8)$$

Donde

$$k_i = \frac{S - (L_j - L_i + 1 + i)\hat{d}}{\sqrt{(L_i + 1 + i)\sigma^2 + L_j\tilde{\sigma}^2}} \quad (9)$$

Para asignar el inventario de seguridad en las centrales térmicas se debe igualar la probabilidad de desabastecimiento en el periodo que se está considerando. En otras palabras se debe igualar la siguiente expresión para todas centrales térmicas. Así mismo el

$$\frac{u_i + Z_i - (L_i + R)\hat{d}_i}{\sqrt{L_i + R\sigma_i}}$$

4. EJEMPLO NUMÉRICO

En esta sección se presenta un ejemplo numérico, Fig. 3, para ilustrar el modelo mencionado en las secciones precedentes. Los datos son tomados de Paksoy et Al. La red de suministro consiste en tres refinерías, tres terminales y cuatro centrales térmicas que están localizadas en diferentes lugares. La red de suministro considera que las refinерías proporcionan dos clases de combustibles a las terminales mediante poliductos, estas se consideran tienen capacidad

ilimitada. Esto en la realidad no es así, pero permite, conocida la capacidad de las refinерías, estimar la cantidad de importaciones necesarias para suplir la falta de oferta de las refinерías. Los terminales tienen capacidad de almacenamiento para estas dos clases de combustibles y entregan combustible a los tanques de almacenamiento de las centrales térmicas mediante poliductos o auto tanques. Las condiciones S7 y S8 son respetadas en el ejemplo. El ejemplo considera tres periodos para su aplicación.

Los datos numéricos utilizados en el ejemplo se muestran inmediatamente.

Tabla 1: Costo unitario de transporte de la refinерía k a la terminal j del combustible p

Refinerías			
Terminales	1	2	3
1	1.4	-	-
2	-	1.2	-
3	-	-	0.9

Estos costos se consideran que son iguales para las dos clases de combustibles

Tabla 2: Costo unitario de transporte de la terminal j a la central térmica i del combustible p

Terminal			
Central Térmica	1	2	3
1	0.9	-	-
2	-	0.6	-
3	-	-	0.7
4	-	-	0.8

Estos costos también se consideran que son iguales para las dos clases de combustibles.

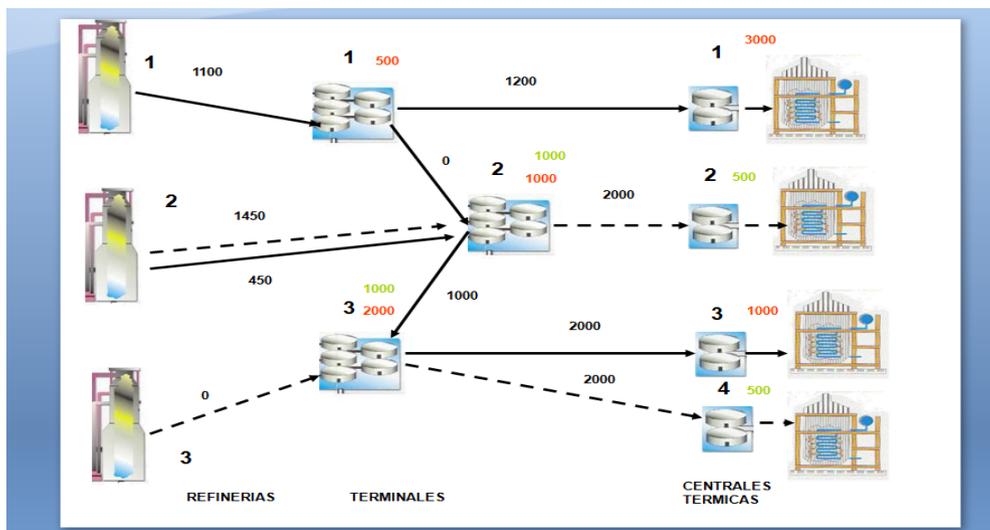


Figura 3: Ejemplo Numérico de Red de Abastecimiento de Combustibles

Tabla 3: Capacidad de los terminales, centrales térmicas y demanda de centrales térmicas

	Terminales	Centrales Térmicas	Demanda
1	70000	63000	3500
2	65000	67000	3500
3	65000	60000	3500
4		55000	3500

La demanda se considera igual para todos los periodos, centrales térmicas y combustibles. Así mismo el costo de mantenimiento de inventario en las terminales y centrales térmicas para todos los combustibles es igual a 1.0. La capacidad de los poliductos que transportan el combustible de las refinerías a las terminales es igual a 3000, la de los poliductos que transportan combustible entre terminales es 2000 y la capacidad de los poliductos y auto tanques que transportan combustible entre los terminales y centrales térmicas es 3000.

Los resultados para el primer periodo se muestran en la Fig. 3. Esto significa que se han determinado los lotes de combustible que deben ser despachados en la red de suministro, el siguiente paso es determinar los inventarios de seguridad es decir los niveles de los inventarios a partir de los cuales se debe ordenar los lotes.

En el caso del ejemplo la solución a este problema se consigue descomponiendo la red de suministro en varias sub redes. Por ejemplo la terminal 1 conjuntamente con la central térmica 1 y la terminal 2 forman una arborescencia en la cual se pueden determinar los inventarios de seguridad. De la misma manera sucede con el terminal 2 y la central térmica 2 y finalmente con el terminal 3 y las centrales térmicas 3 y 4.

Consideremos para ilustrar la metodología el terminal 3. Sean los siguientes datos: R 1 periodos, L_j 1 periodo, L_i 1 periodo, tenemos dos centrales térmicas con h_j igual a 1, sea B igual a 1.2. La demanda media \hat{d}_i es 3500 y considera que se tiene una desviación estándar σ_i de 50. Todos estos valores son iguales para las dos centrales 3 y 4 respectivamente. Los cálculos aplicando la formula (9) son:

i	S=21200		S=21035	
	k	Probabilidad	k	Probabilidad
0	1,265	0,897	0,221	0,588
1	-35,348	0,000	-37,229	0,000

De esto se deduce que si $B/(B+h)$ es igual 0,54 el inventario de seguridad debe ser aproximadamente 21035. Cuando el nivel en el terminal es este valor entonces se debe ordenar la cantidad de combustible encontrada en la etapa 1.

Para repartir este inventario en las centrales térmicas se debe tener entonces $Z_3 + Z_4 = 21035$ y

$$\frac{1000 + Z_3 - (1 + 1)3500}{\sqrt{(1 + 1)50}} = \frac{500 + Z_4 - (1 + 1)3500}{\sqrt{(1 + 1)50}}$$

Resolviendo estas ecuaciones tenemos finalmente que se tiene Z_3 igual a 10518 y $Z_4 = 10517$

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo para administrar los inventarios en la red de abastecimiento de combustibles para el Sector Eléctrico Ecuatoriano. La solución al problema se definió en dos fases. En la primera etapa se obtuvieron los lotes de combustible que deben ser despachados en cada etapa dentro de un horizonte de planificación. Para esto se modeló la red de abastecimiento como un problema de Programación Lineal. El objetivo de este modelo fue minimizar los costos de transporte y mantenimiento de inventario sujeto a restricciones de equilibrio de inventario en los terminales y tanques de almacenamiento de las centrales térmicas, las restricciones de capacidad de terminales y tanques de abastecimiento de las centrales térmicas y capacidad de transporte de poliductos y auto tanques. En esta fase se consideró la demanda determinística e igual a la media de la función de densidad de la demanda determinada en la Planificación a Largo Plazo energética.

Una vez obtenidos los lotes a ser transportados se definieron los inventarios de seguridad. Estos inventarios son los niveles bajo los cuales se debe realizar un pedido. Para esto se consideró a los parámetros probabilísticos de la demanda y se aplicó un esquema de descomposición para determinar los inventarios de seguridad tanto en los terminales como en los tanques de almacenamiento de las centrales térmicas y otros terminales.

El aporte de este trabajo consiste en la modelación para la red de abastecimiento de combustibles para el Sector Eléctrico Ecuatoriano. Este modelo podrá formar parte de un esquema de control jerárquico citado en Nina 2008.

Finalmente se debe mencionar que este esquema solo puede ser posible si se cuenta con un sistema de control centralizado que tenga un sistema de comunicación (Electronic Data Interchange) EDI efectivo, que permita tener toda la información necesaria para el modelo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Axsäter S.; Inventory Control, Springer; New York 2006.
- [2] Ataka S., Gen M., Hybrid Genetic Algorithm for Flexible Logistic Network Model with Inventory, Nusa Dua Bali Indonesia 2008.
- [3] Federgruen A., Zipkin P.; Approximations of Dynamic, Multilocation production and Inventory Problems; Management Science; Vol. 30, No. 1; 1984.
- [4] Lin L., Gen M., Wang X.; A Hybrid Genetic Algorithm for Logistics Network Design with Flexible Multistage Model; International Journal of Information Systems for Logistics and Management; Vol. 3, No. 1 2007.
- [5] Nina G.; Asignación de Unidades con Restricciones de Abastecimiento de Combustibles; Revista energía; Edición 6; 2008.
- [6] Paksoy T. Ozceylan E, Weber G.; A Multi Objective Mixed Integer Programming Model for Multi Echelon Supply Chain Network Design and Optimization; 2009.
- [7] Peña S.; Plan de Compras de Combustibles en Plantas de Generación Térmica del Sistema Eléctrico Ecuatoriano, Revista energía; Edición 5; 2007.
- [8] Silver E., Pyke D., Peterson R.; Inventory Management and Production Planning and Scheduling; John Wiley & Sons, 1998.



Galo Nina Suquilanda.- Ingeniero Eléctrico por la ESPOL, M. Sc. en Ingeniería de Sistemas (Optimización) por la COPPE/UFRJ Brasil; y, D. Ing. en Ingeniería Económica por FHTE Esslingen Alemania.

Desde 1981 hasta 1988 y desde 1994 hasta 1995, trabajó en INECEL en Planificación de la Operación y Control de Gestión, en la Dirección de Operaciones del SNI.

Desde 1999 se desempeña como Jefe de Análisis y Control en la Corporación Centro Nacional de Control de Energía - CENACE.