

# Implementación de módulo de flujo de cargas a la plataforma SimSEE y su aplicación al análisis de restricciones de operación del sistema uruguayo con alta penetración de energía eólica.

Msc. Ing. Ruben Chaer, E. Coppes, M. Forets, A. Rondoni y R. Escuder.

**Resumen**—Este trabajo presenta el resultado de una parte del Proyecto ANII FSE2009-18 "Mejoras a la plataforma de Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica - SimSEE". SimSEE es una plataforma de cálculo para la coordinación hidrotérmica desarrollado en la FING-IIE-UDELAR. Actualmente SimSEE permite la definición de nodos y arcos que posibilitan tener una primera aproximación al problema reflejando en forma aproximada los límites de potencia por las líneas de transmisión y las pérdidas en las mismas, pero ignorando por completo posibles problemas de tensión de las barras. Al pensarse en una expansión en base a energía eólica y/o centrales de biomasa distribuidas geográficamente e interconectadas al sistema por líneas radiales es claro que será necesario considerar las afectaciones que sobre la tensión tendrán estas instalaciones. Debido al porte de la generación distribuida que va a ser incorporada al SIN, es necesario tener en cuenta las limitaciones que imponen las líneas y transformadores en cuanto a su capacidad de transporte. Por esta razón se incorporo al SimSEE un modelado más exacto del sistema de red, como es un flujo de cargas AC, que permita incluir las restricciones sobre las tensiones de los nodos y los límites de capacidad de las canalizaciones.

**Index Terms**—flujo de cargas AC, generación distribuida, coordinación hidrotérmica.

## I. NOMENCLATURA

ANII: Agencia Nacional de Investigación e Innovación

FING: Facultad de Ingeniería.

PSSE: Programa comercial de SIEMENS de flujo de cargas.

SimSEE: Simulador de sistemas eléctricos.

SIN: Sistema Interconectado Nacional.

UDELAR: Universidad de la Republica Oriental del Uruguay.

---

Este trabajo fue financiado por el gobierno Uruguayo a través de la ANII por el proyecto FSE2009-18 "Mejoras a la plataforma de Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica - SimSEE".

Msc. Ing. Ruben Chaer, IIE, FING, Uruguay, (e-mail: [rchaer@fing.edu.uy](mailto:rchaer@fing.edu.uy)).

E. Coppes, IIE, FING, Uruguay, (e-mail: [ecoppes@fing.edu.uy](mailto:ecoppes@fing.edu.uy)).

M. Forets, IIE, FING, Uruguay, (e-mail: [mforets@fing.edu.uy](mailto:mforets@fing.edu.uy)).

A. Rondoni, UTE, Uruguay, (e-mail: [arondoni@ute.com.uy](mailto:arondoni@ute.com.uy)).

R. Escuder, UTE, Uruguay, (e-mail: [rescuder@ute.com.uy](mailto:rescuder@ute.com.uy)).

## II. INTRODUCCIÓN

PARA la incorporación de la red eléctrica al programa SimSEE se considero conveniente utilizar, un programa de flujo de cargas desarrollado en el IIE-FING llamado FLUCAR que estaba implementado en lenguaje Pascal, el mismo con el que esta desarrollado SIMSEE. Esto permitió integrar la capacidad de hacer las ecuaciones de flujo de carga directamente sobre SimSEE, evitando de esta forma afectaciones en los tiempos de cálculo e integrando todas las funcionalidades en un solo entorno para facilidad del usuario final. Se hizo una reingeniería de este flujo de cargas incorporando un resolvidor complejo de ecuaciones que utiliza el método de Newton-Raphson. Utilizando estos algoritmos se incorporo también, dentro del algoritmo de optimización, un tratamiento especial para los TAP's de los transformadores, para lo cual se considero otra variable compleja, aparte de las de voltaje y potencia en cada nudo.

Un punto importante que se tuvo en cuenta, fue la lectura de los datos de RED. Para ello se evaluaron los programas de flujo de carga conocidos y se decidió que, por su facilidad y amplitud de uso, el formato de flujo de cargas de PSSE (Power System Simulator for Engineering tool) de la empresa SIEMENS, en texto plano o RAW, proporciona una forma de entrada de los datos cuasi estandarizada y ampliamente usada tanto en Uruguay como en el MERCOSUR.

Otro aspecto considerado fue la incorporación del flujo de cargas en el algoritmo de optimización. Para ello se analizaron las diferentes alternativas usadas en la literatura especializada. Este aspecto del problema se resolvió hacerlo en dos etapas en el cual la primera consiste en resolver el problema hidrotérmico, luego de lo cual se hace una corrida de flujo de cargas para ver si el problema es factible desde el punto de vista de la red. En caso de que el problema de red no sea factible, se itera haciendo las correcciones necesarias en el despacho hidrotérmico hasta que el sistema hidrotérmico-red tenga una solución factible.

Se hicieron pruebas con un sistema sencillo y luego con una versión simplificada del sistema eléctrico uruguayo.

III. ADAPTACIÓN DEL MODELO DE RED A LA PLATAFORMA

Para adaptar el modelo de red eléctrica a la plataforma SIMSEE se planteo el siguiente plan de trabajo:

1. Planteo general del problema de flujo de cargas, estudio y adaptación.
2. Incorporación de los TAP's variables de los transformadores a la formulación del problema.
3. Desarrollo de los algoritmos de lectura de datos de los archivos de datos de red del PSSE.
4. Estudio de diferentes formas de incorporar la red al SIMSEE e implementación de la solución elegida.
5. Pruebas y validación de los resultados obtenidos.

A. Planteo general del problema de flujo de cargas, estudio y adaptación

Se planteo la resolución del problema de flujo de cargas por medio de la metodología orientada a objetos donde cada elemento del sistema eléctrico representa un actor que tiene la posibilidad de interactuar con los demás en lo que se denomina una sala de juegos virtual, la que organiza el intercambio de información y resuelve el problema en variables complejas mediante un resolvidor complejo que hace uso del método de Newton-Raphson modificado. Se considero en esta parte también, el tratamiento que se le hace a los transformadores con TAP's variables de los transformadores.

B. Incorporación de los TAP's variables de los transformadores a la formulación del problema.

Esta parte aborda, por un lado, la descripción del problema del flujo de carga y cómo queda la matriz jacobiana para ingresarla a un resolvidor de variables complejas no lineal, que implementa el método de Newton-Raphson para un sistema de ecuaciones complejas. Por otro lado, se describe la forma en que son entradas o inscriptas en el resolvidor complejo, las funciones de flujo de cargas en cada nodo del sistema y sus derivadas.

Se debe resaltar que este esfuerzo es sustancialmente nuevo respecto a la bibliografía existente, en cuanto el problema se re-enfoca como un sistema de ecuaciones de variable compleja para todas las variables involucradas, y por tanto las funciones y sus derivadas se deben expresar como funciones complejas en sus componentes (ya sean cartesianas o polares). Por otra parte, este enfoque es necesario porque la implementación computacional fue diseñada para requerir como input las ecuaciones que se deducen en este apartado.

En este problema se considera que la red consiste en n nodos o barras. El sistema de ecuaciones que se debe satisfacer consiste en n ecuaciones, una por cada nodo, de valores

complejos a valores complejos:

$$\tilde{f}_i : \tilde{V}_i \tilde{I}_i^* - \tilde{S}_i = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Se supondrá que hay un trafo t entre el nodo h y el nodo m (h = m). Habrá por lo tanto tres tipos de nodos: los nodos tipo k o genérico, los nodos tipos regulado (h) y los nodos tipo regulador (m). En las figuras siguientes se aprecian los nodos genéricos y los nodos tipo h y tipo m.

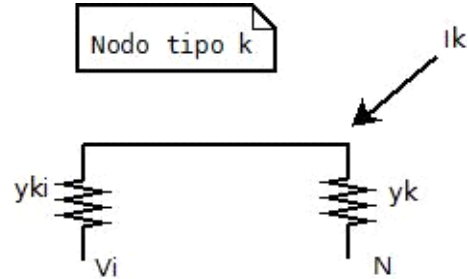


Fig. 1. Representación de un nodo genérico del sistema.

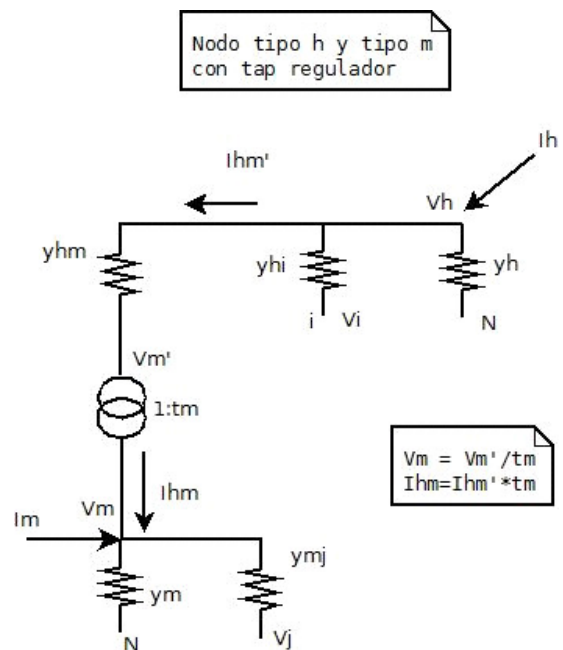


Fig. 2. Representación de nodos en presencia de un transformador con tap regulador.

A continuación se deducen las ecuaciones de corriente en cada uno de los tipos de nodo, que surgen de aplicar las ecuaciones de nudos y mallas y eventualmente las ecuaciones del transformador ideal.

Observar que si bien se presenta la matriz como si sólo existiera un trafo en toda la red, que se hace por simplicidad, no conlleva pérdida de generalidad cuando se tiene más de uno, ya que quedará evidente que se necesitan modificar tan sólo dos líneas de dicha matriz Jacobiana, correspondientes a los nodos extremos del transformador.

1. Nodos tipo k (o genéricos)

$$\begin{aligned} \bar{I}_k &= \bar{V}_k \bar{y}_k + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq k}} (\bar{V}_k - \bar{V}_i) \bar{y}_{ki} \\ &= \bar{V}_k \left( \bar{y}_k + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq k}} \bar{y}_{ki} \right) + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq k}} \bar{V}_i (-\bar{y}_{ki}) \\ &= \bar{V}_k \bar{Y}_{kk} + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq k}} \bar{V}_i \bar{Y}_{ki} \\ &= \sum_{i=1, \dots, n} \bar{V}_i \bar{Y}_{ki} \end{aligned}$$

Donde se definió convenientemente:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{kk} &= \bar{y}_k + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq k}} \bar{y}_{ki} \\ \bar{Y}_{ki} &= -\bar{y}_{ki} \end{aligned}$$

## 2. Nodos tipo regulado (o tipo h)

$$\begin{aligned} \bar{I}_h &= \bar{V}_h \bar{y}_h + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq h, i \neq m}} (\bar{V}_h - \bar{V}_i) \bar{y}_{hi} - (\bar{V}_h - t_m \bar{V}_m) \bar{y}_{hm} \\ &= \bar{V}_h \left( \bar{y}_h + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq h}} \bar{y}_{hi} \right) + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m, i \neq h}} \bar{V}_i (-\bar{y}_{hi}) + t_m \bar{V}_m (-\bar{y}_{hm}) \\ &= \sum_{i=1, \dots, n} \bar{V}_i \bar{Y}_{hi} + t_m \bar{V}_m \bar{Y}_{hm} \end{aligned}$$

Donde se definió convenientemente:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{hh} &= \bar{y}_h + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq h}} \bar{y}_{hi} \\ \bar{Y}_{hi} &= -\bar{y}_{hi} \\ \bar{Y}_{hm} &= -\bar{y}_{hm} \end{aligned}$$

## 3. Nodos tipo reguladores (o tipo m)

$$\begin{aligned} \bar{I}_m &= \bar{V}_m \bar{y}_m + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m, i \neq h}} (\bar{V}_m - \bar{V}_i) \bar{y}_{mi} + t_m (t_m \bar{V}_m - \bar{V}_h) \bar{y}_{mh} \\ &= \bar{V}_m \left( \bar{y}_m + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m, i \neq h}} \bar{y}_{mi} + t_m^2 \bar{y}_{mh} \right) + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m, i \neq h}} \bar{V}_i (-\bar{y}_{mi}) - \bar{V}_h \bar{y}_{mh} t_m \\ &= \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m, i \neq h}} \bar{V}_i \bar{Y}_{mi} + \bar{V}_m \bar{Y}'_{mm} + t_m \bar{V}_h \bar{Y}_{mh} - t_m^2 \bar{V}_m \bar{Y}_{mh} \end{aligned}$$

Donde se definió convenientemente:

$$\begin{aligned} \bar{Y}'_{mm} &= \bar{y}_m + \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m, i \neq h}} \bar{y}_{mi} \\ \bar{Y}_{mh} &= -\bar{y}_{mh} \\ \bar{Y}_{mi} &= -\bar{y}_{mi} \end{aligned}$$

Observar que:

$$\bar{Y}'_{mm} = \bar{Y}_{mm} - \bar{y}_{mh} = \bar{Y}_{mm} + \bar{Y}_{mh}.$$

Por lo que este valor se puede obtener a partir de la matriz admitancia de barras generada de la misma forma que con los otros tipos.

## 4. Matriz Jacobiana.

Resumiendo los resultados anteriores se tiene que:

→ para nodos *genéricos* :

$$\bar{I}_k = \sum_{i=1, \dots, n} \bar{V}_i \bar{Y}_{ki}$$

→ para nodos tipo *regulado* (h) :

$$\bar{I}_h = \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m}} \bar{V}_i \bar{Y}_{hi} + t_m \bar{V}_m \bar{Y}_{hm}$$

→ para nodos tipo *regulador* (m) :

$$\bar{I}_m = \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ i \neq m, i \neq h}} \bar{V}_i \bar{Y}_{mi} + \bar{V}_m \bar{Y}'_{mm} + t_m \bar{V}_h \bar{Y}_{mh} - t_m^2 \bar{V}_m \bar{Y}_{mh}$$

Será conveniente expresar la matriz jacobiana del sistema de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \bar{f}_1 \\ \bar{f}_2 \\ \vdots \\ \bar{f}_m \\ \vdots \\ \bar{f}_h \\ \vdots \\ \bar{f}_{n-1} \\ \bar{f}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & \dots & A_{1n} & B_{11} & \dots & \dots & \dots & \dots & B_{1n} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & \dots & \dots & A_{2n} & B_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots & B_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & C_{mm} & \dots & C_{mh} & \dots & A_{mn} & B_{m1} & \dots & B_{mn} & D_{mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{h1} & A_{h2} & \dots & E_{hm} & \dots & E_{hn} & \dots & A_{hn} & B_{h1} & \dots & B_{hn} & D_{hn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n-1,1} & A_{n-1,2} & \dots & A_{n-1,m} & \dots & A_{n-1,n} & B_{n-1,1} & \dots & \dots & \dots & B_{n-1,n} & 0 \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} & \dots & A_{nn} & B_{n1} & \dots & \dots & \dots & B_{nn} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dV_1 \\ dV_2 \\ \vdots \\ dV_m \\ \vdots \\ dV_h \\ \vdots \\ dV_{n-1} \\ dV_n \\ \vdots \\ dS_1 \\ \vdots \\ dS_n \\ dt_m \end{pmatrix}$$

A continuación se especifica cada uno de los elementos de dicha matriz:

- $A_{ij} = \frac{\partial}{\partial V_j} \bar{f}_i$ , para nodos tipo *k* (o *genéricos*)

→ Caso  $i \neq j$ :

$$\frac{\partial}{\partial |V_j|} : \bar{V}_i \left( e^{j \arg(\bar{V}_j)} \bar{Y}_{ij} \right)^* \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \arg V_j} : -j \bar{V}_i \bar{V}_j^* \bar{Y}_{ij}^* \quad (3)$$

→ Caso  $i = j$ :

$$\frac{\partial}{\partial |V_j|} : e^{j \arg(\bar{V}_j)} \bar{I}_j^* + |\bar{V}_j| \bar{Y}_{jj}^* \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \arg V_j} : j \bar{V}_j \bar{I}_j^* - j \bar{V}_j \bar{V}_j^* \bar{Y}_{jj}^* \quad (5)$$

- $B_{ij} = \frac{\partial}{\partial S_j} \bar{f}_i$ , para todos los nodos,  $i = 1, \dots, n$ .

→  $\frac{\partial}{\partial P_j} \bar{f}_i$ :  $-1$  si  $i = j$  y  $0$  si  $i \neq j$ .

→  $\frac{\partial}{\partial Q_j} \bar{f}_i$ :  $-j$  si  $i = j$  y  $0$  si  $i \neq j$ .

→  $\frac{\partial}{\partial |S_j|} \bar{f}_i$ :  $-\frac{\bar{S}_i}{|\bar{S}_i|}$  si  $i = j$  y  $0$  si  $i \neq j$ .

→  $\frac{\partial}{\partial \arg S_j} \bar{f}_i$ :  $-j \bar{S}_j$  si  $i = j$  y  $0$  si  $i \neq j$ .

$$\bullet C_{mj} = \frac{\partial}{\partial V_j} \tilde{f}_m, \text{ para } j = 1, \dots, n \text{ (o reguladores)}$$

→ Caso  $j = h$ : (regulado)

$$\frac{\partial}{\partial |\tilde{V}_h|} : \tilde{V}_m t_m \left( e^{j \arg(\tilde{V}_h)} \tilde{Y}_{mh} \right)^* \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \arg \tilde{V}_h} : -j \tilde{V}_m t_m \tilde{V}_h^* \tilde{Y}_{mh}^* \quad (7)$$

→ Caso  $j \neq h, j \neq m$ :

$$\frac{\partial}{\partial |\tilde{V}_j|} : \tilde{V}_m \left( e^{j \arg(\tilde{V}_j)} \tilde{Y}_{mj} \right)^* \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \arg \tilde{V}_j} : -j \tilde{V}_m \tilde{V}_j^* \tilde{Y}_{mj}^* \quad (9)$$

Observar que  $C_{mj} = A_{mj}$  si  $j = 1, \dots, n$  con  $j \neq m, j \neq h$ .

→ Caso  $j = m$ :

$$\frac{\partial}{\partial |\tilde{V}_m|} : e^{j \arg(\tilde{V}_m)} \sum_{\substack{l=1, \dots, n \\ l \neq m, l \neq h}} \tilde{V}_l^* \tilde{Y}_{ml}^* + 2|\tilde{V}_m| \tilde{Y}_{mm}^* (t)$$

$$+ e^{j \arg(\tilde{V}_m)} t_m \tilde{V}_h^* \tilde{Y}_{mh}^* - 2|\tilde{V}_m| t_m^2 \tilde{Y}_{mh}^* \\ \frac{\partial}{\partial \arg \tilde{V}_m} : j \tilde{V}_m \sum_{\substack{l=1, \dots, n \\ l \neq m, l \neq h}} \tilde{V}_l^* \tilde{Y}_{ml}^* + j \tilde{V}_m t_m \tilde{V}_h^* \tilde{Y}_{mh}^*$$

Observar que  $\sum_{\substack{l=1, \dots, n \\ l \neq m, l \neq h}} \tilde{V}_l^* \tilde{Y}_{ml}^* = \tilde{I}_m^* - \tilde{V}_m^* \tilde{Y}_{mm}^* - \tilde{V}_h^* \tilde{Y}_{mh}^*$ .

$$\bullet D_{mm} = \frac{\partial}{\partial t_m} \tilde{f}_m = \tilde{V}_m \tilde{V}_h^* \tilde{Y}_{mh}^* - 2 \tilde{V}_m t_m \tilde{V}_m^* \tilde{Y}_{mh}^*$$

$$\bullet E_{hj} = \frac{\partial}{\partial V_j} \tilde{f}_h, \text{ para } j = 1, \dots, n \text{ (o regulados)}$$

→ Caso  $j = m$  ( $m \neq h$ ): (regulador)

$$\frac{\partial}{\partial |\tilde{V}_m|} : t_m \tilde{V}_h \left( e^{j \arg(\tilde{V}_m)} \tilde{Y}_{hm} \right)^* \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial \arg \tilde{V}_m} : -j t_m \tilde{V}_h \tilde{V}_m^* \tilde{Y}_{hm}^* \quad (11)$$

→ Caso  $j \neq m, j \neq h$ :

$$\frac{\partial}{\partial |\tilde{V}_j|} : \tilde{V}_h \left( e^{j \arg(\tilde{V}_j)} \tilde{Y}_{hj} \right)^* \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial \arg \tilde{V}_j} : -j \tilde{V}_h \tilde{V}_j^* \tilde{Y}_{hj}^* \quad (13)$$

→ Caso  $j = h$ :

$$\frac{\partial}{\partial |\tilde{V}_h|} : e^{j \arg(\tilde{V}_h)} \sum_{\substack{l=1, \dots, n \\ l \neq m}} \tilde{V}_l^* \tilde{Y}_{hl}^* \quad (14)$$

$$+ \tilde{V}_h \left( e^{j \arg(\tilde{V}_h)} \tilde{Y}_{hh} \right)^* + t_m e^{j \arg(\tilde{V}_h)} \tilde{V}_m^* \tilde{Y}_{hm}^* \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial \arg \tilde{V}_h} : j \tilde{V}_h \sum_{\substack{l=1, \dots, n \\ l \neq m}} \tilde{V}_l^* \tilde{Y}_{hl}^* - j \tilde{V}_h \tilde{V}_h^* \tilde{Y}_{hh}^* \quad (16)$$

$$+ j t_m \tilde{V}_h \tilde{V}_m^* \tilde{Y}_{hm}^* \quad (17)$$

Observar que  $\sum_{\substack{l=1, \dots, n \\ l \neq m}} \tilde{V}_l^* \tilde{Y}_{hl}^* = \tilde{I}_h^* - \tilde{V}_m^* \tilde{Y}_{hm}^*$ .

$$\bullet D_{hm} = \frac{\partial}{\partial t_m} \tilde{f}_h = \tilde{V}_h \tilde{V}_m^* \tilde{Y}_{hm}^*$$

Luego del desarrollo analítico anterior se procedió a implementarlo computacionalmente. El procedimiento de inscripción de funciones complejas al sistema de ecuaciones es directo; esencialmente se debe indicar las variables que intervienen y para las derivadas con respecto a qué variable se deriva especificando si se trata de la parte radial o la parte angular.

### C. Desarrollo de los algoritmos de lectura de datos de los archivos de datos de red del PSSE.

Durante esta etapa se procedió a la implementación de módulos en Pascal para la lectura y creación de objetos de flujo de carga desde archivos tipo RAW de PSSE. Se encontró que los archivos de las versiones más usadas son la versión 26 y 32 de este programa. Se implementó un módulo de lectura de ambos tipos de versiones.

Para discriminar los actores que están o no en servicio fue necesario desarrollar algoritmos de conectividad de red.

### D. Estudio de diferentes formas de incorporar la red al SIMSEE e implementación de la solución elegida.

Hay diferentes formas de aproximarse el tratamiento del "Unit Commitment" junto con el comportamiento de la red. Se vieron varios estudios en los que la red a los efectos del voltaje se modela solo en DC, en AC y otros hacen el tratamiento mediante OPF.

Trabajar con flujo de cargas DC tiene la ventaja de representar en forma muy simplificada la red disminuyendo el tiempo de cálculo, pero tiene la contra de que no se representa el comportamiento de la reactiva, por lo que si tengo elementos de compensación de reactiva o en su defecto el control de voltaje por las máquinas generadoras, no resulta un modelo adecuado a los objetivos propuestos.

En cuanto a los modelos AC, son los de flujo de cargas tradicionales.

Se vio también la conveniencia de avanzar en la implementación de un OPF ya que este modelado representaría no solo la red sino que sería una forma de implementar un Resolvedor no lineal para el problema de despacho completo, introduciendo también características más complejas de los actores del SIMSEE que podrían llegar a ser representadas mediante funciones no lineales.

Como forma de aproximarnos al problema consideramos tratar en un principio el flujo de cargas AC en forma separada del despacho hidrotérmico, como dos subproblemas. O sea se resuelve un paso de optimización del sistema hidrotérmico que tiene como resultado un determinado despacho de máquinas, el cual es tomado por el flujo de cargas para verificar la validez del caso en cuanto a los flujos por las canalizaciones. En caso de que el problema de red no sea factible, se itera haciendo las correcciones necesarias en el despacho hidrotérmico hasta que el sistema hidrotérmico-red tenga una solución factible.

### E. Solución implementada.

En el programa SIMSEE de simulación hidrotérmica se agregó una rutina que carga un caso dado de flujo de cargas en memoria para ser utilizado en cada paso de optimización. El programa SIMSEE tiene la posibilidad de definir nudos con sus correspondientes demandas y generaciones. Además se

permite la posibilidad de modelar Arcos entre los nudos con ciertos parámetros para simular en forma aproximada el comportamiento no lineal de las canalizaciones. Estos parámetros son: “Rendimiento”, “Peaje” y “Potencia Máxima”. Estos parámetros imponen restricciones en el despacho hidrotérmico por lo cual su modificación le dará al SIMSEE las señales económicas para modificar el despacho económico si fuera necesario.

En cada paso de optimización se cargan las demandas y las generaciones de cada maquina en el caso de flujo de cargas. Se corre el flujo de cargas, se analizan las potencias intercambiadas entre las diferentes zonas y en base a estos resultados se cambian los parámetros de los arcos de SIMSEE en caso de ser necesario, procediendo a iterar nuevamente el despacho económico si dichos valores fueron alterados.

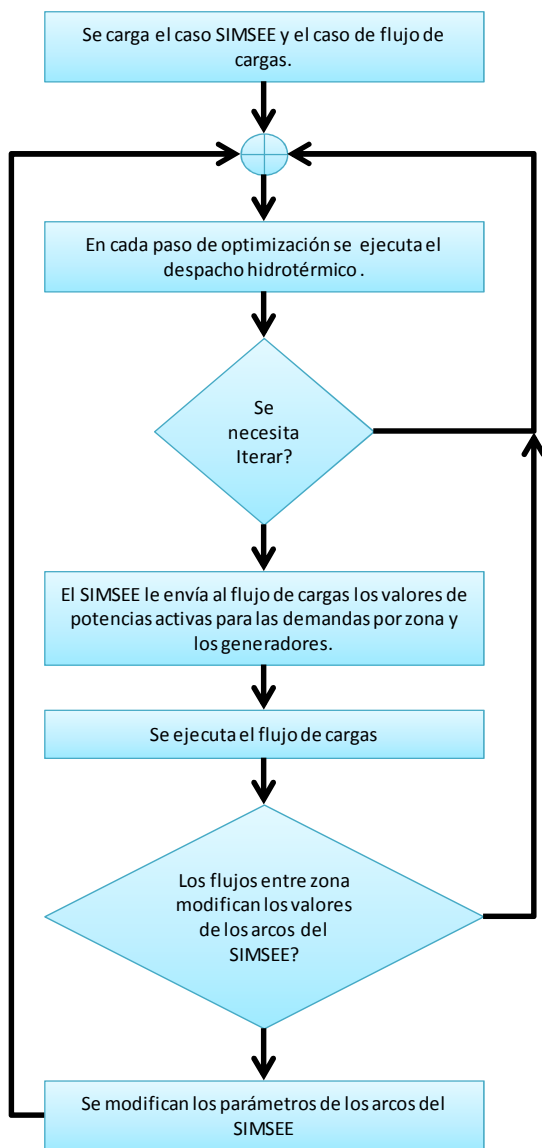


Fig. 3. Diagrama de flujos de la interacción entre el programa de coordinación hidrotérmica SIMSEE y el flujo de cargas.

Para establecer la equivalencia entre los actores que intervienen en el SIMSEE y los actores que intervienen en el flujo de cargas se definió que:

- Cada nodo del SIMSEE tiene un equivalente en una Zona del flujo de cargas, para lo cual se agregó un parámetro en la definición de los nodos que representa la zona correspondiente.
- Cada Zona del flujo de cargas esta compuesto por una serie de cargas y generadores.
- Cada carga en una determinada Zona del flujo de cargas tiene un parámetro que representa el porcentaje de la carga con respecto a la demanda total de la Zona.
- Cada nodo del SIMSEE aporta una demanda a una zona del flujo de cargas la cual es distribuida de acuerdo a los porcentajes definidos anteriormente.
- Cada Generador de SIMSEE tiene su correspondiente generador en el flujo de cargas, agregando en este caso un par de parámetros para establecer dicha correspondencia.
- Cada Arco de SIMSEE se corresponde de esta forma con todas las canalizaciones entre las diferentes zonas del flujo de cargas.

En base a estas consideraciones se implementaron en Pascal las rutinas necesarias para lograr estas correspondencias.

F. Pruebas y validación de los resultados obtenidos.

Para validar la metodología implementada se armaron dos casos de prueba: un caso de flujo de cargas y un caso de SIMSEE con sus correspondencias asociadas.

1. Caso de prueba del flujo de cargas.

Se creo un caso de flujo de cargas en formato PSEE (archivo \*.RAW) que representa el sistema Eléctrico Uruguayo en el año 2015 con alta penetración de energía renovable (1200 MW de generación eólica mas 200 MW de generación de Biomasa).

Para armar este caso se estudiaron las diferentes zonas a ser implementadas a fin de estudiar posibles transferencias de potencia críticas entre las mismas. Luego de un estudio minucioso del Sistema eléctrico Uruguayo se identificaron 7 zonas.

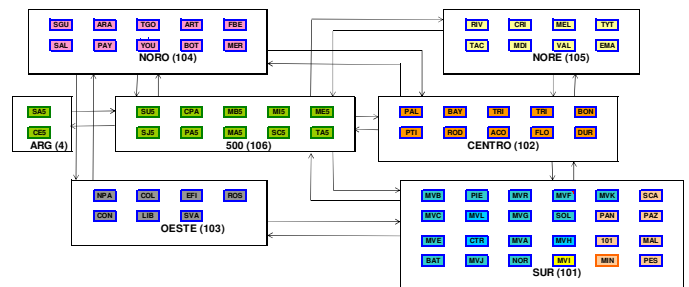


Fig. 4. Esquema de zonas en las que se dividió el Sistema Eléctrico Uruguayo a fin de armar el caso de flujo de cargas y el caso de SIMSEE.

A efectos de simplificar los cálculos se hizo un equivalente del Sistema Argentino el cual se modeló con su equivalente de Thévenin en el nudo de Salto Grande Argentina.

También se tomó dicha barra como la barra Slack o flotante del flujo de cargas ya que esto permite que dicha barra no interfiera en el modelado hidrotérmico del Sistema Uruguayo.

## 2. Caso de prueba SIMSEE.

Una vez definidas las zonas se procedió a armar un caso SIMSEE con 7 nudos correspondientes a cada una de ellas. En cada nudo se definió una demanda base correspondiente al porcentaje que de la demanda total del sistema le correspondía a cada zona.

Se definieron también cada uno de los generadores con sus correspondientes parámetros asociados para identificar los mismos en el flujo de cargas.

Para aproximarnos más al caso real también se definieron fuentes de viento para cada zona con el objetivo de diferenciar las diferentes características de los vientos según la zona geográfica de que se haga referencia.

Cabe aclarar que los intercambios internacionales se definieron como cargas en los puntos frontera del flujo de cargas, siendo positivas si son exportación y negativas si son importaciones.

Se definieron diferentes horizontes de tiempo para la optimización y la simulación a fin de estudiar el comportamiento del sistema más allá del año 2015.

## 3. Resultados obtenidos

Se hicieron corridas del SIMSEE con y sin flujo de cargas variando tanto las capacidades de las canalizaciones, los rendimientos y los peajes de las mismas. En los casos en que se tiene en cuenta la red, el SIMSEE efectivamente modifica el flujo por las líneas para adecuarse a lo que requiere el flujo de cargas.

## IV. REFERENCIAS

[1] Resolución del problema del Flujo de Cargas - Desarrollo de FLUCAR 3.0 – Proyecto de fin de carrera - Alfredo Costa y Claudio Olmedo – FING Marzo de 2002.

[2] B.G.GORENSTIN N.M.CAMPODONICO J.P.COSTA M.V.F.PEREIRA. STOCHASTIC OPTIMIZATION OF A HYDRO-THERMAL SYSTEM INCLUDING NETWORK CONSTRAINTS. Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2. May 1992.

[3] Olav Bjarte Fosso, Seyed Mohammed, Ali Hosseini. Hydro scheduling with transmission transfer limitations in a liberalized power market. XI SEPOPE, 16 a 20 de Março 2009 March – 16th to 20th – 2009 BELÉM (PA) - BRASIL. [http://webserver.eln.gov.br/sepope/dad/temas\\_rel.asp](http://webserver.eln.gov.br/sepope/dad/temas_rel.asp)