

# SimSEE

(Simulador de Sistemas de Energía Eléctrica).

---

## **Proyecto PDT 47/12** **– MEMORIA DEL PROYECTO –**

*Integrantes del equipo de trabajo:*

Director del proyecto: Dr. Gonzalo Casaravilla.

Investigador Senior: Ing. Ruben Chaer.

Investigador Junior: Est. Pablo Alfaro.

*Fecha y lugar:*

La ejecución del proyecto se realizó en Montevideo-Uruguay, y finalizó los primeros meses del 2008. Esta memoria recopila en forma ordenada el material generado antes de esa fecha con el agregado de información generada con posterioridad hasta diciembre de 2008.

### **1 Introducción.**

El proyecto fue presentado para su financiamiento al PROGRAMA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO, SUBPROGRAMA II – DESARROLLO Y APLICACIONES DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA , COMPONENTE A -ARTICULACIÓN DE OFERTA Y DEMANDA DE CONOCIMIENTOS - TECNOLÓGICOS EN ÁREAS DE OPORTUNIDAD CONVOCATORIA N°47 del Ministerio de Educación y Cultura. El financiamiento fue aprobado y el proyecto se ejecutó de acuerdo a lo previsto.

Este documento contiene los antecedentes del proyecto, la información elaborada durante su ejecución, una presentación de los resultados del proyecto y un conjunto de recomendaciones para continuar con el desarrollo de la temática.

## **2 Datos del proyecto de acuerdo al formulario de solicitud de financiamiento.**

### **2.1 Datos básicos y clasificación del proyecto según área de oportunidad.**

- Título del proyecto: "SimSEEU: Simulador del Sistema Eléctrico de Energía del Uruguay" .
- Monto total solicitado al PDT: U\$S 40000 Duración (meses) : 14
- Área de oportunidad: ENERGÍA
- Tema: Estudio de fuentes autóctonas, renovables y otras fuentes de energía.
- Área según nomenclatura Unesco:3 CIENCIAS TECNOLÓGICAS-Tecnología energética Código: 3322 .
- Subárea según nomenclatura Unesco: Fuentes no convencionales de energía Código: 332205
- Disciplinas involucradas: Fuentes Alternativas Energía y Energía Eléctrica.
- Caracterización del objetivo principal del proyecto: Apoyar el desarrollo o la mejora de procesos o tecnologías.

### **2.2 Institución proponente.**

Nombre: FACULTAD DE INGENIERIA  
 Unidad ejecutora del proyecto dentro de la institución: INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA  
 Dirección:Julio Herrera y Reissig 565  
 Ciudad: Montevideo C. Postal:11300 Depto:Ingeniería Eléctrica  
 Teléfonos: 7110698 Fax: 7115446

### **2.3 Representante institucional.**

Nombre y cargo: Blas Melissari  
 E-mail: blas@fing.edu.uy Fax: 7115446  
 Tel: 7110698

### **2.4 Responsable científico/téc. del proyecto.**

Nombre: Gonzalo Casaravilla  
 E-mail: gcp@fing.edu.uy Fax:7110974  
 Tel:7110974-int.111

### **2.5 Instituciones o empresas asociadas.**

Las siguientes empresas y/o instituciones apoyaron la realización del proyecto y comprometieron para su ejecución la asignación de los recursos humanos que se especifican a continuación:

- DE-MIEM: Dirección de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Minería. Recursos humanos: Ec. Daniel Larrosa, 3hs./sem.; Ing. Gabriel Artucio, 3hs./sem.
- URSEA: Unidad Reguladora de los Sistemas de Energía, Gas y Agua. Recursos humanos: Un profesional de la Unidad, 2hs./sem.
- UTE: Administración Nacional de las Usinas y Transmisiones Eléctricas (única empresa eléctrica y pertenece al estado). Recursos humanos: Ing. Daniel Tasende (MSC.), 3hs./sem. Ing. Alfonso Ruiz, 3hs./sem.

- ADME: Administración del Mercado Eléctrico. Recursos humanos: Ing. Alvaro Brandino, 3hs/sem, Ing. José Luis Bobba, 3hs/sem.

## 2.6 RESUMEN PUBLICABLE DEL PROYECTO

TÍTULO: “SimSEEU: Simulador del Sistema Eléctrico de Energía del Uruguay”

Palabras clave (máx. 3): simulador, energía, renovable/alternativa.

El proyecto consiste en la implementación de un Simulador Energético del Sistema Eléctrico Uruguayo que permita la simulación tanto de las unidades de generación existentes como la incorporación de nuevas unidades de generación convencionales o basadas en energías renovables, alternativas y/o unidades de Cogeneración.

El Simulador permitirá evaluar el costo de operación del sistema para diferentes escenarios de demanda, de aportes hidrológicos a las cuencas de las centrales de generación hidráulica y de disponibilidad del recurso para las centrales de generación basadas en energías renovables, alternativas o de co-generación.

El Simulador permitirá también calcular los ingresos de los diferentes actores del sistema eléctrico en base a unas reglas de remuneración definibles sobre un mercado Spot de energía y por la evaluación de las remuneraciones de los diferentes contratos entre actores también definibles. De esta forma, utilizando el simulador será posible calcular tanto el valor esperado de los ingresos previstos de un Actor del mercado como el riesgo asociado al mismo en base a la dispersión introducida por el conjunto de escenarios. Esto permitirá por ejemplo: 1) la correcta evaluación de los proyectos de generación en base a energías renovables, 2) estimar el aumento de la energía firme del sistema lograda con la incorporación al mismo de parques de generación eólica y diseñar estrategias de uso integrado con los embalses hidráulicos.

TITLE: Energy-Simulator of Non-Conventional and Conventional for the Uruguayan Electrical.

System Key words (max. 3): simulator, energy, renewable.

The project consists of building a Simulator of the Uruguayan Electrical Market that enables the simulation of not only the existing generation units but also the addition of new conventional generation units or units based on renewable energies or co-generation units. The Simulator will allow the evaluation of the system's operating costs for different scenarios on: demand, hydrologic supply to the basins and availability of the resource for the renewable or co-generation plants. The Simulator will also allow the computation of the income of the different actors of the electric market.

This will be done based on user-definable remuneration rules on a Spot energy market and on the evaluation of the different contracts among actors. It will be possible, using the simulator, to calculate both the expected value of the foreseen income of an actor in the market, and the risk associated to it, based on the dispersion introduced by the group of scenarios. This will enable for example: 1) The correct evaluation of new plants based on alternative energies and 2) The calculation of the increase in the system's guaranteed energy achieved when arrays of wind-energy generators are incorporated to the system and also the designing of strategies for their operation coordinated with the hydraulics reservoirs.

## 2.7 PROBLEMA U OPORTUNIDAD QUE PRETENDE ATENDER EL PROYECTO

El sector eléctrico Uruguayo está en una etapa de cambios con posibilidades de mayores interconexiones con los mercados de Argentina y Brasil y la necesidad de la introducción de nuevas fuentes de energía como ser la eólica, biomasa y cogeneración, energía solar como única fuente de aumento de la energía firme del sistema dado que no existe la capacidad de aumento de la generación hidráulica y tampoco disponemos de yacimientos de combustibles fósiles hasta el momento.

Dado que a la fecha no se cuenta con una herramienta en el país que permita simular esta complejidad en forma adecuada abarcando tanto los aspectos energéticos como económicos y dado que en la facultad se han realizado desarrollos en el área de simulación energética relevantes: Proyectos Hidroter y SimEnerg y que por la situación de cambio que se explicó se evidencia la necesidad de una herramienta que permita estimar el comportamiento del sistema eléctrico y de los actores involucrados se propone la realización de este proyecto.

Se quiere recalcar la importancia de que un proyecto de esta naturaleza tenga como uno de sus objetivos generar una herramienta de uso público, que permita tanto la enseñanza en el ámbito académico de los aspectos del mercado energético del país como a los diferentes actores involucrados disponer de una metodología y herramienta de uso público para realizar sus propios estudios y predicciones.

## **2.8 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN**

### **2.8.1 A nivel nacional:**

- 1) Programa de UTE: Hasta ahora la referencia sobre el tema de simulación del sistema es la empresa UTE. UTE tiene su propio simulador del sistema. Aparte de tratarse de un producto propiedad de UTE, está formado por un conjunto de rutinas FORTRAN, desarrolladas por EDF en contrato con UTE hace más de 10 años. Si bien ha servido para la evaluación de diferentes proyectos, es insuficiente en su forma de programación dificultando la realización de ampliaciones y cambios en forma eficiente y robusta y comprometiendo la eficiencia de los cálculos realizados por el simulador. En particular sería muy costoso agregar al simulador de UTE la capacidad de simular adecuadamente las energías renovables. Este inconveniente tiene base en la estructura básica del simulador que fue previsto para simular centrales térmicas y los embalses existentes en Uruguay.
- 2) HIDROTER: Optimizador de la operación de corto plazo del sistema eléctrico. Fue desarrollado en el período 1994-1996 con responsables Alfredo Piria y Daniel Tasende y un equipo integrado por Graciela Ferreira, Raúl Tempone y Eduardo Fernández, en el Instituto de Matemática de la Facultad de Ingeniería en el marco del proyecto CONICYT-BID N°173. Es un modelo determinístico que realiza el despacho de corto plazo del sistema eléctrico de Uruguay con el nivel de detalle utilizado en UTE. El método de descomposición por los precios utilizado permite el agregado y la eliminación de agentes con gran flexibilidad. Puede generalizarse a los casos con red o con incertidumbre, con el consiguiente costo en tiempo de cálculo.
- 3) SimEnerg: Es un simulador de sistemas autónomos de energía renovable que fue desarrollado por Ruben Chaer, Raúl Zeballos, Gonzalo Casaravilla y Wadaed Urbey (y colaboradores) en el Instituto de Ingeniería Eléctrica en el marco de la línea de investigación en energía renovable del Departamento de Potencia del referido Instituto. SimEnerg se utilizó eficazmente en la determinación de la distancia crítica al sistema interconectado nacional a partir de la cual dado un nivel de potencia para una instalación domiciliar es conveniente la instalación de un sistema de generación autónomo solar, eólico mixto teniendo en cuenta los datos reales de radiación solar y de velocidad de viento en diferentes partes del territorio nacional.

### **2.8.2 A nivel regional.**

- 1) En Argentina, a nivel del operador del sistema y de los agentes se utiliza un conjunto de programas conocidos como Margoy Oscar que son al igual que el programa de UTE desarrollados inicialmente por EDF, por lo cual son de características similares. Conocemos el programa y lo hemos utilizado en alguna oportunidad para el estudio de emprendimientos conjunto entre empresas de Uruguay y Argentina. También conocemos la existencia de un simulador energético desarrollado en la Universidad de San Juan. Los responsables de estos modelos nos dieron un curso

sobre el mercado Argentino y sobre su modelo de dos semanas de duración aquí en Montevideo. (ver currículum del responsable).

- 2) En Brasil, existen varios modelos. Se destaca el del Dr. Mario Pereira, que dio origen al modelo de simulación energético de OLADE. También conocemos y hemos utilizado el MODHT (Modelo de Despacho Hidrotérmico) desarrollado y utilizado por ELETROBRAS antes de la implementación del mercado Brasileró, actualmente para la programación de la operación del sistema se utiliza el programa NEWAVE de Mario Pereira. El programa NEWAVE realiza una optimización dinámica dual de los embalses del sistema para el cálculo del valor del agua.

### **2.8.3 A nivel general.**

Existe un paquete de software Super OLADE-BID. El Ing. Chaer realizó un curso en la sede de OLADE en Ecuador sobre este paquete. (ver currículum). El Ing. Vignolo participó en el curso-seminario realizado en marzo-2005 en ADME-Uruguay. Este paquete es bastante completo, y sin duda aplicable en países donde no hay otras herramientas. El inconveniente principal es que es un paquete cerrado del que no se dispone de los fuentes.

También existen otros simuladores americanos y europeos que se desarrollaron en países donde la componente de generación hidráulica es poco importante o no tiene el grado de aleatoriedad que tiene en nuestra región por lo que no se adecuan bien a la simulación de los sistemas regionales.

### **2.8.4 ¿Porqué hacer el proyecto?**

El proyecto propuesto, es realizar una síntesis de las técnicas utilizadas y conocidas por los participantes utilizando técnicas de programación de última generación que permitan tener más que un simulador en sí, un marco de herramientas que posibiliten con poco esfuerzo modelar diferentes circunstancias. A modo de ejemplo, durante el trabajo de Chaer en UTE, utilizando el modelo de simulación de UTE se encontró en varias oportunidades con que la situación a simular no estaba prevista en el modelo y que había que hacer un programa aparte que modificara los datos o las salidas para que se aproximara a lo que se quería simular (por ejemplo las condiciones de los contratos de compra de energía eléctrica desde Argentina).

Evaluadas las herramientas existentes mencionadas, se llega a la conclusión de que:

- 1) Todas utilizan técnicas similares en cuanto a la simulación. Son simulaciones determinísticas que se repiten para los diferentes escenarios.
- 2) En la etapa de optimización hay diferencias en las técnicas (optimización dinámica estocástica en el modelo de UTE, el Argentino, el MODDHT y parte del SUPEROLADE, programación dinámica dual en el caso del modelo de Mario Pereira, métodos duales determinísticos en HIDROTER y simulación de escenarios elegidos como representativos en algunos módulos de inversión del modelo de OLADE ).
- 3) Si bien las técnicas de simulación-optimización son conocidas, ha variado muchísimo las técnicas de programación y las posibilidades del hardware. Es un hecho que el aumento creciente tanto de las posibilidades de hardware como de las complejidades de los sistemas informáticos ha impulsado en los últimos cinco años a la utilización de técnicas de programación orientadas a objetos (o orientadas por los objetos) que permiten la modelación al nivel de software de los actores involucrados en el problema real y de sus propiedades de una forma sencilla y directa que permite al programador manejar la complejidad creciente con naturalidad. En este aspecto, los simuladores existentes no han sido adecuados. Este punto que puede parecer menor es de fundamental importancia. Es un simple cambio en el lenguaje utilizado, pero que tiene un efecto impresionante al momento de tener que agregar nuevos componentes en el futuro y/o adaptar los existentes. También es muy importante poder disponer de una herramienta de estas

características en forma libre. Con la potencia de las computadoras de hoy en día lo verdaderamente relevante es el tiempo humano gastado en los estudios. Hace cinco años, el tiempo de corrida de un programa de estos podría ser de 4 horas (o más) para simular por ejemplo 12 años de un sistema como el Uruguayo. Si pensamos que se quieren estudiar varias alternativas por ejemplo 6 hablamos de 24 horas. Ahora esas mismas corridas pueden durar 5 minutos en un PC de escritorio por lo que pasará ser mucho más relevante el tiempo humano en preparar una corrida y en procesar los resultados.

- 4) Sería deseable disponer de un software abierto, diseñado aprovechando las últimas técnicas de programación y la potencia de hardware actual y que permita en forma fácil su ampliación.
- 5) Por último y no menos importante es de resaltar que las herramientas existentes antes nombradas no prevén el uso de las energías alternativas dado que en los países donde fueron desarrollados no revisten de importancia para el sistema. En este sentido hay que hacer notar que al ser el Uruguay un país pequeño, que ha agotado su capacidad de ampliación del parque hidráulico y que no dispone de petróleo, es cada vez más importante el enfoque técnico que se le pueda dar a la evaluación de nuevas fuentes de energía.

## 2.9 OBJETIVOS DEL PROYECTO

### 2.9.1 GENERAL

Tener una herramienta que permita la simulación y optimización de la operación del sistema eléctrico uruguayo y especialmente evaluar el impacto de fuentes alternativas de energía. Es parte del objetivo general, que la herramienta desarrollada sea de uso público, flexible para posibilitar su fácil expansión y adecuada para su uso educativo.

### 2.9.2 ESPECÍFICOS

1. Modelar los diferentes actores del sistema eléctrico de energía en su comportamiento como consumidores o generadores de energía. (Simulación de los Flujos de Energía).
2. En todos los casos modelar el comportamiento estadístico de las variables en función de las aleatoriedades introducidas en la simulación. Por ejemplo, el ingreso de un generador en el spot más que un número es un conjunto de valores que representan los posibles ingresos según sea el escenario simulado.
3. Crear una herramienta que permita la observación de la dinámica de las variables relevantes del sistema.
4. Generar un modelo genérico de instalación eólica, biomasa, co-generación y solar que permita incorporar fácilmente este tipo de generación al sistema interconectado.
5. Crear el módulo de optimización que permita el cálculo de la política óptima de operación teniendo en cuenta los posibles escenarios tanto de hidrología como de demanda o de cualquier otra variable que se quiera introducir como aleatoria en la simulación.
6. Permitir el uso de la herramienta desarrollada por otros usuarios
7. Divulgación de las metodologías utilizadas en la simulación de sistemas y mercados de generación de energía eléctrica, orientada a la formación de profesionales uruguayos en el tema.

### 2.9.3 RESULTADOS DEL PROYECTO (INTERMEDIOS Y FINALES)

- 1) Implementación software de las clases genéricas GENERADORES (Térmico, Hidráulico, Eólico, permita verificar la Biomasa, otras Alternativas), DEMANDAS, operación de las clases IMPORTACIONES y EXPORTACIONES en su definidas. A este nivel comportamiento energético. Estas clases serán se supondrá un política básicas en su comportamiento. Particularidades de de operación que los generadores (por ejemplo una central hidráulica permita la simulación de con vertedero especial). Deberán ser modeladas las clases por un refinamiento de la clase básica.  
*Resultado verificable:* Programa de test que permita verificar la operación de las clases

definidas. A este nivel se supondrá un política de operación que permita la simulación de las clases.

- 2) Implementación de las clases MERCADO\_SPOT y CONTRATOS (de suministro y de potencia).  
Estas clases se implementarán con una definición básica en que los agentes son remunerados por el costo marginal del mercado Spot de corto plazo y los contratos son liquidados en sus partes variables por este mismo valor. Reglas particulares de la remuneración en el spot o de los contratos serán definidas como refinamiento de estas clases.  
*Resultado verificable:* Programa de test que permita la simulación del flujo económico entre los agentes y el mercado spot.
- 3) Se diseñará e implementará la estructura de datos necesaria para soportar la multiplicidad de escenarios.  
Se modificarán las clases definidas en 1 y 2 para que sus propiedades soporten la multiplicidad de valores asociados a la multiplicidad de escenarios.  
*Resultado verificable:* Programa de test que permita realizar las mismas simulaciones que en 1 y 2 pero mostrando los resultados en el conjunto de los escenarios simulados.
- 4) Se definirá la clase MONITOR con la posibilidad de “monitorear” cualquier variable de las instancias de las clases antes definidas y con la posibilidad de visualizar en una pantalla gráfica la variación de dicha variable durante la simulación.  
*Resultado verificable:* Programa de test incorporado al test anterior.
- 5) Se crearán dos instancias refinadas de la clase generador para representar con facilidad una instalación solar y una instalación eólica.  
*Resultado verificable:* Programa de test.
- 6) Se creará el módulo de optimización que calculará la política óptima de operación del sistema teniendo en cuenta la diversidad de escenarios planteados en las variables con incertidumbre.  
*Resultado verificable:* Programa de test.
- 7) Creación del Manual de usuario de los diferentes módulos.
- 8) Generación de un curso basándose en casos de estudio.

## 2.10 METODOLOGÍA Y ESTRATEGIA PROPUESTAS.

En general usaremos la Técnica de Modelado de Objetos que consiste en ir construyendo el modelo mediante la descripción de los actores participantes, la relación entre ellos, las propiedades que tienen y las acciones que son capaces de ejecutar en el modelo.

Una vez madura una definición de este modelo se implementará cada uno de los objetivos específicos con su correspondiente verificación.

Los dos puntos en los que pueden aparecer dificultades en la definición son:

- a) La representación de los valores aleatorios en las propiedades de los objetos. Aquí se puede optar por representar cada escenario por separado, es decir como fotografías del conjunto de los objetos y sus propiedades en un paso de tiempo dado o en representar directamente cada propiedad de un objeto como una magnitud que puede tener muchos valores. (el problema es de implementación con compromiso entre claridad de la representación vs. escalabilidad)
- b) La representación de las variables con incertidumbre, que se pueden tratar como variables aleatorias con curvas de densidad de probabilidad o realizar muchos sorteosy simular todo como escenarios, o permitir combinaciones de ambas cosas.

Estos puntos interfieren en los objetivos específicos 3 y 6.

## 2.11 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

NÚMERO Y RESUMEN NARRATIVO DE CADA ACTIVIDAD		MESES EN QUE SE REALIZARÁ CADA ACTIVIDAD														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	--
1	Implementación software de las clases genéricas GENERADORES (térmico, hidráulico, renovable ) en su comportamiento energético.	X	X	X	X											
2	2. Implementación de las clases MERCADO_SPOT y CONTRATOS			X	X	X										
3	Se diseñará e implementará la estructura de datos necesaria para soportar la multiplicidad de escenarios					X	X	X								
4	Se definirá la clase MONITOR con la posibilidad de "pinchar" cualquier variable de las instancias de las clases antes definidas para su visualización.				X	X	X	X	X	X						
5	Se crearán dos instancias refinadas de la clase generador para representar con facilidad una instalación solar y una instalación eólica										X	X				
6	Se creará el módulo de optimización que calculará la política óptima de operación del sistema.						X	X	X	X	X	X				
7	Creación del Manual de usuario de los diferentes módulos											X	X	X		
8	Generación de un curso basándose en casos de estudio y presentación final											X	X	X	X	
Mes de ejecución		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	--
MESES EN QUE SE CUMPLIRÁ UN HITO*					1	2		7		4		5	6	7	8	

## 2.12 CAPACIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIDAD EJECUTORA.

- 1.- Sala de reuniones para 12 personas.
- 2.-Oficina del Investigador responsable del proyecto. Son tres puestos de trabajo equipados con 4 PC de última generación conectadas a la Red del IIE (impresoras Laser, acceso irrestricto a internet, etc.)
- 3.Aceso irrestricto a formato digital de artículos de revistas (y algunas conferencias) IEEE e IEE de 1988 a la fecha (IEEEExplore).

## 2.13 IMPACTOS ESPERADOS.

El principal impacto será disponer de una herramienta para caracterizar la utilización de energías renovables y alternativas en el sistema eléctrico uruguayo. Sin duda como consecuencia inseparable de lo anterior, el acceso a la información del mercado eléctrico y su manejo por un mayor número de personas facilitará la toma de decisiones para todo los actores involucrados al sistema eléctrico uruguayo y su expansión.

## 2.14 USUARIOS POTENCIALES DE LOS RESULTADOS.

En el ámbito industrial son potenciales usuarios todos los actores que participen del sector eléctrico, tanto al nivel de generación como de distribución, grandes consumidores y/o industrias interesadas en realizar co-generación o instalación de fuentes renovables de energía. También son usuarios potenciales del producto futuros

intermediarios (Comercializadores) de energía que pudieran aparecer en el mercado regional.

A nivel regulatorio las instituciones que se encargan de la reglamentación y fiscalización del mercado podrían sacar provecho de una herramienta como esta si se logra una difusión adecuada de la misma.

En el ámbito académico, los usuarios serán los estudiantes y profesores que podrán utilizar la herramienta como una forma de realizar un curso sobre el sistema eléctrico nacional, sus actores, reglamentos, formas de contratación etc.

## **2.15 ESTRATEGIA PREVISTA PARA LA TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS A LOS USUARIOS POTENCIALES.**

La estrategia de difusión comienza con la generación del manual de usuario y su publicación libre en internet junto con el software desarrollado (actividad 7). Continúa con la generación del curso y presentación final del mismo en una conferencia informativa abierta a realizarse en la Facultad de Ingeniería (actividad8).

Por otra parte y fundamentalmente, la transferencia a los directos y principales usuarios potenciales es directa y a la casi totalidad son participantes en el proyecto (ADME, URSEA, UTE y la DE del MIEM). En todos los casos sus participaciones son con recursos humanos calificados que en sus respectivos ámbitos de trabajo darán uso a la herramienta fruto de este proyecto.

### 3 Memoria de la ejecución del proyecto.

Una parte importante del diseño del SimSEE fue realizada con anterioridad del comienzo del proyecto. Es evidente que la solicitud de financiamiento del proyecto se basa en la idea de implementar el simulador SimSEE, idea que surge de una historia de utilización de otras herramientas y de haber detectado las limitaciones de las mismas. Por lo tanto el equipo de desarrollo comenzó con definiciones claras desde el inicio en cuanto a que la implementación debía hacerse como si el simulador fuera “un lugar” donde era posible poner “actores” a jugar. La idea es básicamente la utilizada en el desarrollo del simulador SimEnerg [1] y que demostró ser muy efectiva al momento de mezclar grupos de trabajo heterogéneos con participación de especialistas en la materia de simulación (en este caso sistemas de energía eléctrica) con especialistas en informática. Esta es una ventaja indiscutible de la metodología orientada por los objetos (Object Oriented Modelling Technic) y en particular, la utilización de un lenguaje como puede ser “sala de juego” y “actores” simplifica el dialogo y entendimiento en el equipo de trabajo y para los potenciales usuarios del software.

El lenguaje utilizado para la implementación fue Delphi Pascal. Se compró el entorno de desarrollo Delphi2007 a la empresa CODEGEAR con financiamiento del proyecto. Si bien se utilizó este entorno de desarrollo para la implementación el software desarrollado compila también con la versión gratuita del compilador pascal FreePascal (<http://freepascal.org>), salvo alguna aplicación auxiliar estrechamente ligada a Windows como puede ser un procesador de resultados que genera planillas Excel. La posibilidad de compilar con FreePascal es importante pues este compilador está disponible en forma gratuita lo cual es importante para permitir que los potenciales usuarios puedan hacer mejoras al simulador sin el impedimento de tener que adquirir un software de desarrollo específico. También es importante pues FreePascal está disponible tanto para Windows como para Linux lo que permite el uso de SimSEE en máquinas con ambos sistemas operativos.

En la ejecución del proyecto es posible distinguir dos grandes etapas: “Implementación del simulador SimSEE” y difusión de resultados.

#### 3.1 Implementación del simulador SimSEE

En esta sección se presentan los resultados de la ejecución de los hitos 1 a 6 inclusive (ver sec. 2.9).

##### 3.1.1 Técnicas de Modelado Orientadas por los Objetos.

En los sistemas que trataremos, no existe un único escenario conocido sino que por el contrario hay una variedad importante de escenarios que pueden presentarse en forma aleatoria. A modo de ejemplo, si consideramos lo que puede llover en los embalses de las centrales de generación como un estímulo externo al sistema de generación, es claro que no existe un único escenario.

La metodología en estos casos, será modelar los estímulos como fuentes aleatorias capaces de generar la multiplicidad de escenarios e incluirlas de esa forma dentro de la simulación del sistema.

En la realización de un modelo (sea de lo que sea) siempre hay un compromiso entre complejidad y exactitud. Cuanto más exacto sea el modelo seguramente será más complejo e implicará un tiempo de cálculo elevado. En la creación de un modelo se debe buscar el máximo de funcionalidad y exactitud con el mínimo de complejidad. Tenemos que agregar algo que va en contra de tener modelos complejos aparte de lo que puede significar el tiempo de cálculo y es el TIEMPO DE MANTENIMIENTO Y MODIFICACION DEL MODELO. Esto que a primera vista puede parecer accesorio

(alguien podría decir, una vez que ya está el modelo lo único que importa es el tiempo de cálculo y la exactitud), no lo es. Ningún modelo está siempre lo suficientemente probado y verificado y en cualquier momento puede surgir la necesidad de realizar cambios, correcciones o mejoras.

Por esta razón, los modelos deben ser lo más simples posibles que permitan lograr la exactitud deseada. Por simples nos referimos no solo a que tengan pocos parámetros sino que deben cumplir con una condición de estar descompuestos en partes identificables que representen las entidades (Objetos del sistema) de la realidad en forma directa. Es a esta forma de modelar lo que se llama “técnica de Programación Orientada por los Objetos (OOP)”. El nombre intenta reflejar, que los objetos son la guía orientadora de la programación.

A modo de ejemplo, en modelos matemáticos no OOP se pondría un vector con todas las potencias disponibles de las máquinas del sistema, otro vector con los costos de generación por máquinas y así sucesivamente. En un modelo OOP, cada generador estará representado en el sistema y será esa entidad que tendrá una propiedad que será la potencia disponible y otra que será el costo. Es decir no se romperán los conceptos de pertenencia de las propiedades de los objetos en aras de una simplicidad de implementación del programador. La razón principal para seguir estas metodologías es que en la práctica, cuando modelamos cosas de un porte considerable como son los SEE, es poco probable que una persona logre tener la maduración suficiente del modelo y sus complejidades como para hacer una implementación correcta y definitiva desde el comienzo y por lo tanto es mejor una implementación que aunque al principio pueda parecer aparatosa (desde el punto de vista del programador), al mantener las relaciones de los objetos entre si y con sus propiedades es más sencillo de modificar, ampliar y corregir.

El tema de corregir es fundamental, siempre que hablamos de corregir, es que detectamos que algo que implementamos de determinada manera es incorrecto, ya sea por errores de implementación o por errores conceptuales del modelado e implica tirar parte del trabajo realizado para sustituirlo por la nueva implementación. En este sentido, cuanto más OOP sea nuestra implementación menor será la cantidad de trabajo que habremos perdido en una corrección, dado que las relaciones entre los objetos son datos de la realidad. También cuando se trata de mejorar un modelo agregando complejidad, con una buena base OOP se trata de agregar detalles a lo ya realizado, si la implementación no es OOP implicará seguramente reprogramar gran parte de lo realizado.

### **3.1.2 Sala de Juego y Actores.**

SimSEE, está desarrollado totalmente orientado por los objetos. Como veremos, por esta razón es sencillo crear nuevos modelos de Generadores, Demandas, Mercados, etc. e integrarlos al sistema.

Para facilitar el modelado, hemos creado el concepto de Actores (que son los modelos de Generadores, Demandas, Nodos, Arcos, etc. ) y el concepto de SalaDeJuego.

Editar una simulación consiste en seleccionar los Actores que participarán del Juego, poniéndolos en la SalaDeJuego. Simular consiste en hacer que el “tiempo transcurra” en la SalaDeJuego y observar el comportamiento de los actores. Para facilitar la escritura de los modelos de los Actores y que cumplan con el propósito del simulador, se implementan una serie de servicios disponibles en la sala y de los que los actores pueden hacer uso.

#### **3.1.2.1 Programación por EVENTOS.**

La “animación” de los ACTORES dentro de la SALA DE JUEGO es ocasionada por la “reacción” de los ACTORES a diferentes EVENTOS. A diferencia de la programación clásica en que podemos seguir un hilo de ejecución predeterminado, en la programación por EVENTOS debemos pensar en que podría hasta estar distribuida

entre varias computadoras los diferentes actores y que cada uno reacciona frente a los ENVENTOS pero no tenemos necesariamente definido en orden en que lo hacen.

La simulación se lleva a cabo lanzando eventos sobre la sala de juego y permitiendo que los actores reaccionen.

Los actores deben implementar la respuesta a determinados EVENTOS para ser funcionales en el simulador. Por ejemplo, todos los actores tienen que saber indicar si son capaces de entregar potencia o recibir potencia en el nodo en que están conectados.

Cada ACTOR es el que sabe como actuar en cada momento influenciado por su estado, y la información que recibe.

Este tipo de programación difiere un poco de la forma tradicional en el sentido que no hay un flujo predeterminado. Lo que hay son EVENTOS a los que los ACTORES responden. Para fijar ideas, en el transcurso de una simulación, en cada paso de simulación, los eventos a los que los ACTORES deben reaccionar serán:

- evSorteosDelPaso. En este evento, cualquier ACTOR que necesite realizar sorteos los realiza. Por ejemplo, la DISPONIBILIDAD FORTUITA de las máquinas se determina como respuesta a este evento.
- evPrepararPasoPostSorteo. En este evento los ACTORES hacen los cálculos que tengan que hacer para dar el paso.
- evCargarProblema. En este evento los ACTORES cargan sus datos en el planteo del problema de DESPACHO de la etapa. En la implementación de SimSEE el problema de despacho está planteado como un SIMPLEX mezclado con programación entera.
- evCargarCotas. En este evento los ACTORES fijan las cotas de las variables del SIMPLEX. Por ejemplo, los valores máximos y mínimos de las potencias despachables.
- evLeerResultados. En este evento, los ACTORES leen los resultados del despacho.

El pseudo código del programa de simulación sería:

```
LimpiarAcumuladoresDeResultados;
for kcronica:= 1 to NCronicas do
begin
  tirarEvento( evPreparseInicioCronica);
  for kpasso:= 1 to NPasosSimulacion do
  begin
    tirarEvento( evSorteosDelPaso );
    tirarEvento( evPrepararPasoPostSorteo );
    tirarEvento( evCargarProblema );
    tirarEvento( evCargarCotas );
    ResolverProblema;
    tirarEvento( Actores, evLeerResultados );
  end;
  AcumularResultadosDeLaCrónica;
end;
GuardarResultadosAcumulados;
```

Donde la función tirarEvento “dispara” el evento sobre los ACTORES y espera a que todos terminen de reaccionar.

### 3.1.2.2 Parámetros Dinámicos.

Es común que durante el HORIZONTE DE TIEMPO los ACTORES deban cambiar los valores de sus parámetros para reflejar la realidad que intentan modelar. Por ejemplo si

una central de generación aumenta su probabilidad de rotura cuando envejece se puede reflejar en el ACTOR correspondiente haciendo que el valor del FACTOR DE DISPONIBILIDAD sea uno durante los primeros años de operación y que baje progresivamente hasta un valor que corresponda a la central cerca del final de su vida útil.

Para facilitar la escritura de los modelos y que no halla que preocuparse en cada ACTOR de escribir un mecanismo de actualización de parámetros, la SALA DE JUEGO ofrece un SERVICIO DE PARAMETROS DINAMICOS que en pocas palabras permite a los actores declarar al inicio un subconjunto de sus parámetros que deben ser considerados como PARAMETROS DINAMICOS y establecer los valores iniciales y las fechas en las que se deben cambiar dichos parámetros y el valor que deben tomar. Para esto, el ACTOR inscribe en el SERVICIO DE PARAMETROS DINAMICOS distintas FICHAS DE PARAMETROS DINAMICOS en las que especifica la fecha de valides y los valores que toman los parámetros en esa fecha.

Como veremos en la utilización práctica del simulador, este servicio es muy potente y permite indicar si los parámetros varían gradualmente entre las diferentes fichas (interpolación) o si cada ficha indica un cambio a partir de su fecha.

También permite declarar fichas con periodicidad y cadencias sobre la periodicidad para poder programar con facilidad ciclos de plurianuales como pueden ser los mantenimientos de las centrales que constan por ejemplo de un período de una o dos semanas de mantenimiento programado por año y una vez cada cuatro o cinco años un mantenimiento más completo que lleva uno o dos meses en que la central no puede generar.

El ACTOR no tiene que preocuparse durante la simulación de actualizar sus parámetros. La SALA DE JUEGO, le da el servicio de mantenerle los valores actualizados en todo momento.

### 3.1.2.3 Parámetros funcionales.

Otro servicio de la SALA DE JUEGOS que puede ser usado por los actores es el de establecer que un parámetro es el resultado de la evaluación de una función. Hay un conjunto de funciones preestablecidas que pueden incluirse dentro de la SALA DE JUEGO al momento de edición y entonces podemos seleccionar para un parámetro de una ACTOR usar un valor fijo (o de una FICHA DE PARAMETROS DINAMICOS) o a una FUNCION.

Por ejemplo, los costos variables de generación de las centrales térmicas se definieron en los ACTORES correspondientes como parámetros dinámicos funcionales para poder o bien poner actor por actor valores para sus costos variables en las fichas de parámetros dinámicos o poder conectar algunos de esos parámetros a una función. Esto es útil por ejemplo, para hacer una función que calcule el costo de cada combustible (GAS NATURAL, GASOIL, FUELOIL, CARBON, etc. ) y mediante parámetros dinámicos tener en cuenta la variación de esos precios con el tiempo. A cada actor, según el tipo de generación le conectamos el costo variable de generación a la función que refleje el combustible que utiliza y así tenemos que todos cambian automáticamente sus costos a considerar diferentes proyecciones de precios para los combustibles.

### 3.1.2.4 MONITORES

Otro servicio implementado en la SALA DE JUEGOS es un REGISTRO DE VARIABLES. Los actores pueden registrar las diferentes variables que pueden resultar de interés para monitorear el desarrollo de una simulación. Por ejemplo, un generador térmico puede declarar la potencia generada, el costo variable de generación, etc. No hay ningún costo de eficiencia por registrar las variables.

Al estar las variables registradas las mismas son monitoreables en tiempo de ejecución. Esto permite por ejemplo definir un monitor gráfico para ver durante la simulación la potencia despachada por una máquina.

Los monitores son como los ACTORES, en cuanto a que se introducen en la SALA DE JUEGO y que reaccionan a eventos (en los que capturan datos) pero no los llamamos ACTORES pues reservamos esa calificación para las entidades que participan del intercambio de energía. Los monitores son entidades artificiales introducidas para nuestra comodidad.

En el editor de SimSEE, hay una pantallita que nos permite definir los monitores y salvarlos en un archivo separado del de definición de la simulación. Esto nos permite tener diferentes juegos de monitores para una misma simulación y elegir la “vista” que queremos tener de la misma.

Actualmente hay definidos los siguientes tipos de monitores:

- Monitor Consola. Permite seleccionar una variable de un actor y un evento. Cuando ocurre el evento imprime el valor de la variable en la salida estandar del simulador (consola de texto).
- Monitor Gráfico Simple. Permite seleccionar varias variables registradas para graficar en un mismo gráfico. Se selecciona un evento para graficar los nuevos valores de las variables y un evento para limpiar el gráfico. Generalmente, en la simulación el evento de graficación es el FIN DEL PASO para tener un nuevo valor del gráfico al final de cada paso y el evento INICIO DE CRONICA para limpiar el gráfico así vemos una simulación completa. Este monitor es para usar más que nada con fines didácticos o para analizar en tiempo de ejecución algún comportamiento que no entendemos. Para facilitar el uso de estos monitores en el simulador existe la posibilidad de pedir que la simulación se detenga (por ejemplo al finalizar una crónica) y tengamos que presionar un botón para que continúe y poder analizar los gráficos con tranquilidad.
- Monitor Archivo. Es similar al gráfico, pero en lugar de mostrar las gráficas los valores son almacenados en una archivo de disco especificado. Este monitor puede resultar útil para obtener un archivo con los valores de interés ya filtrados al final de la simulación .  
Monitor Histograma. Es útil para construir un histograma de una variable.

### 3.1.3 Modelo de la implementación del simulador.

Queremos hacer un planteo genérico que nos permita realizar la simulación “armando” el sistema agregando sus componentes uno por uno.

En cada paso de simulación debemos resolver el problema de despacho, mediante la resolución de un problema de optimización con restricciones.

Los modelos que realizaremos de los actores y restricciones nos permite plantear el problema de optimización como un PROBLEMA LINEAL.

Para la resolución del problema de optimización lineal usamos un algoritmo SIMPLEX.

El planteo del problema es en forma genérica:

$$\text{máx} \left( - \sum_{j=1}^{j=mv} c_j \cdot x_j \right)$$

sujeto a :

$$RD_i): \sum_{j=1}^{j=mv} a_{ij} \cdot x_j + b_i \geq 0 ; i = 1..NRD$$

$$RI_l): \sum_{j=1}^{j=mv} a_{lj} \cdot x_j + b_l = 0 ; l = 1..NRI$$

Observar que hemos planteado el problema como maximizar el negativo de la función de costo. Y las restricciones de desigualdad las planteamos como mayores o iguales que cero. Esto lo hacemos así, pues el SIMPLEX que estamos utilizando requiere los datos en ese formato.

Para facilitar el armado del problema, vamos a crear una MATRIZ A con todos los coeficientes, cada fila corresponderá a una restricción (de igualdad o desigualdad). En la última fila pondremos los coeficientes de la función de costo (los  $c_j$ ) y con en cada columna pondremos los coeficientes de la variable  $x_j$  correspondiente. En la última columna pondremos los términos constantes de las restricciones (los  $b$ ).

El arreglo sería algo así:

	x1	x2	...	xnv	1	
R1	a11	a12	...	a1nv	b1	$\geq 0$
R2	a21	a22	...	a2nv	b2	$= 0$
...	...	...	...	...	...	...
RM	am1	am2	...	amnv	bm	$\geq 0$
-fc	-c1	-c2	...	-cnv		

Donde hemos mezclado las restricciones de igualdad y de desigualdad renumerándolas de 1 a  $m = \text{NRD} + \text{NRI}$ .

Vamos a plantear el problema completo (todos los POSTES a la vez) para el paso de tiempo.

Tenemos que pensar que en cada paso de tiempo hay que:

1. Dimensionar el problema de despacho.
2. Armar las ecuaciones del problema.
3. Resolverlo y
4. Leer la solución y asignar los valores a cada central.

Vamos a adoptar una implementación "colaborativa" en el sentido de que le vamos a enseñar cada ACTOR a agregar la información necesaria al problema de optimización y leer los resultados.

### 3.1.3.1 Dimensionado del Problema (Conteo de variables y restricciones)

Lo primero es que cada ACTOR nos "sepa decir" la cantidad de variables de optimización que se deben considerar para él y la cantidad de restricciones que él quiere imponer. De las variables de optimización, algunas pueden ser variables enteras lo que requiere un tratamiento especial en la resolución del SIMPLEX. Entonces, también necesitaremos que los actores nos informen cuantas de sus variables de optimización son enteras.

Para ejemplificar, una central térmica sencilla, no impone restricciones adicionales al problema por lo que constatará  $\text{opt\_nrest} = 0$  y tiene como variables de optimización la potencia despachada en cada poste por lo que constatará  $\text{opt\_nvars} = \text{Cantidad de postes}$ .

Una central que quiera agregar una restricción de energía máxima en el paso de tiempo constatará  $\text{opt\_nrest} = 1$ .

También a modo de ejemplo, si la central térmica es del tipo con mínimo técnico, será necesario disponer de una variable entera que nos indique si la central está prendida o apagada.

Para que cada ACTOR sepa cómo cargar la información del problema y leer después los resultados, necesita saber el lugar que ocupan sus variables en el planteo del problema global. Para eso, les definiremos las variables  $\text{opt\_ivar}$  y  $\text{opt\_ires}$  que serán el índice asignado a la primer variable del actor en el conjunto de variables de optimización (columna del problema) y el índice asignado a la primer restricción del actor en el conjunto de restricciones (fila del problema).

Todo modelo de ACTOR debe entonces implementar un procedimiento, que recibe como parámetro los índices actuales (de las variables y de las restricciones), y los devuelve aumentados en las cantidades (de variables y restricciones) que el ACTOR agrega al problema. Adicionalmente, el ACTOR utiliza la información pasada al en el procedimiento para quedarse “sabiendo” el índice donde comienzan en el problema sus variables y restricciones.

El prototipo del procedimiento es: `procedure opt_nvers( var ivar, ivae, ires: integer );`  
 Donde ivar es el índice de la próxima variable de optimización e ires es el índice de la próxima restricción adicional. Por restricción adicional entendemos una restricción que no es de las restricciones de caja de las variables de control. El índice ivae es el índice de la próxima variable ENTERA.

Este procedimiento nos permitirán dimensionar el problema de optimización. Para ello bastará con poner los índices variables de restricciones en 1 y recorrer los actores llamando el procedimiento de conteo, para que ellos vayan sumando la cantidad de variables y la cantidad de restricciones de cada uno.

El pseudo código de la recorrida de conteo de variables y restricciones sería:

```

ivar:= 1; // índice de variables de control
ires:= 1; // índice de restricciones adicionales
ivae:= 1; // índice de variables enteras

for k:= 0 to high(actores) do
  actores[k].opt_nvers( ivar, ivae, ires );
  
```

### 3.1.3.2 Cargado del problema lineal.

Una vez conocida la dimensión dle problema, creamos un Simplex de la dimensión correspondiente y recorremos los actores llamando el procedimiento `opt_Cargue` para que cada actor cargue en los casilleros de la matriz que corresponda sus valores.

```

spx:= TSimplex.create_init( ires, ivar );

(* Ahora recorreremos nuevamente los actores para que se “agregen” al problema *)
for iactor:= 1 to NActores do
  Actores[iactor].opt_Cargue( spx );

(* Le damos la oportunidad a cada actor de imponer restricciones de caja *)
for iactor:= 1 to NActores do
  Actores[iactor].opt_fijarRestriccionesDeCaja( spx );
  
```

### 3.1.3.3 Resolución del problema de despacho de la etapa.

Una vez cargada la matriz del simplex y fijadas las restricciones de caja, estamos en condiciones de resolver el problema, lo que se hace con una simple llamada al procedimiento `resolver` del simplex.

```

(* Ahora resolvemos el problema *)
spx.resolver;
  
```

### 3.1.3.4 Lectura de los resultados del despacho.

Una vez resuelto el simplex, recorreremos los actores llamando al procedimiento `opt_LeerSolucion`, para darles la oportunidad de capturar los resultados del despacho.

Por ejemplo, los generadores leen la potencia con que resultaron despachados en cada uno de los postes del paso de tiempo.

```
(* Ahora que cada uno lea su parte de la solución *)
for iactor:= 1 to NActores do
  Actores[iactor].opt_LeerSolucion( s );
```

### 3.1.3.5 Modelo de Nodo

- Variables de control: 0.
- Restricciones: NPostes. Son las del balance de potencias en el nodo y hay una restricción para cada POSTE.

Como resultados del despacho, tenemos los multiplicadores de Lagrange de las restricciones. Estos multiplicadores corresponden a la variación incremental del costo frente a un incremento en el valor de cada restricción. Como la restricción es la de balance de potencias (en MW) el multiplicador de Lagrange refleja el monto en dólares de producir 1MW adicional en el poste en cuestión. Este valor, dividido por la duración del POSTE corresponde al costo marginal de generación del POSTE, expresado en USD/MWh.

A continuación mostramos los procedimientos fundamentales de TNode.

Dimensionado del problema:

```
procedure TNode.opt_nvers( var ivar, ivae, ires: integer );
begin
  // el nodo no agrega variables de control
  // no modificamos ivar, ni ivae y no necesitamos guardar sus valores

  // El NODO agrega una restricción por cada POSTE
  Self.ires:= ires; // guardamos el valor de ires
  ires:= ires + globs.NPostes; // incrementamos ires en la cantidad de POSTES
end;
```

Cargando el problema: El nodo no carga coeficientes en la matriz del problema, pero debe indicar que las restricciones de nodo son de igualdad.

```
procedure TNode.opt_cargue( s: TSimplex );
var
  ip: integer;
begin
  for ip:= 0 to globs.NPostes-1 do
    s.FijarRestriccionIgualdad(ires + ip);
  end;
```

Fijando restricciones de caja: (No tiene variables de control por lo que no tiene que fijar ninguna restricción de caja)

```
procedure TNode.opt_fijarRestriccionesDeCaja( s: TSimplex );
begin
  // no tiene variables no tiene restricciones de caja
end;
```

Leyendo el resultado del despacho:

```

- procedure TNode.opt_leerSolucion( s: TSimplex );
- var
-     iposte: integer;
-
- begin
-     // no tiene variables no tiene que leer las variables.
-     // lo que podemos leer es el multiplicador de Lagrange para tener
40 // el costo marginal del nodo.
-     for iposte:= 0 to globs.NPostes-1 do
-         cmarg[iposte]:= -s.ymult( ires+ iposte ) / globs.durpos[ iposte ];
-     end;

```

### 3.1.3.6 Modelo de Demanda

Actualmente tenemos dos formas de especificar los valores de la demanda. El modelo de 3 curvas y el modelo Detallado.

Los modelos sólo difieren en la forma de especificar los valores de la potencia demandada, y coinciden en el resto de las características.

- Variables de control: NPostes \* NescalonesDeFalla y corresponden a las potencias despachadas de las máquinas de Falla.
- Restricciones: 0

Dimensionando el problema:

```

- procedure TDemanda01.opt_nvers( var ivar, ivae, ires: integer );
- begin
-     Self.ivar:= ivar;
-     // tengo para cada escalón de falla una variable por poste
-     ivar:= ivar+ NEscalonesDeFalla*globs.NPostes ;
- end;

```

Cargando el problema:

```

- procedure TDemanda01.opt_cargue( s: TSimplex );
- var
-     iposte, iescalon: integer;
-     ibaseres: integer;
- begin
-     ibaseres:=nodo.ires;
-     // Carga el término constante de las restricciones de demanda
-     for iposte:= 0 to high( PPa ) do
-         s.acum_e( ibaseres + iposte, s.nc, -PPa[iposte] );
-
-     // Ahora corresponde cargar las máquinas de falla
-     for iescalon:= 0 to high( falla_profundidad ) do
-         for iposte:= 0 to globs.NPostes-1 do
-             begin
-                 // cargamos la potencia en la restricción del nodo
-                 s.pon_e( ibaseres+iposte, ivar+iescalon*globs.NPostes+iposte, 1 );
-                 // cargamos el coeficiente del costo en la función objetivo
-                 s.pon_e( s.nf, ivar+iescalon*globs.NPostes+iposte, -falla_costo[ iescalon ]* globs.durpos[ iposte ] );
-             end;
-         end;
-     end;

```

Fijando restricciones de caja:

```

- procedure TDemanda01.opt_fijarRestriccionesDeCaja( s: TSimplex );
10 var
-     iescalon, iposte: integer;
-     Fpmax: NReal;
- begin
-     for iescalon:= 0 to high( falla_profundidad ) do
-         // Le fijamos la potencia máxima de cada escalón en cada poste
-         for iposte:= 0 to globs.NPostes-1 do
-             begin
-                 Fpmax:= PPa[iposte]* Self.falla_profundidad[iescalon];
-                 s.cota_sup_set( ivar+iescalon*globs.NPostes+iposte, Fpmax);
20             end;
-         end;
-     end;

```

Como resultado del despacho, tenemos las potencias despachadas de las máquinas de falla.

Leyendo resultados:

```

- procedure TDemanda01.opt_leerSolucion( s: TSimplex );
- var
-   iescalon, iposte: integer;
00 begin
-   // recuperamos los valores de Potencia de cada escalón de falla en
-   // cada poste.
-   for iescalon:= 0 to high( falla_profundidad ) do
-     for iposte:= 0 to globs.NPostes-1 do
-       fallas[iescalon][iposte]:= s.xval( ivar+iescalon*globs.NPostes+iposte );
-   end;
-

```

#### 3.1.3.6.1 Modelo de 3 curvas.

En este modelo, la se dan tres curvas horarias, una correspondiente a días hábiles otra a días semi-feriados y otra a días feriados. Las tres curvas se especifican como FICHAS DE PARAMETROS DINAMICOS. En todo paso de tiempo, las curvas válidas son las correspondiente a la interpolación lineal entre la ficha válida anterior y posterior al instante de tiempo considerado.

#### 3.1.3.6.2 Modelo detallado.

Este modelo permite especificar hora a hora en forma detallada la demanda. La forma de hacerlo es leer un archivo binario que tiene la fecha de inicio y fin y los datos horarios de la potencia.

#### 3.1.3.7 Modelo de Central Térmica con tratamiento de Mínimos Técnicos

La central puede generar entre una potencia mínima  $P_{\min}$  y un apotencia máxima  $P_{\max}$ . El costo de producción es  $co + cv \cdot (P - P_{\min})$  si la central se encuentra en operación y 0 (cero) si se encuentra apagada.

La función de costo está dada en la figura 3.5-1 por la recta definida por los puntos  $(P_{\min}, co)$  y  $(P_{\max}, co + cv \cdot (P_{\max} - P_{\min}))$  y el punto  $(0,0)$ . Esta función es no-convexa lo que complica la optimización del despacho y el planteo del problema de optimización.

Para resolver el problema agregamos una variable adicional que indica si la central se encuentra en operación o no. Llamaremos  $A$  a la variable que indica si la central está prendida o no.

$A=1$  significa que la central está en operación y por lo tanto vale que el costo es  $co + cv \cdot (P_{\max} - P_{\min})$  y

$A=0$  significa que la central está apagada y por lo tanto su costo de producción es CERO.

En el problema de optimización, la central agregará dos variables y una restricción adicional.

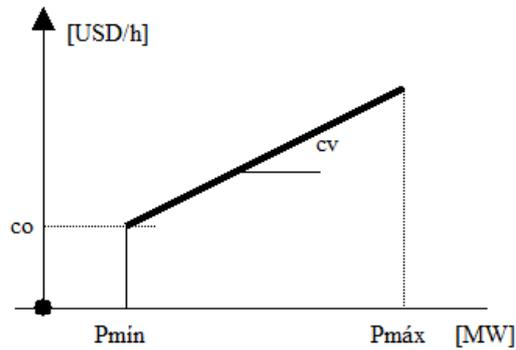


Fig. 3.5-1. Costo variable de central con mínimo técnico.

Como variables de optimización pondremos  $B = P - P_{\text{mín}}$  (esto es la potencia por encima del mínimo) y  $A$  (el indicador de prendido o apagado).

Los límites de estas variables son:

$$0 \leq B \leq P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}} \quad \text{y} \quad A \in [0,1]$$

La potencia generada la podemos expresar como:  $P = B + P_{\text{mín}} * A$

Cuando  $A=1$ ,  $P = B + P_{\text{mín}}$  y como  $B$  puede tomar cualquier valor entre 0 y  $P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}}$ ,  $P$  puede tomar cualquier valor entre  $P_{\text{mín}}$  y  $P_{\text{máx}}$ .

Cuando  $A=0$ , tendría que ser  $P = 0$ , para obligar esta situación agregamos una restricción que es:

$$B \leq (P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}}) * A$$

En el caso de optimización por postes, se debe considerar una variable  $B$  para cada poste y si la central es prendible y apagable por poste una variable  $A$  para cada poste. Si la central no es prendible y apagable por poste sino que se debe considerar prendida o apagada para todo el paso de tiempo utilizaremos solamente un valor de  $A$ .

Según el tipo de central podemos admitir el prendido y apagado por poste o por paso de tiempo. Por ejemplo, una turbina de ciclo abierto de gasoil puede ser prendida y apagada en cada poste de un paso de tiempo, mientras que un ciclo combinado con su correspondiente caldera de vapor puede prenderse y apagarse por paso de tiempo (semanal por ejemplo) y no por poste.

A continuación mostramos el pseudo-código para centrales que admiten ON-OFF por poste y las que solamente admiten ON-OFF por paso de tiempo.

### 3.1.3.7.1 Máquina con ON-OFF POR POSTE:

#### 3.1.3.7.1.1 Conteo de Variables y Restricciones

##### 3.1.3.7.1.1.1 Conteo de variables del optimizador (Reales y Enteras)

$\text{ivar} := \text{ivar} + \text{NPostes} * 2$

##### 3.1.3.7.1.1.2 Conteo de restricciones

$\text{ires} := \text{ires} + \text{NPostes};$

##### 3.1.3.7.1.1.3 Conteo de variables enteras

$\text{ivae} := \text{ivae} + \text{NPostes}$

### 3.1.3.7.1.2 *Cargando el Simplex*

ivar tiene el índice a la primer variable de la máquina en el conjunto total de variables  
ires tiene el índice a la primer restricción de la máquina en el conjunto total de  
restricciones.

inodo tiene el índice correspondiente a la primer restricción de balance de potencia del  
nodo al que está conectada la central.

#### 3.1.3.7.1.2.1 Cargado de los aportes de potencia al nodo en cada poste

inodo:= nodo.ires; // índice de la restricción del nodo al que se encuentra conectado.

```
for iposte:= 0 to NPostes-1 do
begin
    s.pon( inodo+iposte, ivar+iposte, 1 ); // coeficiente de la B[iposte]
    s.pon( inodo+iposte, ivar+NPostes+iposte, Pmin ) // coef A[iposte]
end;
```

#### 3.1.3.7.1.2.2 Cargamos en la función a maximizar (-costo)

```
for iposte:= 0 to NPostes -1 do
begin
    s.pon( spx.nf, ivar+iposte, -cv *DurPos[iposte]);
    s.pon( spx.nf, ivar+NPostes+iposte, -co *DurPos[iposte])
end
```

#### 3.1.3.7.1.2.3 Cargado de las restricciones auxiliares

```
for iposte:= 0 to NPostes -1 do
begin
    s.pon( ires+iposte, ivar+iposte, -1 ); // coef B[iposte]
    s.pon(ires+iposte, ivar+NPostes+iposte, PMax-PMin )
end;
```

#### 3.1.3.7.1.2.4 Cargando Restricciones de Caja y Declarando Enteras.

// Restricciones de caja de las B (Esto no es necesario pues las restricciones adicionales  
// obligan que estas se cumplan.

```
for iposte:= 0 to NPostes-1 do
    s.set_cota_sup ( ivar+iposte, PMax-PMin );
```

// Restricciones de caja de las A y las declaramos enteras

```
for iposte:= 0 to NPostes -1 do
    s.set_entera( ivae+iposte, ivar+NPostes+iposte , 1)
```

En el llamado a set\_entera, el primer parámetro es el número de variable entera, el  
segundo el número de variable de optimización que le corresponde a dicha variable  
entera (en el conjunto de todas las variables, enteras y no enteras) y el tercer parámetro  
es la cota superior de la variable entera. La cota inferior es siempre 0 (cero).

### 3.1.3.7.1.3 *Lectura de resultados*

Leemos el estado despachado o no en la variable vector A y las potencias medias  
despachadas en cada poste en el vector P.

```
for iposte:= 0 to NPostes -1 do
begin
    A[iposte]:= trunc( s.xval(ivar+NPostes+iposte ) +0.2 );
    P[iposte]:= s.xval( ivar+iposte ) + A[iposte]* Pmin;
end;
```

### 3.1.3.7.2 Máquina con ON-OFF POR PASO de tiempo:

#### 3.1.3.7.2.1 *Conteo de Variables y Restricciones*

##### 3.1.3.7.2.1.1 Conteo de variables del optimizador (Reales y Enteras)

```
ivar:= ivar+ NPostes+1;
```

##### 3.1.3.7.2.1.2 Conteo de restricciones

```
ires:= ires+ NPostes;
```

##### 3.1.3.7.2.1.3 Conteo de variables enteras

```
ivae:= ivae+ 1;
```

#### 3.1.3.7.2.2 *Cargando el Simplex*

ivar tiene el índice a la primer variable de la máquina en el conjunto total de variables  
ires tiene el índice a la primer restricción de la máquina en el conjunto total de restricciones.

inodo tiene el índice correspondiente a la primer restricción de balance de potencia del nodo al que está conectada la central.

##### 3.1.3.7.2.2.1 Cargado de los aportes de potencia al nodo en cada poste

```
inodores:= nodo.ires; // índice de la restricción del nodo al que se encuentra conectado.
```

```
for iposte:= 0 to NPostes-1 do
```

```
begin
```

```
  s.pon( inodores+iposte, ivar+iposte, 1 ); // coeficiente de la B[iposte]
```

```
  s.pon( inodores+iposte, ivar+NPostes, Pmin ) // coef A
```

```
end;
```

##### 3.1.3.7.2.2.2 Cargamos en la función a maximizar (-costo)

```
for iposte:= 0 to NPostes -1 do
```

```
  s.pon( spx.nf, ivar+iposte, -cv * DurPos[iposte] );
```

```
s.pon( spx.nf, ivar+NPostes+iposte, -co*HorasDelPaso )
```

##### 3.1.3.7.2.2.3 Cargado de las restricciones auxiliares

```
for iposte:= 0 to NPostes -1 do
```

```
begin
```

```
  s.pon( ires+iposte, ivar+iposte, -1 ); // coef B[iposte]
```

```
  s.pon( ires+iposte, ivar+NPostes, PMax-PMin );
```

```
end;
```

##### 3.1.3.7.2.2.4 Cargando Restricciones de Caja y Declarando Enteras.

```
// Restricciones de caja de las B (Esto no es necesario pues las restricciones adicionales
```

```
// obligan que estas se cumplan.
```

```
for iposte:= 0 to NPostes-1 do
```

```
  s.set_cota_sup ( ivar+iposte, PMax-PMin );
```

```
// Restricciones de caja de las A y las declaramos enteras
```

```
s.set_entera( ivae, ivar+NPostes, 1 );
```

En el llamado a `set_entera`, el primer parámetro es el número de variable entera, el segundo el número de variable de optimización que le corresponde a dicha variable entera (en el conjunto de todas las variables, enteras y no enteras) y el tercer parámetro es la cota superior de la variable entera. La cota inferior es siempre 0 (cero).

### 3.1.3.7.2.3 Lectura de resultados

Leemos el estado despachado o no en la variable A y las potencias medias despachadas en cada poste en el vector P.

```
A:= trunc( s.xval( ivar+NPostes ) +0.2 );
for iposte:= 0 to NPostes -1 do
  P[iposte]:= s.xval( ivar+iposte ) + A * Pmin;
```

### 3.1.3.8 Modelo de ARCO.

Los arcos representan el sistema de transporte en forma simplificada. El arco une dos nodos en forma unidireccional. Para representar un corredor de transmisión entre dos nodos, hay que utilizar dos arcos, uno en cada sentido.

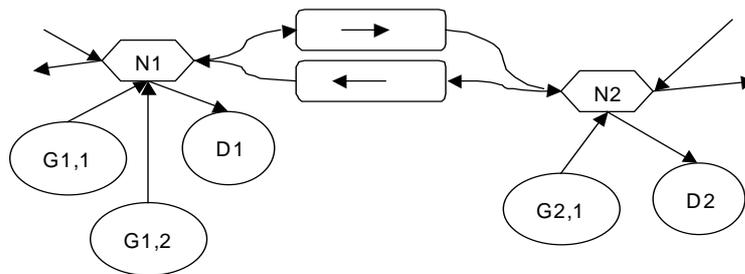


Figura Representación del sistema de transporte.

Un arco lo vamos a suponer con una POTENCIA MÁXIMA (PM) y un rendimiento (r). Así, si el NODO ORIGEN inyecta una potencia P en el arco y éste inyectará una potencia  $r \cdot P$  en el NODO DESTINO.

Esta representación del sistema de transporte es una simplificación que intenta captar los límites de transferencia entre sub-sistemas y las pérdidas asociadas. No quedan reflejadas otras características como pueden ser el control de tensiones del sistema. Los parámetros de los arcos que representan las interconexiones entre sistemas deberán ser calculados de forma de reflejar lo mejor posible la situación del sistema. Si fuese necesario, los parámetros se podrían variar para cada poste de forma de reflejar la configuración del sistema según el nivel de la demanda.

Para la carga del Simplex, el ARCO tiene:

- Variables de control: NPostes. Correspondiendo a las potencias transmitidas en cada poste.
- Restricciones: 0. Las únicas restricciones son las de rango de las variables de control por lo que no hay necesidad de incluirlas como restricciones adicionales.

Como solución del despacho tenemos:

- Valor de las potencias inyectadas desde el nodo Origen.  
Costos marginal de congestión expresado en USD/MW para cada poste. Este valor es el multiplicador de Lagrange de la restricción de rango de la potencia por el arco. Si la potencia es igual al máximo permitido, este valor corresponde al beneficio para el sistema de aumentar la potencia en 1MW

### 3.1.3.8.1 Máquina con Costos de Arranque y Parada.

Para poner en operación y acoplar una central al sistema es necesario realizar una serie de procedimientos (encender y calentar una caldera de vapor por ejemplo) que implica incurrir en un COSTO DE ARRANQUE de la central. Para apagar la central también puede ser necesario realizar una serie de procedimientos especiales a los que les asociamos un COSTO DE PARADA. Los costos de arranque y parada tienen en consideración además de costos directos del arranque o de la parada, costos indirectos asociados a la disminución de la vida útil de las diferentes partes de la central.

Para considerar los costos de arranque y parada debemos considerar el estado de la máquina como una variable que forma parte del estado del sistema y por lo tanto aumenta la dimensión de la función de Costo Futuro del sistema.

El modelo de central con costo de arranque y parada, supone que la central es del tipo que admite ON/OFF por PASO y no por POSTE, dado que decir que está prendida en un POSTE no significa que en el tiempo haya permanecido prendida en forma continua esa cantidad de horas.

Sea  $CF(x, k)$  la función de Costo Futuro al final del paso de tiempo  $(tk)$ . Con  $(x)$  representamos el estado del sistema. En una determinada posición del vector  $x$  está la variable de estado que representa el estado Prendido (1) o Apagado (0) de la máquina.

Primero vamos a desarrollar el modelo para una central compuesta de una única máquina. En ese caso la variable de acople vale 0 si la máquina está parada y vale 1 si máquina en producción.

En el paso de tiempo en que la variable pase de 0 a 1 diremos que se produce el ARRANQUE de la máquina y le cargaremos el COSTO DE ARRANQUE al paso. En los pasos de tiempo de simulación en que la variable de acople pase de 1 a 0 diremos que se produce la PARADA de la máquina y cargaremos el COSTO DE PARADA.

Si al inicio del paso de tiempo,  $A=0$ , la máquina está apagada y tenemos la opción de NO PRENDERLA, con lo cual al final del paso de tiempo continuamos con  $A=0$  o de prenderla lo que significa pasar  $A$  a 1.

El modelo para la máquina apagada al inicio del paso de tiempo se puede escribir como:

$$p = P - P_{min} \quad (\text{Potencia por encima del mínimo técnico})$$

$$P = P_{min} \cdot A + p \quad (\text{Potencia total despachada})$$

$$p \leq P = A \cdot (P_{max} - P_{min}) \quad (\text{Restricción de generación por el estado})$$

$$\text{Costo} = (cv \cdot p + co \cdot A) \cdot \Delta T + cArranque \cdot A + (CF(x_k + 1_A, k) - CF(x_k, k)) \cdot A$$

El costo de arranque aparece multiplicado por  $A$  mostrando que ese costo se aplica solamente si decidimos prender la central.

El término  $(CF(x_k + 1_A, k) - CF(x_k, k)) \cdot A$  refleja la diferencia en la función de Costo Futuro que se ocasiona por el cambio de estado de la central al pasar de  $A=0$  a  $A=1$ .

El vector  $1_A$  es de igual dimensión que el  $(x)$  y tienen todos sus componentes 0 salvo en la posición de la variable de estado que representa el estado de la máquina en la que tiene un 1.

Si la central se encuentra encendida al inicio del paso de tiempo, lo que cambiamos en el modelo es el valor del costo por lo siguiente:

$$\text{Costo} = (cv \cdot p + co \cdot A) \cdot \Delta T + cParada \cdot (1 - A) + (CF(x_k - 1_A, k) - CF(x_k, k)) \cdot (1 - A)$$

Si la central está encendida y continúa encendida,  $(1-A)$  vale cero y el costo del paso se reduce a  $Costo = (cv \cdot p + co \cdot A) \cdot \Delta T$

Si decidimos apagar la central, debemos pagar el costo de parada.

El término  $(CF(x_k - 1_A, k) - CF(x_k, k)) \cdot (1 - A)$  refleja la diferencia en la función de Costo Futuro que se ocasiona por el cambio de estado de la central al pasar de  $A=1$  a  $A=0$ .

Dependiendo de la dimensión de la central respecto del sistema en su conjunto y del costo de arranque y de parada en comparación con el costo de suministro de la demanda en un paso de tiempo los términos que involucran la diferencia de la función de Costo Futuro serán más o menos relevantes y en algunas circunstancias podrán despreciarse. Intuitivamente, despreciar estos términos significa que el costo de arrancar o parar la máquina se cubren con la reducción de costos de operación obtenidas en el mismo paso de tiempo.

### **3.1.4 Tratamiento de los procesos estocásticos.**

La principal fuente de incertidumbre en el sistema uruguayo lo constituyen los aportes hidráulicos a las represas. Para considerar estos procesos estocásticos se utilizó la metodología desarrollada por Chaer y Zeballos en el 2005 y que puede leerse de la publicación [2]:  
<http://ie.fing.edu.uy/publicaciones/2005/CZ05/CZ05.pdf>

### **3.1.5 Programa ejemplo verificación de resultados de los hitos 1 a 6.**

El software SimSEE se encuentra disponible en la web <http://ie.fing.edu.uy/simsee>  
Al instalarse se instala también un juego de datos con el sistema uruguayo en el que hay generadores térmicos, centrales hidráulicas y interconexiones con Brasil y Argentina.

### 3.1.6 Programación dinámica estocástica.

En la implementación de SimSEE se optó por la utilización del algoritmo de optimización conocido como “Programación Dinámica Estocástica” o SDP (por sus siglas en inglés). SimSEE utiliza este algoritmo para valorizar los recursos del sistema (agua en los lagos, por ej.) y poder así realizar el despacho de las máquinas del sistema.

El detalle de la utilización en SimSEE de la SDP está documentado en la tesis de maestría del Ing. Chaer, documento que está disponible en la dirección:

<http://iie.fing.edu.uy/simsee/tesischaer.pdf>

## 3.2 Difusión de resultados.

Esta etapa engloba los objetivos 7 y 8 del proyecto (ver sec. 2.9).

### 3.2.1 Sitio web de SimSEE.

De acuerdo a lo previsto, para la difusión de los resultados del proyecto se creó un sitio web (<http://iie.fing.edu.uy/simsee>) en el que se encuentra disponible el simulador SimSEE en forma gratuita.

### 3.2.2 Se escribió el “Manual de Usuario”

El Manual de Usuario puede ser consultado en línea en la dirección:

<http://iie.fing.edu.uy/simsee/simsee/ayuda/editor-manualdeusuario.htm>

### 3.2.3 Curso “Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica”.

Se creó el curso y se dictó en el 2007 y en el 2008 y está previsto dictarlo nuevamente del 15 de mayo al 15 de abril del 2009.

La documentación del curso (edición 2008) puede verse en línea en la dirección:

<http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/simenerg/curso2008/>

El folleto informativo del curso para la edición 2009 es:

# Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica

## Curso de Actualización Profesional 2009 Del 15 de abril al 15 de mayo del 2009

**Profesor de la asignatura:** Ing. Ruben Chaer, Prof. Adjunto, IIE

**Instituto ó Unidad:** Instituto de Ingeniería Eléctrica

**Departamento ó Área:** Potencia y Energía

**INTRODUCCIÓN A LA EDICIÓN 2009 DEL CURSO.**

La simulación de un sistema de energía eléctrica es una herramienta útil para tareas tales como:

- Optimización del uso de los recursos de generación.
- Cálculo de precio spot.
- Cálculo de ingresos de un generador independiente.
- Evaluación de los ingresos de proyectos de generación con energías alternativas.
- Cálculo de precios de equilibrio en contratos de compra venta de energía.
- Manejo de la incertidumbre hidrológica.
- Evaluación del impacto de la volatilidad del precio del petróleo sobre los costos de generación.
- Evaluación de la influencia de los Costos asignados de Falla sobre el uso de los recursos del sistema.
- Cálculo de la Potencia Firme Hidráulica y de la potencia de respaldo necesaria en el sistema.

*Agradecimientos de la edición 2007 y 2008 del curso:*

- A los estudiantes de la edición 2007 y 2008 del curso, gracias al trabajo de los cuales, se ha mejorado sustancialmente la herramienta de simulación utilizada. Las presentaciones de los trabajos finales de dichos estudiantes pueden verse en las páginas web:  
(2007) <http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/simenerg/monografias2007/> y  
(2008) <http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/simenerg/monografias2008/>

## **CONTENIDO DEL CURSO**

### **Módulo 1: Generalidades**

- Introducción a la simulación de sistemas dinámicos.
- Modelado y Simulación Técnicas de Modelado Orientada por los Objetos.
- Simulación y Política de Operación de los Embalses.

### **Módulo 2: Descripción del sistema.**

- Descripción del Sistema y Mercado Eléctrico.
- Sistema Físico. Generación, Transmisión y Distribución.
- Despacho de ENERGÍA.
- Simulación y Política de Operación de los Embalses.
- Disponibilidad de POTENCIA. COSTOS DE FALLA.
- Interconexiones Internacionales.
- Mercados de OCASION y CONTRATOS

### **Módulo 3: Técnicas de modelado y simulación.**

- Simuladores y Despacho Óptimo.
- Ejemplos de estudios. Ejercicios.

### **Módulo 4: Detalles de la implementación software.**

- Modelo de central térmica sencilla.
- Modelo de central térmica con mínimo técnico.
- Modelo de central térmica con costos de arranque parada.
- Modelo de central hidráulica con embalse.
- Modelo de parque eólico.

**Módulo 5: Modelado de series aleatorias. Algoritmos de optimización.**

**Módulo 6: Aspectos específicos del sistema uruguayo.**

- Cálculo del precio spot.
  - Cálculo de la potencia firme del sistema. Planificación de la expansión de la generación.
  - Influencia del Costo de Falla en el uso del embalse de Terra.
  - Impacto de los precios del petróleo sobre los costos de generación.
- 

**DATOS ADICIONALES DEL CURSO**

**Fecha de inicio y finalización:** 15 de abril al 15 de mayo del 2009.

**Horario y Salón:** Miercoles y Viernes de 8 a 10 hrs, Laboratorio de Software del IIE

**Horas Presenciales:** 30

**Arancel:** \$5400

**Público objetivo y Cupos:** mínimo 4, máximo 12 (por orden de inscripción)

**Forma de evaluación:** Monografía con estudio de caso. Implica armar un sistema y simularlo para obtener resultados y hacer un análisis de los mismos. Todos los trabajos que se realicen serán presentados en un seminario de clausura del curso en fecha a convenir entre los implicados.

**Software de simulación:** El software de simulación utilizado en el curso puede bajarse gratuitamente de <http://iie.fing.edu.uy/simsee/simsee/index.html> .

---

**INFORMES:** [posgrado@fing.edu.uy](mailto:posgrado@fing.edu.uy)

**INSCRIPCIONES:** <http://www.fing.edu.uy/cursos/index.htm>

### 3.2.4 Publicaciones y presentaciones.

En diciembre del 2007 se presentó en el salón de actos del edificio “El Faro” de FING los resultados del proyecto junto con el anuncio de la realización de un convenio marco de cooperación entra ADME y FING para continuar mejorando y desarrollando el SimSEE. Las presentaciones realizadas por Gonzalo Casaravilla y Ruben Chaer en la ocasión están disponibles vía web en:

<http://iie.fing.edu.uy/simsee/Presentacion-gcp-SimSEE20071219.pdf>

y

<http://iie.fing.edu.uy/simsee/Presentacion-rch-SimSEE20071219.pdf>

respectivamente.

Como complemento a la difusión de resultados se realizaron una serie de publicaciones y presentaciones que se listan a continuación:

Autor	Título	Publicación	Fecha
Monzón-Chaer	Stability conditions for a Stochastic Dynamic Optimizer for optimal dispatch policies in power systems with hydroelectrical generation	IEEE T&D C&E 2008 Latin America	13-15 Augst08
Casaravilla-Alfaro-Chaer	Sintetizador de series de tiempo de radiación solar para simulador de instalaciones fotovoltaicas	solar_CIES2008	Jul08
Brandino-León-Perez	INFLUENCIA DEL COSTO DE FALLA EN LA OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO URUGUAYO	EPIM2008 <a href="http://iie.fing.edu.uy/epim2008/">http://iie.fing.edu.uy/epim2008/</a>	Oct08
Chaer-Brandino	APROXIMACION AL MODELADO DE LOS APORTES HIDRAULICOS A LAS REPRESAS DE URUGUAY TENIENDO EN CUENTA LOS EFECTOS DEL FENÓMENO DENOMINADO ENSO	EPIM2008 <a href="http://iie.fing.edu.uy/epim2008/">http://iie.fing.edu.uy/epim2008/</a>	Oct08
Alfaro-Chaer	NetTopos, una plataforma de cálculo distribuido diseñada para el Simulador de Sistemas de Energía Eléctrica SimSEE	EPIM2008 <a href="http://iie.fing.edu.uy/epim2008/">http://iie.fing.edu.uy/epim2008/</a>	Oct08
Ruben Chaer, Rafael Terra, Alvaro Díaz, Alvaro Brandino	Aproximación al modelado de los aportes hidráulicos de las represas del Uruguay teniendo en cuenta el índice Niño 3.4.	Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 08. Montevideo, Uruguay., page 52--57 - 16-17 oct. 2008	Oct08

Parte de la difusión de resultados fue la realización de una tesis de maestría “Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica” realizada por el Ing. Ruben Chaer.

El documento está disponible en la dirección: <http://iie.fing.edu.uy/simsee/tesischaer.pdf>

## 4 Conclusiones y expectativas.

El proyecto fue ejecutado en tiempo y forma siendo el resultado plenamente satisfactorio a juicio de los participantes del mismo.

La herramienta SimSEE está siendo utilizada en ADME para el seguimiento de la programación del sistema realizada por UTE y ha sido utilizada con éxito para el análisis y calibración de parámetros de la herramienta actualmente en uso por UTE.

Uno de los puntos más importantes en la optimización de los recursos del país es el modelado que se tenga de los procesos estocásticos asociados a los aportes hidráulicos a las represas. El enfoque adoptado en SimSEE se considera una mejora respecto a lo existente, pero también se considera que puede y debe mejorarse. Para dar una ponderación de la importancia de este tema, se hace notar que el gasto en generación (combustible + importaciones) previsto para el 2008 era de 800MUSD en valor esperado pudiendo variar entre 400 y 1200 según la suerte que se tenga con el régimen de lluvias del año y con la disponibilidad de las centrales térmicas. Como se aprecia de estos números, saber un poco más de los procesos aleatorios asociados al clima, sin duda permitirá bajar la incertidumbre en la previsión financiera del sector. Un primer trabajo [3] fue realizado con expertos en el fenómeno ENOS usando SimSEE y estamos convencidos que hay que invertir en mejorar los pronósticos climáticos y su inclusión en las herramientas de planificación del país.

Otra línea de trabajo a continuar es la de la distribución del cálculo. Actualmente tenemos una primer versión del SimSEE que funciona en forma distribuida y durante el 2009 la pondremos en funcionamiento en el cluster que está adquiriendo FING. Esta posibilidad es importante pues permitirá modelar el detalle del encendido y apagado de todas las térmicas del sistema. Por razones de tiempo de cálculo en la actualidad se considera solamente el costo de prendido/apagado de las térmicas más importantes.

## 5 Referencias.

- [1] [SIMENERG: A novel tool for designing autonomous electricity systems](#)  
[Ruben Chaer](#), [Raúl Zeballos](#), Wadaed Uurbey, [Gonzalo Casaravilla](#)  
 European Community Wind Energy Conference and Exhibitions, Lubeck-Travemunde, Alemania - 8-12 mar 1993
- [2] [SimEnerg - Modelo Simplificado de Central con Embalse para análisis de los diferentes aspectos relevantes en la determinación de la política de operación de la central](#)  
[Ruben Chaer](#), [Raúl Zeballos](#)  
 Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 05. Montevideo, Uruguay. - 23-24 nov 2005
- [3] [Aproximación al modelado de los aportes hidráulicos de las represas del Uruguay teniendo en cuenta el índice Niño 3.4.](#)  
[Ruben Chaer](#), Rafael Terra, Alvaro Díaz, Alvaro Brandino  
 Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 08. Montevideo, Uruguay., page 52--57 - 16-17 oct. 2008