

VALIDACION DE SIMULACIONES INTERACTIVAS CON SIMEDIF Y ECOTECT, A PARTIR DE AUDITORIAS ENERGETICAS DE UN EDIFICIO ESCOLAR DE LA CIUDAD DE RESISTENCIA.**M.L. Boutet**¹; **A.L. Hernández**²; **G.J. Jacobo**³

Cátedra Estructuras II. Área de la Tecnología y la Producción. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
Universidad Nacional del Nordeste (U.N.N.E.) – Av. Las Heras 727 – 3500 Resistencia, Chaco /
Tel: +54 3722 425573/ e-mail: lauraboutet@yahoo.com.ar / gjjacobo@arq.unne.edu.ar
Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) – CONICET
Universidad Nacional de Salta (UNSa.), Avda. Bolivia N° 5.150, CP. 4400, Salta Capital
Tel. 0387-4255424 / Fax 0387-4255389 / e-mail: alejoher65@gmail.com

Recibido: 07/08/12; Aceptado: 02/10/12

RESUMEN: En este trabajo se presenta la validación de simulaciones realizadas con los programas informáticos SIMEDIF y ECOTECT, a partir de los resultados y análisis comparativo de auditorías energéticas efectuadas durante períodos de fines de verano y otoño del año 2011, en el Jardín Materno Infantil N° 33 “Niño de Yapeyú” de la ciudad de Resistencia, Chaco. Se exponen las limitaciones del método de cálculo de ECOTECT, que fueron solucionadas mediante la aplicación de factores correctivos, en una metodología de trabajo interactiva entre ambas herramientas informáticas. El razonable ajuste entre los datos medidos y simulados, mostró la validez de los modelos físicos realizados, siendo ECOTECT más apropiado para el análisis de la disponibilidad local del recurso solar y su influencia en las condiciones de confort higrotérmico, mientras que SIMEDIF, permite un ajustado análisis térmico y de energía auxiliar, con resultados rápidos y acordes a la realidad.

Palabras clave: Arquitectura Escolar, Radiación Solar, Simulación Dinámica

INTRODUCCIÓN

En el año 2011 se presentaron los resultados y análisis comparativo de cuatro auditorías energéticas de temperatura ambiente, humedad relativa e iluminancia, efectuadas en dos edificios escolares de Nivel Inicial, de la ciudad de Resistencia, Chaco, el Jardín Materno Infantil de la UNNE (1950) y el Jardín Materno Infantil N°33 “Niño de Yapeyú” (2007). La experiencia que abarcó períodos estivales y otoñales, con monitoreos de extensión variable y condiciones de uso discontinuo, posibilitó determinar patrones de comportamiento de los usuarios, a través de encuestas y observaciones in situ. En un diagnóstico global, se verificó que independientemente de la tecnología constructiva, los espacios interiores son susceptibles de sobrecalentamiento incluso en días frescos de otoño, por el ingreso de irradiación solar directa a través de las aberturas orientadas hacia el Noreste y Noroeste, a lo que se suman problemas de deslumbramientos sobre el área de trabajo y el consecuente consumo energético para climatización e iluminación artificial.

Con esta base de estudios experimentales, posteriormente se realizaron modelos teóricos mediante simulación dinámica con los programas informáticos SIMEDIF y ECOTECT, siendo objetivos del presente trabajo: a) Validar las simulaciones a partir de las auditorías energéticas de temperatura efectuadas; b) Realizar un estudio comparativo de ambos programas destacando sus ventajas y desventajas; c) Calibrar los programas de simulación en uso y determinar su grado de ajuste a fin de evaluar períodos no medidos y orientar propuestas de diseño optimizado.

Para ello, se tomó como referencia el estudio realizado en el Jardín N° 33, por tratarse de un prototipo ejecutado a través del Programa Nacional 700 Escuelas (Ministerio de Educación, Cultura y Tecnología de la Provincia del Chaco), de implementación masiva en la actualidad en todo el territorio provincial. En los dos últimos años, de acuerdo a los datos proporcionados por la Empresa Facturadora Provincial (SECHEEP), el Jardín presentó el máximo consumo eléctrico en abril (pleno otoño) con valores de 3013 kWh en 2010 y 4024 kWh en 2011.

Los monitoreos efectuados en el Jardín N° 33, cuya descripción detallada figura en el trabajo de Boutet et al. (2011), abarcaron los períodos del 14/03 al 21/03/2011 y del 16/05 al 03/06/2011. Durante el primer período se utilizó un multímetro digital y las mediciones se realizaron en forma manual en tres rangos horarios, mientras que en el segundo período, se efectuó el registro automático de temperaturas mediante instrumental de adquisición automático perteneciente al Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables (GIDER) del Dpto. de Termodinámica, Fac. de Ingeniería, UNNE.

Para las simulaciones se utilizaron los programas informáticos: a) SIMEDIF (<http://inenco.unsa.edu.ar/~seflores/index.html>) y b) ECOTECT v5.20 (Marsh A. J., 2003) y su actualización Demo (Autodesk, 2011), en una metodología de modelización interactiva, haciendo uso de las potencialidades de cada uno. Como primer paso, se procedió a obtener la descripción física del edificio, validando el modelo mediante los datos medidos en mayo de 2011, con una frecuencia horaria. Una vez

¹ Arq. Esp., Prof. Univ., Becaria Doctoral CONICET – UNNE (Doctorado en Ciencias. Área Energías Renovables, UNSa.)

² Dr. Lic. en Física, Prof. Univ., Investigador INENCO – UNSa. – CONICET; Director de Tesis.

³ MSc. M.Ing. Arq., Prof. Univ., Investigador FAU – UNNE; Co-director de Tesis.

contrastados los resultados medidos y simulados y ajustado el modelo, se generó la simulación para el mes de marzo, validándolo con los datos medidos en los rangos horarios registrados manualmente, obteniendo así la evolución de temperatura de frecuencia horaria para un análisis más detallado.

En este trabajo se profundiza además en las limitaciones halladas durante la aplicación del programa Ecotect, a partir de investigaciones anteriores (Boutet et al. 2010, 2011; Alfás et al. 2010, 2011; Di Bernardo et al. 2011a, 2011b) exponiendo los hallazgos y recomendaciones de especialistas en la materia, Hensen y Radošević (2004) y Giménez Molina (2011), que permitieron un mejor ajuste de las simulaciones. Por último, se determinó el grado de fiabilidad de cada herramienta informática, según su utilidad para análisis térmico y/o solar.

METODOLOGIA DE MODELIZACION CON SIMEDIF

SIMEDIF es un programa para el diseño y simulación del comportamiento térmico de edificios (Flores Larsen y Lesino, 2001), desarrollado en el INENCO (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional). Ha sido validado y mejorado con numerosas experiencias y ya tiene muchos años de uso por parte de varios grupos de investigación del país que mostraron su potencialidad. Permite obtener la temperatura horaria de cada uno de los locales del edificio, considerados como zonas isotermas (hasta 50), frente a determinadas variaciones climáticas, con la posibilidad de introducir ganancias internas de calor hora a hora (disipación metabólica, climatización auxiliar etc.), aspecto altamente favorable para simulaciones en condiciones reales de uso. Su método de cálculo consiste en un esquema de diferencias finitas explícito avanzando a intervalos de tiempo Δt , donde Δt es un submúltiplo de una hora y cuyo valor puede fijarse durante el ingreso de datos. Una gran ventaja de SIMEDIF es que permite realizar estudios en estado estacionario y transitorio, según las condiciones climáticas introducidas sean periódicas o no. Bajo estas consideraciones, la metodología de simulación del caso de estudio consistió en lo siguiente:

1) **Emplazamiento espacial y temporal del edificio.** Se estableció la localización geográfica del edificio y los días de simulación abarcando cada período de monitoreo.

2) **Número de locales a simular y características geométricas.** Se identificaron las zonas isotermas, en este caso ocho aulas, núcleos de servicio y cámaras de aire de los techos, dispuestas en dos alas vinculadas por galerías semicubiertas (Fig. 1), que se simularon independientemente a fin de agilizar el tiempo de procesamiento, teniendo en cuenta las sombras arrojadas. Se describieron los distintos elementos que componen el edificio: paredes con masa (muros y pisos), tabiques, ventanas y puertas con su horario de apertura y cierre durante el período de ocupación.



Fig.1. Izq. Foto Fachada NE Aula Naranja. Der. Planta con zonas térmicas medidas y simuladas.

3) **Ingreso de los índices de radiación, áreas de radiación y coeficientes de absorción.** Un índice de radiación caracteriza a un conjunto de planos paralelos entre sí que reciben la misma radiación solar con los mismos ángulos de incidencia. Los índices de radiación se aplicaron sobre paredes y tabiques (ambas caras), por lo que fue necesario analizar estos elementos según su orientación. En ello contribuyó el uso interactivo del programa ECOTECT, que permitió obtener los porcentajes de sombra y superficies expuestas a la radiación solar. Se aplicaron los coeficientes de absorción solar a partir de las tablas de Incropera y DeWitt (1999).

4) **Coefficientes conductivos y convectivos.** En este punto se ha puesto mucho cuidado, pues tras sucesivas simulaciones, se comprobó que estos ejercen una gran influencia en la variación de los resultados. Para las ventanas, el coeficiente conductivo puede desdoblarse en dos: uno diurno y otro nocturno. En los análisis sin protección solar, se utilizó una transmitancia térmica de $5.8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ y en los análisis con protección (cortinas internas), $2.4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Los valores de los coeficientes de transferencia por convección-radiación internos se obtuvieron de Duffie y Beckman (1991). Para cada superficie exterior se utiliza un coeficiente convectivo-radiativo medio, el cual se aplica al período completo. Dicho coeficiente se obtiene para cada caso, considerando la velocidad media de viento en el período y utilizando la expresión dimensional para superficies planas expuestas al viento (Duffie y Beckman, 1991):

$$h = 5.7 + 3.8v \quad (1)$$

La velocidad media de viento (\bar{v}) durante el período de monitoreo fue 2 m/s según datos medidos en el Estación Meteorológica del Aeropuerto de Resistencia, resultando un valor de 13.3 W/m²°C. Teniendo en cuenta la altura de dicha estación meteorológica (10 m sobre el nivel de suelo) en relación al edificio en estudio, se aplicó una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann (incremento de la velocidad del viento en altura según el tipo de terreno), de la forma:

$$v(h) = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

en la que: $v(h)$ es la velocidad del viento a la altura h ; v_{10} es la velocidad del viento a 10 m de altura y α es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y que para el sitio de implantación del edificio, zona urbana de densidad media, se estableció según tabla en 0.28. Los valores de los coeficientes convectivos externos resultantes fueron: en paredes, 9 W/m²°C, a un valor de h de 1.50 m y en techos 9.6 W/m²°C a un valor de h de 3.00 m. Se consideró además la variación de la velocidad del viento según su impacto sobre la tipología edilicia, de tal forma que los coeficientes asignados a cada pared fluctúan entre 6, 8 y 9 W/m²°C, según la dirección del viento. Se utilizó un coeficiente de transferencia convectiva menor para la superficie inferior del techo (3 W/m²°C) debido a que el aire caliente en contacto con la misma se encuentra estratificado y, en consecuencia, disminuye la transferencia de calor entre el aire del local y la superficie horizontal del cielorraso, siendo dicha transferencia menor que en el caso de las superficies verticales.

5) Ingreso de las capas de paredes. Las propiedades físicas de los materiales utilizados se obtuvieron a partir de tablas (Incropera y DeWitt, 1999) y fueron contrastados con las Normas técnicas IRAM.

6) Ingreso de los datos meteorológicos. Se ingresaron los datos de temperatura ambiente (°C) e irradiancia solar global (W/m²) medidos en la estación meteorológica del Dpto. de Termodinámica – FI-UNNE, durante el período de monitoreo.

7) Verificación y Cálculo. Se verificaron los datos introducidos y al ejecutar el cálculo, se incorporaron las ganancias de ocupación horarias para cada día. Para ello se consideró el aporte energético de 60 W/alumno y 80 W/adulto. Se despreciaron las ganancias de equipamientos eléctricos (audio, computadoras, luminarias, etc.) al ser en este caso mínimas. No se incorporó climatización auxiliar pues en otoño no se utilizó y en verano el uso fue variable y por lapsos cortos de tiempo, de acuerdo al relevamiento realizado in situ. En otra instancia, se realizó el cálculo de cargas auxiliares de climatización para todas las aulas en días característicos (20/05 y 16/03), estableciendo una temperatura de termostatación de 20°C, considerando dos situaciones: con y sin incidencia directa de radiación solar a través de las áreas vidriadas.

METODOLOGÍA DE MODELIZACIÓN CON ECOTECT

ECOTECT v5.20 (Marsh A. J., 2003), fue gestionado en la República Federal de Alemania, con licencia para uso académico hasta el año 2030 (Jacob G., FAU – UNNE), incorporándose su actualización 2011 versión Demo (Autodesk, 2011), que permitió un manejo más interactivo de las potencialidades del programa. Es un software desarrollado en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Australia Occidental, que ofrece una interfaz de modelización de dos y tres dimensiones, integrada con una amplia gama de funciones para análisis solar, térmico y lumínico, entre otras. Utiliza un método de cálculo simplificado basado en el Método de Admitancias del Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE Admittance Method), para determinar temperaturas internas y cargas térmicas, aplicando un algoritmo térmico flexible, sin restricciones en cuanto a la geometría del edificio o el número de zonas térmicas que pueden ser analizadas simultáneamente. Aplica las características conocidas de los materiales como la admitancia de un elemento constructivo y los factores de retraso térmico y atenuación térmica para definir la respuesta dinámica, es decir, en régimen transitorio. A continuación se describe la metodología de modelización:

1. Descripción geométrica del modelo. Se reprodujo gráficamente la distribución de las zonas térmicas definidas en Simedif, pero en este caso, del edificio completo. Se determinaron las zonas no térmicas, incluyendo obstáculos (muros medianeros, galerías, aleros, etc.) a modo de pantallas, que tienen incidencia directa en el porcentaje de sombra arrojada sobre el edificio.

2. Asignación de materiales. Se asignaron los materiales de cada una de las superficies componentes (paredes, techos, aberturas) y sus propiedades de acuerdo a sus capas constitutivas, coeficientes de conductividad térmica, densidad y calor específico. Dichos valores se verificaron y ajustaron, teniendo en cuenta las normativas vigentes IRAM de habitabilidad higrotérmica en planillas preconfiguradas Excel (Gonzalo, 2003) con las que se determinaron los coeficientes de transmitancia, el amortiguamiento y desfase térmico (no resueltos por Ecotect). Se ingresó además la reflectividad, emisividad y absorptancia de las superficies. Luego se obtuvieron distintas visualizaciones del modelo renderizado (Fig. 2).

3. Variables ambientales. Se editó un archivo de clima de la ciudad de Resistencia (27,45°Lat.Sur; 59,05°Long. Oeste; Alt. 52 msnm), para los períodos de monitoreo, a través de la subrutina de Ecotect, “The Weather Tool”. Se incorporaron los datos horarios medidos en la estación meteorológica del Dpto. de Termodinámica FI – UNNE: temperatura ambiente (°C), humedad relativa (%) e irradiancia solar global (W/m²) sobre superficie horizontal. Para la obtención de componentes de irradiancia solar directa y difusa requeridos por el software, se aplicó la correlación de Erbs (Duffie y Beckman, 1991, ec. 2.10.1, pág. 82) que da la fracción de radiación horaria difusa en función del índice de claridad horario. Este índice es el cociente entre la irradiancia solar global sobre superficie horizontal (medida) y la irradiancia solar horaria extraterrestre sobre el mismo plano. La irradiancia solar horaria extraterrestre se obtuvo con el programa GEOSOL (Hernández, 2003), calculando los valores para días de cielo claro mediante el método de Hottel (Duffie y Beckman, 1991). Los valores de velocidad de viento (km/h) corresponden a la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Resistencia, situado 5 km al suroeste del centro de la ciudad, disponibles en la página web <http://www.wunderground.com/>.

4. Estudio de Asoleamiento. Ecotect permitió analizar la trayectoria solar para los días de monitoreo durante las 24 horas, de manera rápida y sencilla y realizar la simulación de sombras, incluyendo una gama amplia de análisis como así también calcular la radiación solar incidente (Wh/m^2) en sus componentes total, directa y difusa, la fracción absorbida y transmitida a través de superficies vidriadas y las ganancias por radiación solar (W/m^2) - Fig. 2.

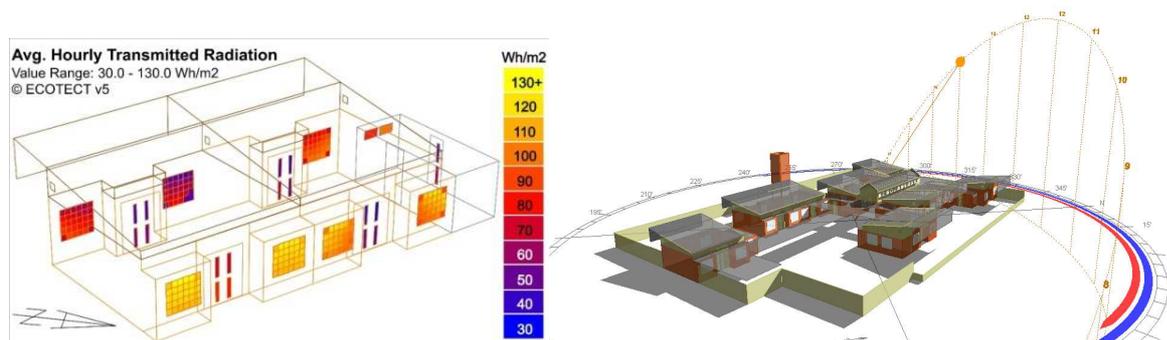


Figura 2: Izq. Gráfico de Radiación solar Incidente (Promedio) sobre áreas vidriadas del Módulo Aula Naranja. Der. Modelo renderizado con trayectoria solar, día de sol pleno, 15:00 h. Elaboración propia mediante Ecotect.

5. Análisis Térmico. Se establecieron las condiciones operativas para cada espacio analizado del edificio, en cuanto a perfiles de ocupación, número de usuarios por zona, tipo de vestimenta, nivel de actividad, sistemas de ventilación y tasa de infiltración. Se realizó un minucioso estudio de renovaciones de aire y ventilación natural, según el método ASHRAE (Yarke & Mermet, 2005), siendo éstos factores de gran incidencia en los resultados. Se definieron las cargas internas sensibles y latentes, estableciendo parámetros homogéneos, similares a los definidos en SIMEDIF. Por último, se estableció la banda de confort para la realidad climática del N.E.A., entre 19°C y 29°C (Jacobo, 2001). Se obtuvo la evolución horaria de temperaturas internas y la magnitud de las ganancias horarias de calor.

LIMITACIONES DEL ALGORITMO DE CÁLCULO TÉRMICO DE ECOTECT

A partir de simulaciones efectuadas por los autores, en el marco de trabajos de investigación precedentes (Boutet et al. 2010, 2011; Alfás et al. 2010, 2011; Di Bernardo et al. 2011a, 2011b), se han hallado discrepancias en los resultados de simulaciones en relación a mediciones in situ en edificios de vivienda y educativos, que limitarían su rendimiento para análisis detallados. En el caso de edificios educativos, se observaron diferencias significativas de hasta 5°C por debajo de las temperaturas medidas, en el horario de 21:00 a 8:00 h en días de clase normal y especialmente durante los días sin actividad (fines de semana, feriados, etc.), en concordancia con los horarios de registro de las mínimas temperaturas exteriores y durante los cuales los locales no presentan cargas térmicas por ocupación, luminarias, equipos y otros. Esto ha demostrado que las temperaturas interiores simuladas son muy dependientes de los aportes de energía auxiliares, lo cual indica que no hay suficiente ganancia de calor a través de la envolvente opaca y transparente. La respuesta de las temperaturas interiores a la variación de las cargas auxiliares indica además poca masa de acumulación. Otro factor que se estimó podía influir en ello, fue la infiltración de aire a través de ventanas y puertas.

Por estos motivos, se corrigieron los parámetros de la envolvente constructiva en sucesivas simulaciones, aumentando la densidad y las admitancias térmicas de los materiales masivos, a fin de proveer suficiente acumulación de calor, como así también se profundizó el estudio de renovaciones de aire y ventilación natural, mediante perfiles editados para cada local en forma horaria y diaria, variando el número de renovaciones de aire por hora según su uso. Las modificaciones introducidas permitieron mejorar el grado de ajuste de los resultados en el período de ocupación, con respecto a las mediciones efectuadas, aunque durante los períodos sin ocupación, las mejoras no fueron significativas. Esto motivó una nueva línea de investigación a fin de explicar si el desajuste se debía a errores del modelo geométrico ingresado o al propio método de cálculo que implementa Ecotect. A continuación se exponen los hallazgos más importantes:

Modelo geométrico. En el análisis térmico de edificios, Ecotect trabaja con modelos sencillos obviando detalles de molduras, rehundidos, etc., que puedan entorpecer la obtención de resultados. Se simplificaron los modelos geométricos, eliminando particiones internas, o suprimiendo detalles de parasoles o carpinterías, reproduciéndolos con elementos simples que representen obstáculos a la incidencia solar según correspondiera. Habiendo verificado que los modelos fueron adecuadamente definidos y que todos los parámetros introducidos fueron correctos (modelización, definición de condiciones internas de las zonas y caracterización de los cerramientos tanto opacos como transparentes), no se obtuvieron grandes mejoras en los resultados, por lo que se continuó investigando sobre el motor de cálculo del programa.

Motor de cálculo. El método de las admitancias es un muy buen método para el análisis del comportamiento térmico de edificios pero es muy complicado para implementarlo. Se basa en la resolución de la ecuación de difusión del calor en sólidos cuando está sometido a condiciones de contorno del tipo senoidal de frecuencia conocida como es aproximadamente la temperatura ambiente (Hernández, 2001). Calcular las admitancias térmicas no es un trabajo sencillo y se estima que éste no fue bien tratado en ECOTECT. Otra limitación del programa es no poder acumular la energía de días previos. Las simulaciones se realizan día por día y cuando se grafican los resultados de días corridos se observa que entre el último dato de un día y el primero del siguiente hay una diferencia importante. Recientes investigaciones de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (Giménez Molina, 2011) y de Hensen y M. Radošević (2004), exponen específicamente los errores de funcionamiento del programa, referidos a:

a. Caracterización de los cerramientos opacos y transparentes: Aunque Ecotect es capaz de calcular todos los datos salvo el desfase térmico y el factor de amortiguación, una vez que se le han introducido todas las capas que componen el cerramiento, se detectaron errores de algoritmo en su cálculo, especialmente con las cámaras de aire y los cerramientos vidriados, por su falta de exactitud. Por ello se recomienda introducir manualmente valores obtenidos mediante herramientas auxiliares como: Ecomat, desarrollado por Aurea Consulting Sustainable Architecture & Engineering, para el cálculo de los parámetros característicos de los cerramientos; Window v.5.217, para la caracterización óptica y térmica de cualquier composición de vidrio y Therm v.5.214, para el análisis de transferencia de calor en componentes de edificios tales como ventanas, paredes, cimentaciones, cubiertas, puertas y otros elementos donde los puentes térmicos pueden estar presentes. Estas herramientas pertenecen y fueron desarrolladas por el Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). En cuanto a los cerramientos vidriados, los principales errores del algoritmo de cálculo están en la entrada de los parámetros Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC) y Factor de Alternancia de la Ganancia Solar (Alt SG).

El **Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC)**, cuyo valor varía entre 0 y 1, representa la relativa cantidad de radiación solar que pasa a través de un material comparado con un vidrio flotado incoloro de 3 mm. A valores más cercanos a 0, más baja es su transmisión solar. De acuerdo a Giménez Molina (2011) y J.L.M. Hensen y M. Radošević (2004), este parámetro es utilizado de manera inusual en el método de admitancia de Ecotect pues su algoritmo para el cálculo de la ganancia solar no se ha aplicado de forma correcta.

El **Factor de Alternancia de la Ganancia Solar (Alt SG)** es la fracción de radiación oscilante que acaba transformándose en carga interna. Esto ocasiona, que dicho factor no sea constante durante todo el día, y que no haya un valor único representativo para todas las horas. Además, es función del tipo de construcción, Alt SG (Heavyweight) si es pesada, y Alt Solar Gain (Lightweight), si es ligera. En Ecotect se puede observar fácilmente que si se modifican los factores Alternating Solar Gain, las ganancias solares se modifican proporcionalmente, lo cual es incorrecto, dado que dichos factores sólo deberían afectar a la fracción oscilante de la carga solar. Por otro lado es un factor extremadamente difícil de obtener, no disponible en la literatura técnico-científica, Hensen y M. Radošević (2004).

b. Sub-enfriamiento por debajo de la temperatura exterior en la noche: El algoritmo de cálculo que emplea el programa presenta un error apreciable en el intercambio de calor con la bóveda celeste de noche (temperatura del cielo de noche mucho menor) y como consecuencia se produce una bajada drástica de la temperatura interior en horas nocturnas de hasta 20°C. Este error viene derivado del cálculo dividido en una parte continua y una parte alterna como se explicó anteriormente.

Por lo expuesto, se reconoce que esta herramienta no es adecuada para simulación térmica, aunque si está recomendada para propósitos de visualización (cálculo de sombras y radiación solar). La parte térmica tiene limitaciones muy grandes y sólo debería utilizarse de modo comparativo en las fases iniciales de diseño, para un precálculo y una aproximación cualitativa de los resultados. En relación a ello, hay excepciones. Los resultados que se obtienen son coherentes según el tipo de edificio bajo estudio. Si se trata de grandes edificios, los errores de algoritmo no se llegan a valorar. Se aprecian al realizar pequeñas simulaciones, en las que un mínimo cambio en los parámetros, hace cambiar enormemente la simulación. Hensen y Radošević (2004), señalan que la simulación es mucho más efectiva cuando se compara el comportamiento de diversas alternativas de diseño, más que cuando se usa para predecir el comportamiento de un solo diseño en sentido absoluto.

CONTRASTACION DE RESULTADOS MEDIDOS Y SIMULADOS

Debido a las deficiencias halladas en el desempeño de ECOTECH para análisis térmico, se utilizó en primer término el programa SIMEDIF a fin de calibrar los resultados arrojados por Ecotect y determinar su grado de ajuste. Para resolver el problema de sub-enfriamiento por debajo de la temperatura exterior en la noche, la solución hallada fue la incorporación de cargas ficticias en los perfiles de ocupación del modelo físico del Jardín N° 33 en ECOTECH: entre un 10 y un 20 % de 00:00 a 06:00 h y un 30 % de 14:00 a 00:00 h (lapsos sin ocupación). Se estableció un 70% de ocupación en horario de clase, pues el 100% produce un sobrecalentamiento irreal en los locales. Con estos valores el ajuste de resultados fue óptimo.

En primera instancia, las simulaciones se realizaron para el período de monitoreo de otoño efectuado mediante el adquisidor de datos en forma horaria del **16/05 al 03/06/11**. Para la contrastación de resultados se tomó el lapso comprendido entre el **18/05 y el 27/05**. Se realizaron distintos análisis comparativos de datos medidos (**curva azul línea continua**) y de datos simulados bajo los siguientes parámetros:

- **“Con ocupación y con protección solar”** en las ventanas, mediante cortinas internas que bloquean el ingreso de radiación solar directa, reproduciendo la situación real verificada durante el período de monitoreo, con **SIMEDIF (curva roja línea continua)** y con **ECOTECH (curva verde línea continua)**;
- **“Sin ocupación y con protección solar”** en las ventanas, con **SIMEDIF (curva violeta línea discontinua)**, a fin de comparar con la situación en condiciones reales de uso y estimar la incidencia del aporte calórico de los ocupantes;
- **“Con ocupación y sin protección solar”** en las ventanas, permitiendo la incidencia de radiación solar directa durante el día, pero cubriendo las ventanas durante la noche, con **SIMEDIF (curva roja línea discontinua)**, para analizar el aporte calórico que produciría la radiación solar directa.

Por razones de espacio en las Figs. 3 y 4 se muestran las curvas de temperaturas horarias sólo de dos aulas representativas, **Amarilla – Ala 1** (de 4 años con 22 alumnos) y **Naranja – Ala 2** (de 2 años con 36 alumnos). El aula Amarilla es de planta cuadrangular (6,90 m x 6,90 m) con una relación de área vidriada por área de fachada expuesta promedio de 46%. Mientras que el aula Naranja es de planta rectangular (14,10 m x 6,90 m) con una relación de área vidriada por área de fachada expuesta promedio de 42%. En todos los análisis comparativos realizados, como se observará a continuación, el error absoluto más grande es de 2 °C, pero el error promedio es inferior a 1 °C, verificándose un muy buen ajuste.

Contrastando las diferencias entre datos medidos y simulados con ambos programas de las ocho aulas, “con protección solar”, se ha obtenido un **mejor ajuste durante el período de ocupación del orden de 0,3 °C**, mientras que **en el período sin ocupación el nivel de acercamiento disminuye a 0,8 °C tanto con SIMEDIF como con ECOTECT**. El grado de ajuste promedio total es del orden de **0,5 °C para SIMEDIF**, encontrándose dentro de la desviación media de 0,5 a 1°C conseguida en otras investigaciones (Hernández et. al 1999), y de **0,6 °C para ECOTECT**, lo que demuestra que los porcentajes de cargas auxiliares ficticias introducidos en ECOTECT para calibrarlo, son adecuados.

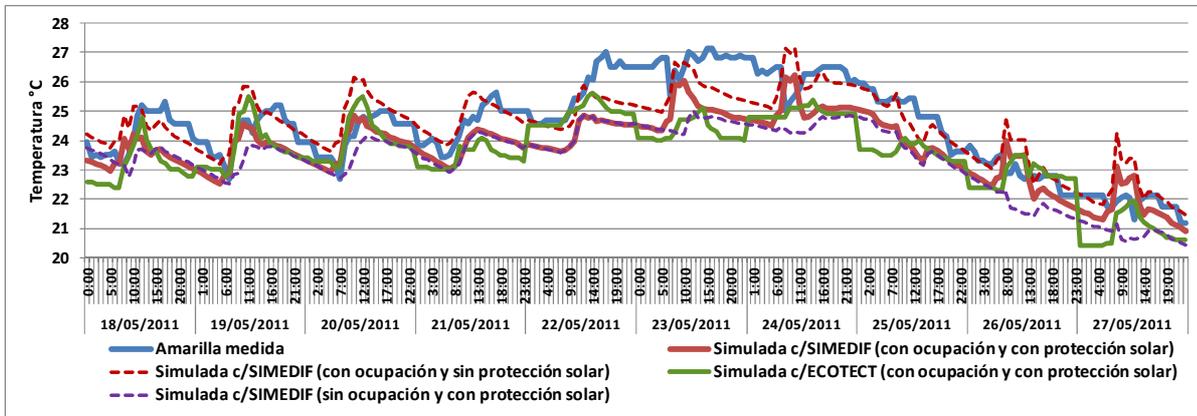


Fig. 3. Contrastación de temperaturas medidas y simuladas bajo diferentes parámetros. Aula Amarilla - ALA 1

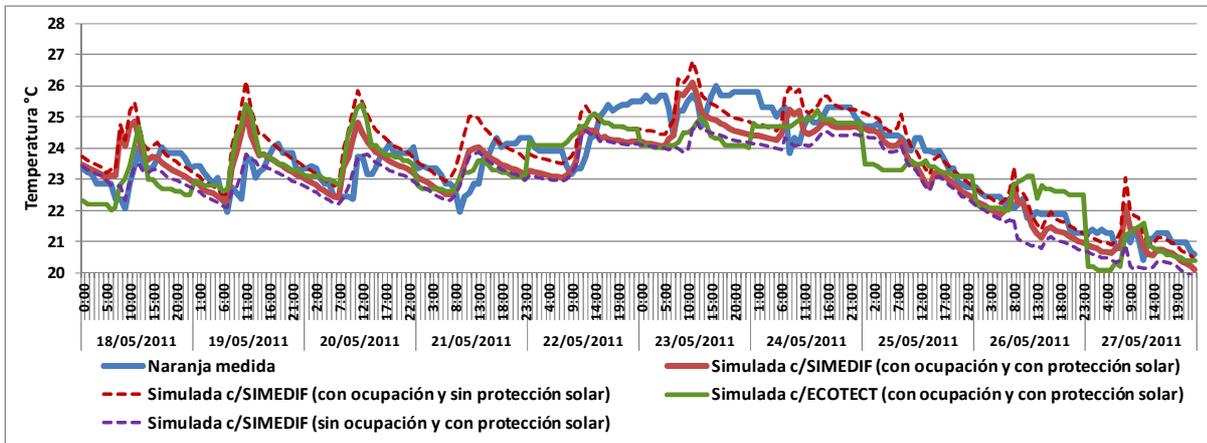


Fig. 4. Contrastación de temperaturas medidas y simuladas bajo diferentes parámetros. Aula Naranja - ALA 2

Obtenidas las simulaciones y ajustados los modelos físicos en SIMEDIF y ECOTECT durante el período otoñal, se simuló el período de fines de verano efectuado con el multímetro digital en tres rangos horarios durante días hábiles, entre el **14/03** y el **21/03/11** y se contrastaron los datos de todas las aulas como se ejemplifica en la Fig. 5. El ajuste hallado fue **del orden de 0.8 °C en el Ala 1** y **de 0.7 °C en el Ala 2**, por lo que fue posible utilizar el modelo físico realizado en SIMEDIF para la evaluación de frecuencia horaria, y contrastarlo posteriormente con el programa ECOTECT.

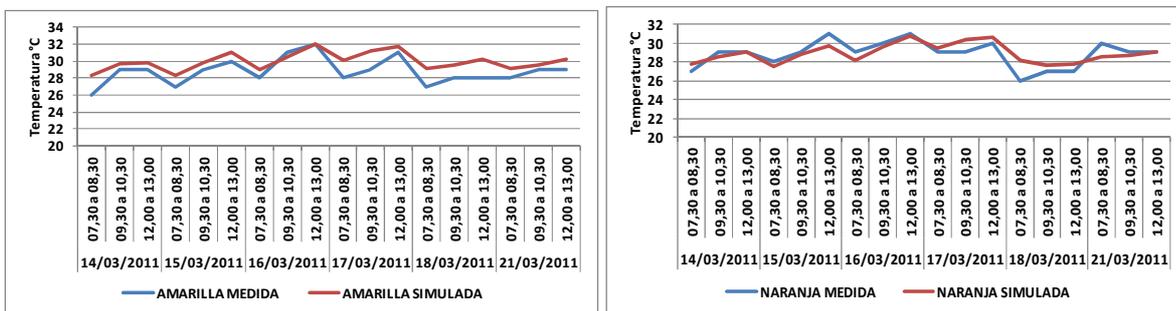


Fig. 5. Contrastación de temperaturas medidas y simuladas con SIMEDIF por rangos horarios.

De la misma manera que para el período otoñal, se efectuaron distintos análisis comparativos de datos simulados con ECOTECT y SIMEDIF bajo los parámetros antes mencionados. En las Figs. 6 y 7 se muestran las curvas de temperaturas horarias de las dos aulas más representativas Amarilla - Ala 1 y Naranja – Ala 2.

Contrastando las diferencias entre datos simulados de las ocho aulas, “con protección solar”, en el período de fines de verano con ambos programas, se ha obtenido un **ajuste promedio durante el período de ocupación del orden de 0,9 °C** (las temperaturas simuladas con ECOTECT son menores que las simuladas con SIMEDIF), que puede ser mejorado, mediante un estudio más detallado de la introducción de cargas internas. **En el período sin ocupación el nivel de**

acercamiento aumenta a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que demuestra que los porcentajes de cargas auxiliares ficticias introducidos en ECOTECT para calibrarlo son adecuados. El **ajuste promedio total es de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$** , de lo que se desprende que, con la ayuda de SIMEDIF, ECOTECT puede utilizarse como herramienta complementaria para el análisis térmico con la posibilidad de realizar estudios de radiación solar.

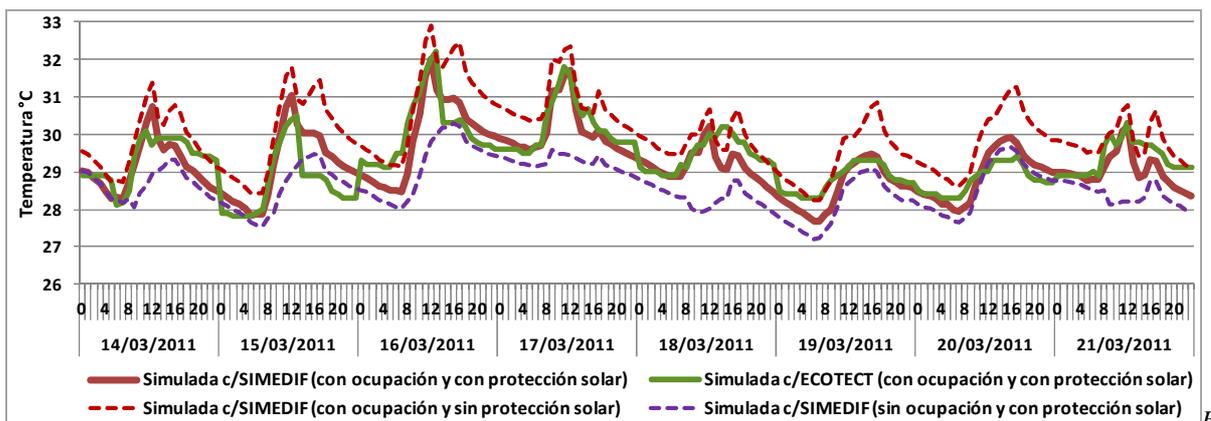


Fig. 6. Contrastación de temperaturas simuladas con SIMEDIF y ECOTECT. Aula Amarilla - ALA 1

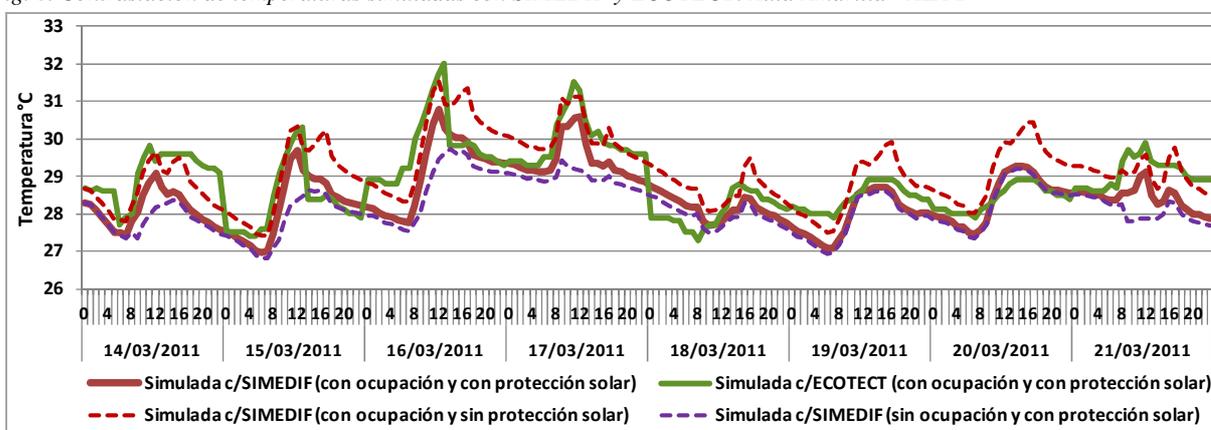


Fig. 7. Contrastación de temperaturas simuladas con SIMEDIF y ECOTECT. Aula Naranja - ALA 2

De los análisis comparativos de datos medidos y simulados bajo diferentes parámetros: con y sin ocupación; con y sin protección solar de las ventanas, en ambos períodos, se destaca que la incidencia directa de radiación solar a través del vidriado, produce un aumento de hasta 1°C de las temperaturas medias internas, llegando casi a 2°C en el día más caluroso de marzo, en las aulas más expuestas, a lo que se suma la persistencia de temperaturas elevadas durante la noche. Mientras que en mayo las temperaturas permanecen dentro del rango de confort, en marzo superan el límite máximo en las horas de mayor radiación solar. Por otra parte, la incorporación de cargas por ocupación, genera un aumento de hasta 2°C . Ello resulta en **3°C de incremento de la temperatura media**, considerando las peores condiciones.

Del análisis de **exposición solar** en sus distintas componentes mediante ECOTECT, se verificó en el aula Naranja un total transmitido de 1348 W/m^2 en el día 16/03 (510 W/m^2 más que en el día representativo de otoño) y en el aula Amarilla 713 W/m^2 (173 W/m^2 menos que en otoño), lo que representa un 94% de la radiación incidente sobre las áreas vidriadas.

Respecto al cálculo de **energía auxiliar necesaria** mediante SIMEDIF, para mantener una temperatura de 20°C se evidenció que la potencia instalada de acondicionamiento de aire es insuficiente considerando el ingreso de radiación solar directa, con la necesidad de incorporar en el aula Amarilla, una nueva unidad de 3500 frigorías y en el aula Naranja dos unidades de 2300 frigorías cada una, para una mejor climatización de todo el volumen de aire. La energía auxiliar necesaria, se puede disminuir notablemente mediante estrategias de diseño solar pasivo, que se analizarán en las siguientes instancias de investigación. Con el modelo validado de ECOTECT, será posible realizar cambios tecnológicos y morfológicos en el edificio de manera rápida, para analizar de forma confiable el impacto de la radiación solar sobre áreas vidriadas y opacas según su orientación, y su incidencia en las condiciones de confort del edificio, comparando diferentes alternativas de optimización de la envolvente.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la validación de simulaciones realizadas con los programas informáticos SIMEDIF y ECOTECT, a partir de los resultados de auditorías energéticas (Boutet et al., 2011), efectuadas durante períodos de fines de verano y otoño 2011, en el Jardín Materno Infantil N° 33 “Niño de Yapeyú” de la ciudad de Resistencia, Chaco. Se realizó un estudio comparativo entre los simuladores, determinando su grado de fiabilidad, según su utilidad para análisis térmico y/o solar. Tras haber analizado los defectos en el algoritmo de cálculo térmico de ECOTECT en ésta y otras investigaciones, se aplicaron factores correctivos que permitieron calibrar el modelo físico, logrando compensar dichas falencias con el apoyo del programa SIMEDIF. El razonable ajuste entre los datos medidos y simulados, muestra la validez de los modelos físicos

realizados, de lo que se infiere que se podrán implementar ambos programas en forma interactiva. Se comprobó que ECOTECT es más apropiado para el análisis de la disponibilidad del recurso solar en sus distintas componentes (directa, difusa y total), a partir de datos locales medidos, analizando su incidencia sobre superficies vidriadas y opacas, como así también el porcentaje de sombras. Esto a su vez contribuye a una definición más exacta de los índices y áreas de radiación que se introducen en SIMEDIF, y a un práctico análisis de las condiciones de confort higrotérmico resultantes. Mientras que SIMEDIF, permite un ajustado análisis térmico y de energía auxiliar, con resultados rápidos y acordes a la realidad. Ambos programas se utilizarán para simular períodos del año no medidos y orientar propuestas de diseño optimizado mediante el aprovechamiento de la “Energía Solar Térmica Pasiva”, transferibles a nuevos programas de infraestructura escolar, a fin de brindar las condiciones de habitabilidad propicias para el desarrollo del proceso de enseñanza–aprendizaje, con el consecuente ahorro de energía eléctrica en el sector educativo de la ciudad.

En marzo del corriente año, el Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Provincia del Chaco ha realizado una importante contribución a la prosecución de este trabajo, en el marco del Acuerdo suscripto en 2010 con la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UNNE, al aportar instrumental de medición de última generación, solicitado para la ejecución de auditorías energéticas en edificios de mayor complejidad (nivel primario, secundario y terciario). Las mismas se encuentran en curso desde el mes de abril. De esta manera se obtendrá un diagnóstico más detallado de la situación energética edilicia educativa de la ciudad de Resistencia, pues éstos difieren de los edificios de nivel inicial, dado su mayor régimen de ocupación, matrícula de alumnos y requerimientos de bienestar. Asimismo, se profundizará el conocimiento de la situación real y se validarán los modelos teóricos obtenidos mediante simulación dinámica interactiva con SIMEDIF y ECOTECT.

REFERENCIAS

- Alías H.M., Jacobo G.J., Gallipoliti V.A., Martina P.E., Corace J.J., Aeberhard M.R., Di Bernardo A. (2010). Relevamiento del Parque Habitacional Social de Resistencia y Corrientes y su Desempeño Térmico: Monitoreo y Simulaciones. AVERMA, Vol. 14, Pp. 17 – 24. ISSN: 0329-5184, Argentina.
- Alías H.; Jacobo G.; Coronel Gareca C.; Martina P.; Corace J.; Gallipoliti V. (2011). Simulaciones de Desempeño Térmico de Aulas de la Facultad de Arquitectura de la UNNE y Contrastación con Mediciones en Días de Invierno. AVERMA, Vol. 15, ISSN 0329-518.
- Autodesk (2011). www.autodesk.com/ecotect-analysis.
- Boutet M.L., Hernández A.L., Jacobo G.J., Martina P., Corace J. (2010) “Monitoreo Higrotérmico del Jardín Materno Infantil de la UNNE y simulación mediante ECOTECT, en condiciones reales de uso.” AVERMA, Vol. 14, Pp. 17– 24. ISSN: 0329-5184, Argentina.
- Boutet M.L., Hernández A.L., Jacobo G.J., Martina P., Corace J. (2011) “Auditorías Higrotérmicas y Lumínicas de dos Edificios Escolares de Nivel Inicial de la Ciudad de Resistencia, en Condiciones Reales de Ocupación.” Revista AVERMA, Vol. 15, Pp. 29 - 36. ISSN: 0329-5184, Argentina.
- Di Bernardo A., Filippín C. y Pipa D. (2011a) Monitoreo y simulación térmica energética de verano de una vivienda en condiciones reales de uso en clima templado cálido. AVERMA, Vol. 15, Pp. 67–74, 2011. ISSN 0329-5184, Argentina.
- Di Bernardo A., Filippín C. y Pipa D. (2011b) Desempeño térmico-energético de un prototipo demostrativo de vivienda de Interés social en Córdoba, Argentina. AVERMA. Vol. 15, Pp. 35 - 42, 2011. ISSN 0329-5184, Argentina.
- Duffie J.A. y Beckman W.A. (1991) Solar Engineering of Thermal Processes, 2º Ed., Pp. 173-176. Wiley Interscience, NY.
- Flores Larsen S. y Lesino G. (2001). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, pp. 15 - 24, Impreso en la Argentina. ISSN 0328-932X.
- Giménez Molina M. C. (2011), Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.
- Gonzalo G. (2003). Manual de Arquitectura Bioclimática. Editorial: Nobuko. Buenos Aires, Argentina.
- Hensen J.L.M. y Radošević, M. (2004). Teaching building performance simulation: some quality assurance issues and experiences., In Wit, M.H. de (Ed.), Proceedings of the 21st PLEA International conference on Passive and low energy architecture, 19-21 September, pp. 1209-1214, (vol.2) Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands.
- Hernandez A., Flores S., Salvo H. y Lesino G. (1999). Simulación no estacionaria mediante SIMEDIF del ala Oeste del edificio de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa. AVERMA. Vol.3 N°2. Argentina ISSN 0329-5184.
- Hernández A.L. (2001), Simulación del Comportamiento Térmico de Edificios – Comparación de Métodos Micro y Macrodinámicos. Tesis Doctoral. Director: Dra. Graciela Lesino. Fac. de Ciencias Exactas, UNSa.
- Hernández, A.L. (2003) Geosol: Una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria. AVERMA. Vol. 7, N° 2. ISSN 0329-5184.
- Incropera P. y DeWitt D. (1999). Fundamentals of heat and mass transfer. Cuarta Edición. John Wiley & Sons, Inc. México.
- Jacobo G. J. (2001) “El Confort en los Espacios Arquitectónicos de la Región Nordeste de Argentina”, ISBN N° 978 – 43 – 4155 – 6, Moglia S.R.L., Corrientes, Argentina.
- Marsh A. J. (2003). ECOTECT Tutorials. Square One research PTY LTD.
- Yarke E. y Mermet A. G. (2005). Ventilación natural de edificios. 1ª ed. – Buenos Aires: Nobuko.

ABSTRACT: This paper presents the validation of simulations by the software ECOTECT and SIMEDIF, from the results and comparative analysis of energy audits carried out during late summer and autumn periods of 2011, at the Kindergarten No. 33 "Niño de Yapeyú", of the city of Resistencia, Chaco. It exposes the limitations of Ecotect calculation method, which were solved by applying correction factors, in an interactive work methodology between both tools. The reasonable fit between measured and simulated results, showed the validity of the physical models performed, being ECOTECT more appropriate for the analysis of local solar resource availability and its influence on hygrothermal comfort conditions, while SIMEDIF allows a tight thermal and power supply analysis, with fast results and consistent with reality.

Keywords: School Architecture, Solar Radiation, Dynamic Simulation