

ANEXO 34.
ARTÍCULOS TECNICOS

TEMPERATURA DEL SUELO Y SOL-AIRE A PARTIR DE LA OSCILACIÓN DIARIA DE TEMPERATURA

RESUMEN.-

La información meteorológica cobra importancia para la evaluación, diseño y proyección en los casos de la climatización, proyección de nueva edificación, agricultura, o estudio del clima, en muchos de los casos no se cuenta con la información disponible en las zonas de estudio y/o estancias determinadas. Es así que el presente trabajo se presentan modelos de cálculo validados para nuestras condiciones estableciendo la evolución de la temperatura seca exterior hora a hora y la temperatura del suelo a diferentes profundidades.

La oscilación diaria de la temperatura seca es evaluada a partir del método desarrollado por ASHRAE (Asociación de Técnicos de Refrigeración y Aire Comprimido de Estados Unidos), considerando la temperatura máxima y mínima registrada o pronosticada en un día dado.

Así también se presenta la ecuación de Phoenix, la cual brinda una solución analítica para estimar la evolución a lo largo del tiempo de la temperatura del suelo a distintas profundidades, modelo que recurre a valores de la temperatura superficial del suelo y las propiedades físicas del suelo en la estimación.

Palabras clave: Cálculo, temperatura seca, temperatura del suelo, meteorología.

1. INTRODUCCION.-

En la estación de invierno como en verano, la carga térmica de los sistemas de calefacción y refrigeración están directamente relacionadas con la temperatura del aire. Para determinar estas temperaturas puede recurrirse a la información de estaciones meteorológicas de la región o el área, pero no siempre existe una estación meteorológica lo suficientemente cerca del lugar de interés, o el acceso a una base de datos del lugar específico no está al alcance o disponibilidad de los interesados.

Estas carencias pueden ser afrontadas mediante la instalación de estaciones meteorológicas en las zonas, donde se registre el comportamiento de la temperatura exterior por ejemplo, pero la instalación, funcionamiento y adquisición de una estación meteorológica, representan elevados costos que habría que afrontar.

Para subsanar estas dificultades se han desarrollado diversos modelos matemáticos capaces de brindar de forma aproximada el comportamiento de condiciones meteorológicas, unas más precisas que otras.

Es así que la evolución de la temperatura del aire en un determinado día se la evalúa partiendo del desarrollo propuesto por ASHARE

corregida para nuestras condiciones. Modelo que considera como datos iniciales el registro y/o pronóstico de los valores de temperatura máxima y mínima del día de cálculo, en el seguimiento y evaluación del modelo para diferentes zonas y lugares geográficos, se ha evidenciado que la aplicación presenta limitaciones en precisión, siendo necesaria corregirla y validar para las diferentes zonas, la corrección se realizó en función de la humedad relativa de la región y datos meteorológicos registrados en la carrera de Ingeniería Mecánica.

Por otro lado una carencia encontrada en el registro de las estaciones meteorológicas es la evaluación de la temperatura del suelo, en la mayoría de los casos o en su expresión más simplificada e ideal, el valor de temperatura del suelo se la considera igual a la temperatura del agua de red. La importancia de conocer la temperatura exacta del suelo a diferentes profundidades es significativa, principalmente cuando se realiza el cálculo preciso de transferencia de calor en viviendas (zona térmica en contacto con el suelo al terreno), o en el caso de utilizar el terreno a diferentes profundidades para realizar la condensación en sistemas de climatización.

La carencia mencionada en este caso la reemplazamos con el modelo desarrollado por Phoenix determinando la temperatura del suelo a diferentes profundidades.

2. COCEPTUALIZACIÓN.-

Temperatura seca del aire mediante un análisis armónico de Fourier.-

El análisis armónico establece que toda función periódica $T(h)$ puede descomponerse como una combinación lineal $T_{NA}^*(h)$ de senos y cosenos, con argumentos que son múltiplos de uno fundamental. En investigaciones meteorología, climatología y para el caso de conocer el valor de la función $T(h)$ en un número de Par de puntos h_0, h_1, \dots, h_{n-1} igualmente separados en el periodo P, suele utilizarse la formulación siguiente:

$$T_{NA}^*(h) = \bar{T} + \sum_{i=1}^{NA} a_i * \sin\left(\frac{2\pi i h}{P}\right) + b_i \quad \dots \text{Ec. (1)}$$

Siendo:

\bar{T} : Valor medio de $T(h)$ en el periodo P.

NA : Número de armónicos o términos que intervienen en la sumatoria.

a_1, b_1 : Coeficientes correspondientes a cada armónico.

$$a_1 = (p_1 + q_1)^{1/2} \quad \dots \text{Ec. (2)}$$

$$b_1 = \arccos \frac{p_1}{a_1}$$

$$b_1 = \arcsin \frac{q_1}{a_1} \quad \dots \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$$p_1 = 2/N \sum_{h=0}^{N-1} (T(h) - \bar{T}) \sin \frac{2\pi h}{P} \quad \dots \text{Ec. (4)}$$

$$q_1 = 2/N \sum_{h=0}^{N-1} (T(h) - \bar{T}) \cos \frac{2\pi h}{P} \quad \dots \text{Ec. (5)}$$

Determinación de las horas frío Formula de Crossa – Raynaund.-

Resulta de interés en estudios agrometeorológicos conocer el número de horas en que los cultivos permanecen por debajo de un cierto umbral de

temperaturas a efectos de establecer el periodo de reposo invernal. Es frecuente definir el número de “horas frío” F Como el número de horas que transcurren por debajo de 7°C .

Se han desarrollado diversas fórmulas empíricas que proporcionan de forma aproximada el número F en función de las temperaturas medias mensuales, pero están deducidas para regiones relativamente frías y su extrapolación a otras zonas no resulta recomendable. Una formula sencilla capaz de dar el numero F de forma diaria, en función de las temperaturas extremas diarias es la de Crossa-Raynaund.

$$Fc = \begin{cases} 24(7 - T_{MIN}) / (T_{MAX} - T_{MIN}) & \text{si } T_{MIN} < 7^\circ\text{C} \\ 0 & \text{si } T_{MIN} \geq 7^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{con } Fc = 24 \quad \text{si } T_{MAX} < 7^\circ\text{C}$$

... Ec. (6)

Para cuya deducción se supone que la temperatura se ajusta a una función lineal del tiempo.

Temperatura instantánea del aire método de ASHRAE.-

Para determinar la oscilación de la temperatura seca del aire exterior será necesario seleccionar el día de diseño para el cálculo, el modelo basa la estimación a partir de la información de los valores máximos y mínimos del lugar de cálculo y/o el registro ya sea de un pronóstico o de un histórico del lugar requerido.

El método toma en cuenta los porcentajes de oscilación de temperatura exterior, que multiplica a los valores de oscilación diaria promedio y son restados a la temperatura máxima exterior.

La oscilación diaria de temperatura de aire exterior es la diferencia entre las temperaturas máxima diaria promedio y mínima diaria promedio durante el mes más caluroso o el mes más frío (ASHRAE, 2001).

Ecuación desarrollada por ASHRAE para la determinación de la temperatura exterior del aire a partir de la temperatura de diseño:

$$T_{aire} = T_{ext} - (DR * Pt) \dots \dots \dots$$

Ec. (7)

Donde:

- T_{aire} : Temperatura exterior del aire |
- T_{ext} : Temperatura exterior máxima[°C]
- DR : Oscilacion diaria de temperatur
- Pt : Oscilacion diaria de temperatur

Los valores de porcentaje de oscilación diaria de temperatura propuestos por ASHRAE generalizados para cada hora del día son los siguientes:

Hora	Pt[%]	Hora	Pt[%]	Hora	Pt[%]
1	87	9	71	17	10
2	92	10	56	18	21
3	96	11	39	19	34
4	99	12	23	20	47
5	100	13	11	21	58
6	98	14	3	22	68
7	93	15	0	23	76
8	84	16	3	24	82

Tabla 1 Porcentaje de oscilación diaria de temperatura. (ASHRAE, 2001)

Tomando las ecuaciones desarrolladas e implementadas por ASHRAE, procedemos a calcular los valores de porcentajes de oscilación diaria de temperatura para las distintas estaciones del año, con los valores de temperatura para un año tipo recolectados por la estación meteorológica ubicada en la carrera de Ingeniería Mecánica – Electromecánica de la Facultad Nacional de Ingeniería, Oruro Bolivia, Utilizando las formulaciones siguientes:

$$\bar{P}_t = \frac{\sum_1^n Pt_{(i)}}{n} \dots \dots \dots \text{Ec. (8)}$$

$$Pt_{(i)} = \frac{\bar{T}_{max} - Th_{(i)}}{DR} \dots \dots \dots \text{Ec. (9)}$$

$$DR = \bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \dots \dots \dots \text{Ec. (10)}$$

Donde:

\bar{P}_t : Promedio del porcentaje de oscilación para la hora i de los n dias para ei

$Pt_{(i)}$: Porcentaje de oscilación diaria d

\bar{T}_{max} : Promedio de las temperaturas m

\bar{T}_{min} : Promedio de las temperaturas m

$Th_{(i)}$: Temperatura exterior registrada

DR : Oscilación diaria de temperatur

n : Número de dias registrado en el

i : Hora de registro (1,2,3, ..., 24).

Determinación de la temperatura de suelo método de Phoenix.-

En el desarrollo del diseño de sistemas de climatización es necesario e imprescindible conocer la temperatura del suelo a una cierta profundidad y en un lugar específico.

Una solución analítica representada en la siguiente expresión matemática propuesta por Phoenix, brinda una opción de cálculo de la temperatura del suelo, a partir de un promedio anual de la temperatura de la superficie del suelo, la profundidad a la que se desea conocer la temperatura y las características propias del terreno.

La grafica de esta ecuación se da en forma de una senoide, considerando que esta ecuación se apoya en las siguientes hipótesis para su desarrollo: no existe convección humedad y no ocurre congelación / descongelación.

$$T_{grd}(z, t) = T_{surf,ann} + R(z) * \Delta T_{surf} * \sin(w_{ann} * t - \phi_{amb} - \phi_{lag}(z)) \dots \text{Ec. (11)}$$

Donde:

$T_{surf,ann}$
: Temperatura anual promedio de la superficie del suelo

$$(T_{surf,ann} \approx T_{amb,ann})$$

$$R(z) = e^{-z/z_0}$$

$$\Delta T_{surf} = (T_{surf,max} - T_{surf,min})/2$$

$$z_0 = \sqrt{2 * k / w_{ann}}$$

$$k = k_{grd} / \rho_{grd} * C_{grd}$$

$$w_{ann} = 2\pi / T$$

$$\phi_{amb}$$

$$= 4.945 \text{ rad (frecuencia de ocurrencia de}$$

*temperaturas bajas
en el año para la ciudad de Oruro)*
 $\Phi_{lag}(z) = z/z_0$

En la figura 1 muestra la temperatura del suelo (T_{grd}) en superficies con distintas profundidades de la ecuación 11 de Phoenix. Las curvas muestran la reducción progresiva de la amplitud sinusoidal y el aumento de retardo de fase a medida que aumenta la profundidad.

La temperatura de la superficie del suelo está influenciada por una serie de factores, como el viento, la radiación solar, nubosidad, etc. Es así que se asume que la temperatura de la superficie del suelo se aproxima a la temperatura seca del aire exterior.

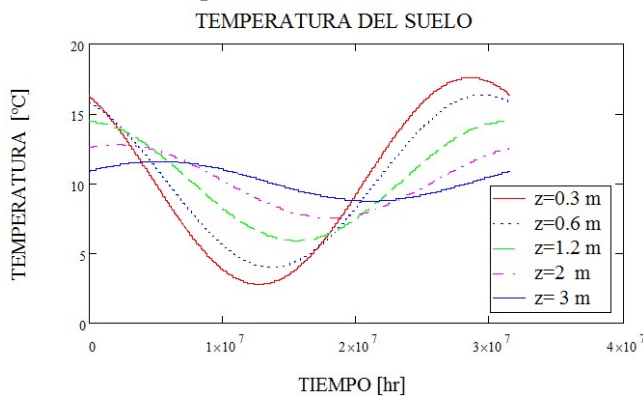


Fig. 1. Temperaturas respecto al tiempo para la ecuación Phoenix, por un periodo de 2 años. Tamb, T_{surf} y T_{grd} a distintas profundidades.

La temperatura del terreno muestra el comportamiento constante a lo largo del año, variando la oscilación a diferentes profundidades. Se afirma que la temperatura del suelo es función principalmente de la temperatura exterior del suelo y la profundidad a la que se evalúa.

3. MODELO TEORICO ESPERIMENTAL METEOROLOGICO DE COMPORTAMIENTO.-

En la simulación, diseño y desarrollo de sistemas térmicos como también en el cálculo de sistemas de climatización, las variables fundamentales son las condiciones climáticas de la región, zona o lugar de estudio. Siendo entonces importante disponer de datos meteorológicos de temperatura seca, temperatura húmeda, humedad relativa, la radiación normal, radiación total, velocidad del viento entre otros.

Estos valores pueden determinarse a partir de modelos matemáticos, que generalmente son aproximaciones matemáticas, parametrizadas en función de alguna variable conocida, generalmente se toma como referencia la temperatura seca (T_s) y en función T_s se determinan las otras variables.

Otra forma de obtener las variables atmosféricas son a partir de una estación meteorológica, en este caso los valores obtenidos es el resultado de una medición in situ, sin embargo, el comportamiento de un año meteorológico puede ser muy diferente al compararlo con un año medido. En este caso se aconseja tomar diferentes distribuciones meteorológicas, recomendable 5 años, de ello obtener el año tipo modelo, cuyo comportamiento o distribución sea la más representativa de los datos obtenidos.

Debido a la necesidad de contar con una referencia de las condiciones climatológicas de la región, es necesario generar un año tipo para las ciudades del altiplano. El año tipo desarrollado fue a partir de los datos generados en la estación meteorológica de la Carrera de Ingeniería Mecánica-Electromecánica de Oruro (ciudadela universitaria). La antigüedad de los registros meteorológicos es la recomendable para la generación del año tipo.

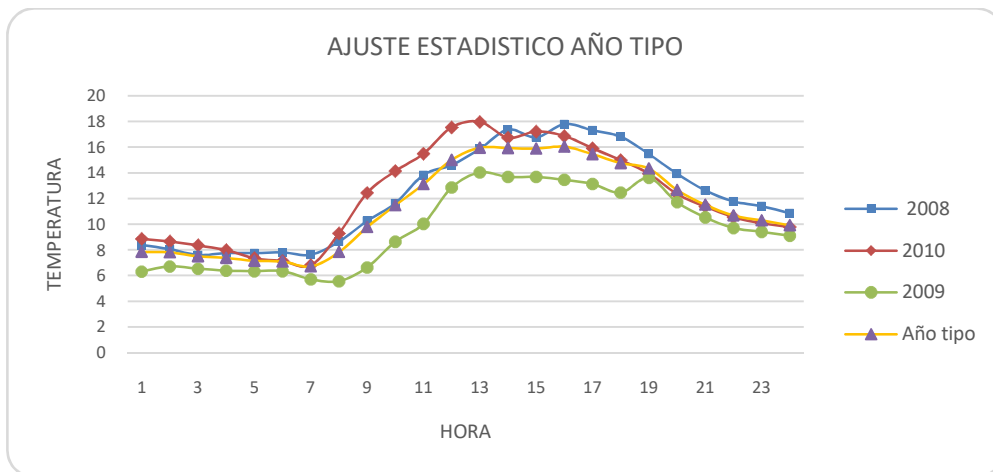


Fig. 2 Ajuste estadístico Año tipo vs datos reales (mes de enero)

De lo expuesto en los anteriores párrafos, a continuación se muestra en gráficas 3D el resultado del comportamiento meteorológico del año tipo para Oruro.

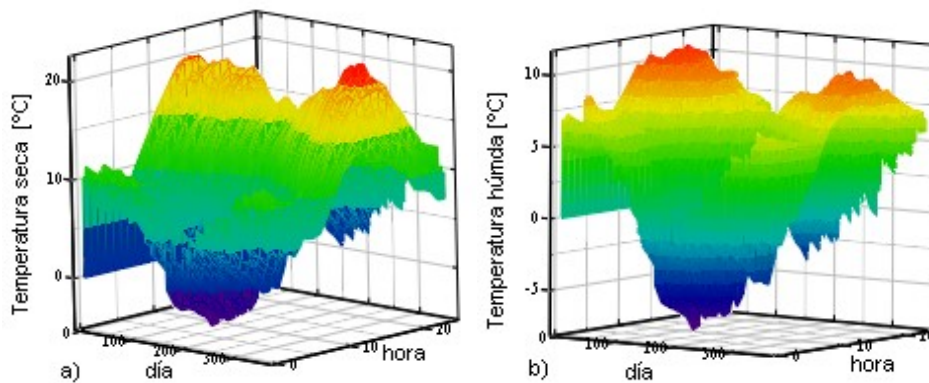


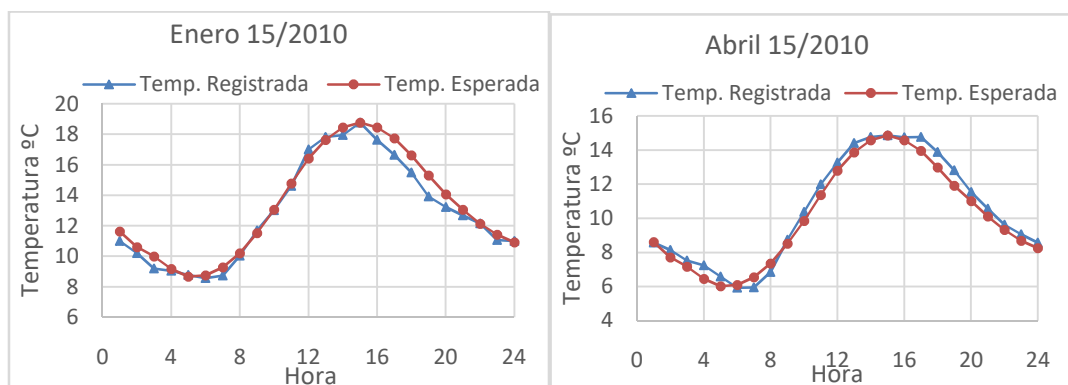
Figura N° 3 a) Temperatura seca [°C], b) Temperatura Húmeda [°C]

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.-

La oscilación de temperatura diaria calculada para las distintas estaciones del año y evaluadas para la región del altiplano boliviano se ajusta correctamente a las temperaturas registradas en distintas estaciones meteorológicas de la región. De esa manera se valida el procedimiento

empleado y desarrollado por ASHRAE.

A continuación se muestran los gráficos comparativos de temperatura registrados en la estación meteorológica y determinada a partir del modelo, obteniendo como resultado una desviación permisible.



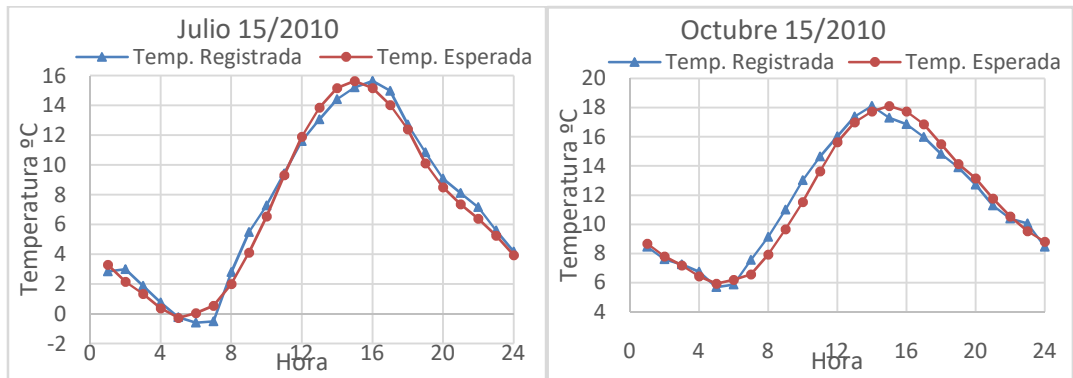


Figura 4. Temperaturas registradas y calculadas para las distintas estaciones del año.

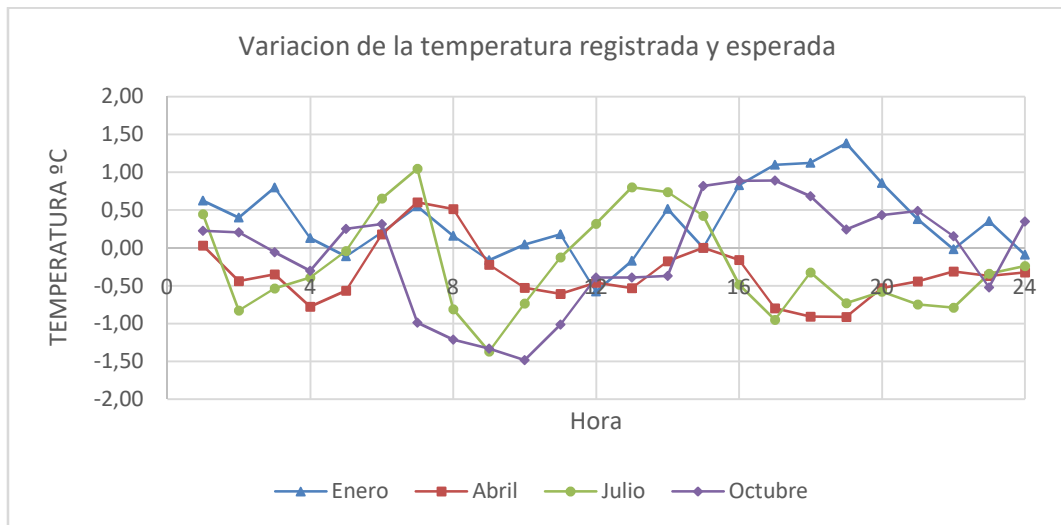


Figura 5. Variación de las temperaturas registradas y calculadas para distintas estaciones del año.

Como se observa en los gráficos, los rangos de las variaciones de la temperatura registradas en la estación meteorológica y los valores pronosticados con el método de ASHRAE no presenta mayor desviación a 1,5 [°C], entonces se asevera que la ecuación de ASHRAE es aplicable para la estimación de la temperatura seca instantánea del aire a partir de las temperaturas máximas y mínimas, siendo validada para nuestra región.

La variación de temperatura es mayor en las horas 9 am a 6 pm, considerar que la temperatura seca exterior en el periodo analizado es afectada por la radiación solar (radiación directa, difusa y reflejada), como también de las condiciones de nubosidad existente en el día de cálculo, cuyas variables, principalmente la segunda

consideración es difícil de predecir para un día de cálculo. Por otro lado existen otros factores como la velocidad del viento, la humedad relativa, aerosoles, que afectan en menor proporción la determinación de la T_s .

Para validar la variación porcentual de la oscilación diaria de temperatura calculada, se ha tomado como referencia los datos de temperatura registradas en una estación meteorológica cuyas condiciones son parecidas al altiplano boliviano (Antofagasta Chile). Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, las curvas del comportamiento de la temperatura medida y la temperatura calculada por el método estudiado, se ajustan, identificando una desviación mínima.

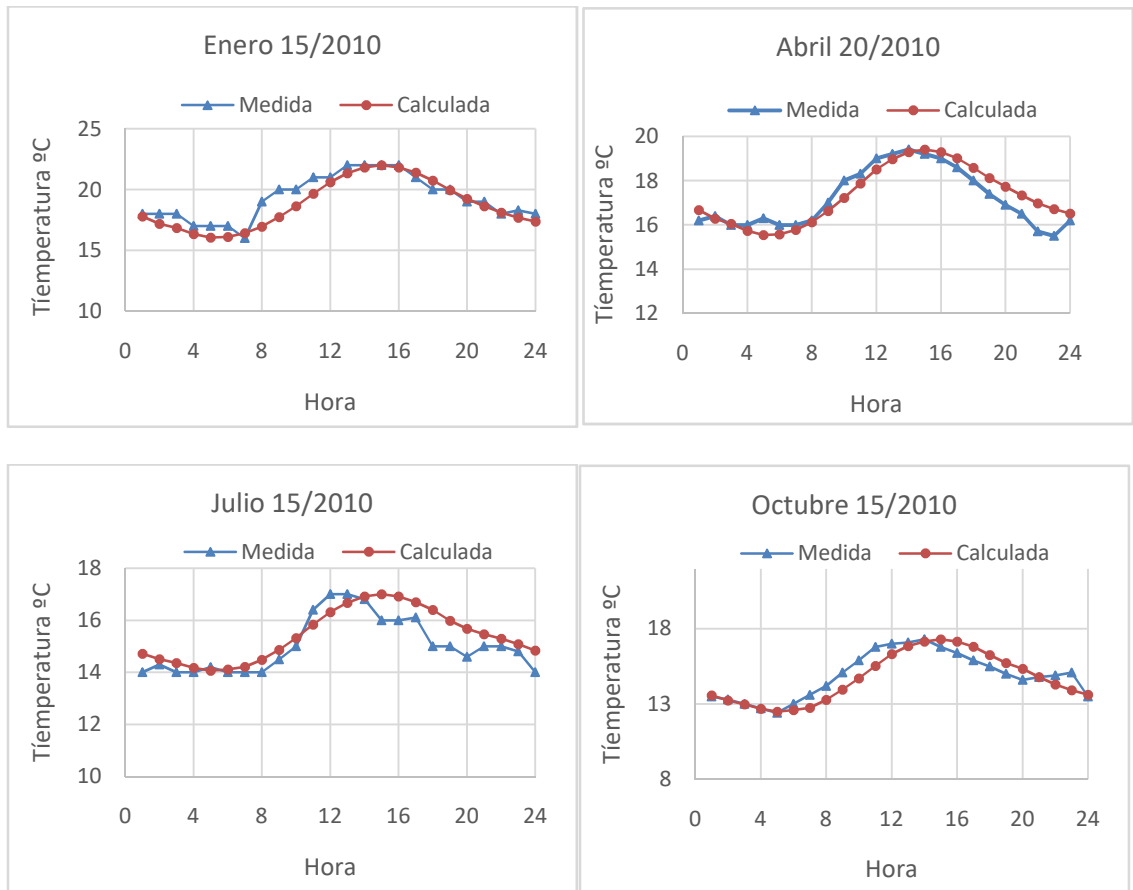


Figura 8. Temperaturas registradas y calculadas para las distintas estaciones del año, Antofagasta, Chile (ENERGY, 2014).

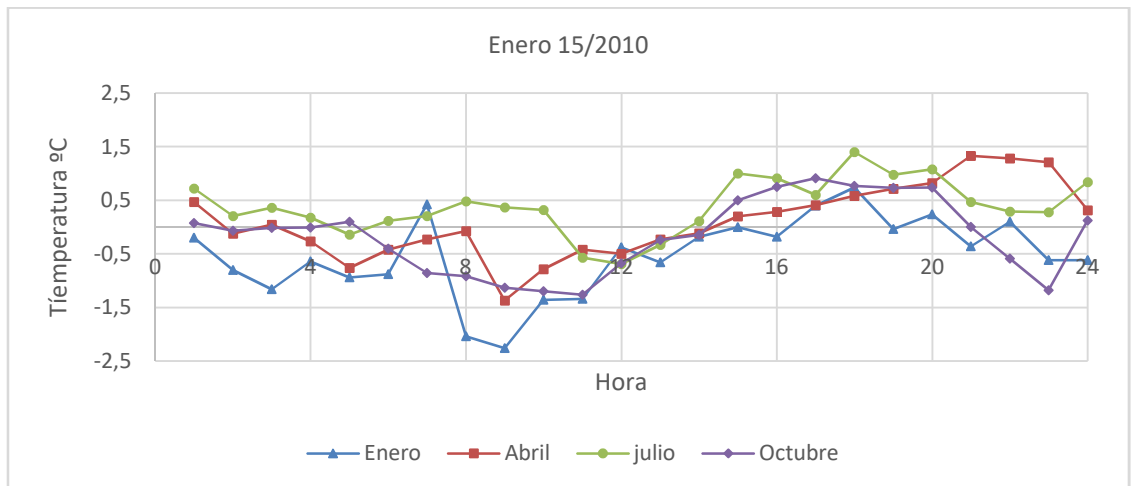


Figura 9. Variación de las temperaturas registradas y calculadas para distintos meses y estaciones del año, Antofagasta, Chile (ENERGY, 2014).

5. CONCLUSIONES.-

En el presente trabajo se ha validado el método desarrollado por ASHRAE para la determinación de las temperaturas instantáneas del aire, donde se han desarrollado nuevos valores del porcentaje de oscilación diaria de la temperatura para el altiplano de Bolivia, utilizando como

referencia las estaciones meteorológicas de la región y estaciones meteorológicas de condiciones parecidas a la zona de estudio.

La temperatura estimada mediante el método ASHRAE, queda afectada únicamente por la temperatura máxima y mínima registrada y un porcentaje de

oscilación diaria evaluada hora a hora en el día, siendo utilizadas en regiones o lugares donde no se disponga de una estación meteorológica y que únicamente se conozca el pronóstico diario y/o un historial registrado.

Recalcar, los valores del porcentaje de oscilación diaria de temperatura calculados, son únicamente aplicable a la región del altiplano de Bolivia y sectores altiplánicos fronterizos a esta región, para la determinar la temperatura del aire en otras regiones, deben seleccionarse otros valores del porcentaje de oscilación diaria de temperatura.

Finalmente la ecuación de Phoenix nos brinda la temperatura del terreno a diferente profundidad y esta no representa ningún problema a la hora de calcularla. Siendo la temperatura superficial del suelo una de las variables importantes en el cálculo, y de manera práctica, toma el mismo valor que la temperatura del aire y esta es determinada por la ecuación de ASHRAE anteriormente descrita. De esta forma complementa el método de ASHRAE a la ecuación de Phoenix y simplifica la labor de cálculo.

Bibliografía

- ASHRAE, H. o. (2001). *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.* Atlanta.
- Christensen, J. B. (n.d.). TOWARDS DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MAINS WATER TEMPERATURE. *National Renewable Energy Laboratory*, 6.
- CROSSA-RAYNAUD, P. (1995). *Effects des hiver doux sur le comportement des arbres fruitieres a feuilles caduques.* Tunis: Ann. Serv.Bot.
- ENERGY, U. S. (2014, septiembre 10). *Energy Plus*. Retrieved from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm
- Petrevic V., S. L. (1992). *Methods in Climatology*. Massachusetts: Harvard.
- R. Garrido A., F. M. (1989). CALCULO DE LA TEMEPRATURA INSTANTANEA DEL AIRE A PARTIR DE LA MAXIMAY

RADIACIÓN INCIDENTE EN CERRAMIENTOS EXTERIORES DE EDIFICACIONES DE LA CIUDAD DE ORURO - BOLIVIA

RESUMEN.-

Para el estudio y desarrollo de métodos y procedimientos enfocados al aprovechamiento de energías renovables disponibles en la región, es necesario contar con la mayor cantidad de información disponible y clasificada de acuerdo a su aplicación; el presente documento es una recopilación de datos históricos, y la aplicación de un modelo de cálculo para la determinación la incidencia de la radiación solar en cerramientos externos en edificaciones de la ciudad de Oruro, en Bolivia.

Los datos históricos de '*radiación global instantánea incidente*', y recopilados en un periodo de 10 años, en la estación meteorológica de la carrera de Ingeniería Mecánica Electromecánica de la Facultad Nacional de Ingeniería, y que está ubicada en la Ciudadela Universitaria (Zona Sur de la Ciudad de Oruro), son procesados y linealizados con el objeto de caracterizar el comportamiento de un año tipo meteorológico.

Con las curvas características y representativas para cada mes, se procede a disgregar los valores de '*radiación global instantánea*' en sus componentes de radiación *difusa* y *directa incidente* en una superficie horizontal. Al contar con estas dos variables se evalúa la cantidad de radiación solar incidente total (difusa y directa) en cerramientos externos, orientados en 16 direcciones respecto al norte, mostrándose resultados muy favorables debido a la alta radiación solar en la región, con mayor intensidad en la estación de verano.

Las incidencias de radiación solar en la mayoría de las orientaciones son cíclicas año tras año, sin embargo, éstas varían en intensidad en función del mes, declinación de la tierra y altura solar principalmente.

Palabras clave: Radiación, radiación difusa, radiación directa, cerramiento, orientación.

1. INTRODUCCION.-

En el proceso de satisfacer nuestras necesidades básicas y crear ambientes de confort para la vida cotidiana, todo proceso va relacionado con la utilización directa o indirecta de algún tipo de energía, la mayoría de estas energías provienen de la combustión de hidrocarburos derivados del petróleo y en su minoría, pero en una creciente inserción, las energías alternativas; estas últimas dependen mucho de la ubicación geográfica y en algunos casos no se cuenta con potenciales suficientes para su desarrollo y explotación.

En la región del altiplano boliviano, la radiación solar es uno de los recursos con potencial para su explotación, llegando a registrar valores de radiación instantánea de hasta $900 [W/m^2]$ en los

meses de verano (*diciembre, enero*) y de $600 [W/m^2]$ en los meses de invierno (*junio, julio*)(1), estos valores son mostrados extensamente en varias publicaciones. En la actualidad, el uso de esta tecnología, se encuentra en pleno desarrollo, no obstante tiene un campo extenso para su aplicación y el recurso es abundante. Es así que con la constante y creciente demanda de energía, se deben implementar políticas y procedimientos para su mejor y óptimo aprovechamiento.

El Altiplano de Bolivia, por las características geográficas y su altitud sobre el nivel del mar presenta un clima muy hostil, tanto en invierno como en verano, caracterizado por bajas temperaturas, con registros mínimos de hasta $-12 [C]$ (estación de invierno)(2);

para contrarrestar estas condiciones de clima y crear ambientes de confort, normalmente recurrimos al uso de tecnologías que funcionan en base a energías tradicionales (electricidad, hidrocarburos) sin embargo, esto no es una solución a largo plazo, por lo que es necesario reevaluar las características constructivas de las edificaciones, tanto en su forma y diseño, así como el uso de materiales de construcción, a fin de un mejor aprovechamiento de energías renovables propias de nuestro entorno.

2. COCEPTUALIZACIÓN.-

2.1. Radiación solar global instantánea.-

Es la cantidad de energía radiante que recibe un cuerpo. De acuerdo con los equipos de medición, los valores son registrados en unidades de Vatio sobre metro cuadrado (W/m^2).

2.2. Radiación directa.-

Es un porcentaje de la radiación solar que incide directamente en una superficie, sin ser perturbada o re direccionada.

2.3. Radiación difusa.-

Es la radiación solar recibida del sol, después que su dirección ha sido cambiada por la Dispersión de la atmósfera.

2.4. Estimación de la radiación solar, Método de ASHRAE.-

La Irradiación directa normal, es la cantidad de radiación solar recibida por unidad de área en una superficie que se mantiene perpendicular (o normal) a los rayos solares que llegan en línea recta respecto a su posición en el cielo(3).

Antes de 1967, los datos de radiación solar se basaban en un supuesto constante solar de $1324 [W/m^2]$ y en una atmósfera estándar a nivel del mar que contenía una profundidad equivalente de 2,8 mm

de ozono, 20 mm de humedad precipitable y 300 partículas de polvo por centímetro cúbico. Threlkeld y Jordan (1958) consideraron la amplia variación de vapor de agua en la atmósfera en cualquier tiempo, y particularmente en la variación estacional, que encuentra tres veces tanta humedad en la atmósfera en pleno verano como en diciembre, enero y febrero. La atmósfera básica fue asumida al estar a nivel del mar con presión barométrica, 2.5 mm de ozono, 200 partículas de polvo por cm^3 , y un contenido de humedad precipitable real que varió durante todo el año desde 8 mm en pleno invierno hasta 28 mm a mediados de julio.

Stephenson (4) demostró que la intensidad de radiación de normalidad directa I_{DN} , en la superficie de la tierra en un día claro se puede estimar por la siguiente ecuación:

$$I_{DN} = A \cdot e^{-\frac{B}{\sin(\alpha_s)}} \quad \dots Ec. 1$$

Dónde:

A Irradiación solar aparente [W/m^2].

B Coeficiente de extinción atmosférica.

α_s Altura solar [$^\circ$].

A partir de esta definición matemática se deriva la radiación solar directa y difusa.

Radiación solar directa, la componente directa se obtiene a partir de una relación geométrica sencilla que se muestra a continuación.

$$I_{Di} = I_{DN} \cdot \cos i \quad \dots Ec. 2$$

Radiación solar difusa, La irradiación solar difusa, es una medida de la razón de la energía solar incidente, sobre un plano horizontal en la superficie de la Tierra como consecuencia de la dispersión del rayo del sol debido a los componentes atmosféricos.

$$I_{di} = C \cdot Y \cdot I_{DN} \quad \dots Ec. 3$$

$$Y = 0,55 + 0,437 \cdot \cos(i) + 0,313 \cdot \cos^2(i)$$

... Ec. 4

Dónde:

- C Razón de la radiación difusa sobre una superficie horizontal para la irradiación directa normal.
- Y Parámetro de irradiación difusa adimensional.
- i Ángulo de incidencia solar [°].

2.5. Dirección de la radiación.-

Las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación particular con respecto a la tierra en cualquier momento (plano fijo o que se mueva con respecto a la tierra) y la radiación solar del haz entrante, es decir, la posición del sol relativa a ese plano, puede describirse en términos de varios ángulos (5). Algunos de los ángulos se indican en la *Figura 1*. Los ángulos y un conjunto de convenciones de signos consistentes son los siguientes:

ϕ **Latitud**, ubicación angular al norte o al sur del ecuador, norte positivo; $90^\circ \leq \phi \leq -90^\circ$.

δ **Declinación** posición angular del sol en el mediodía solar (cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte positivo; $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

β **Pendiente**, ángulo entre el plano de la superficie y la horizontal; $0^\circ \leq \delta \leq 180^\circ$. ($\beta > 90^\circ$ significa que la superficie tiene un componente orientado hacia abajo).

γ **Ángulo azimut de la superficie**, desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local,

con cero al norte, al este negativo y al oeste positivo; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

ω **Ángulo de horario** El desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la Tierra sobre su eje a 15° por hora.

ω_s **Ángulo de entrada del sol** para superficies horizontales.

θ **Ángulo de incidencia** El ángulo entre la radiación del haz sobre una superficie y la normal a esa superficie.

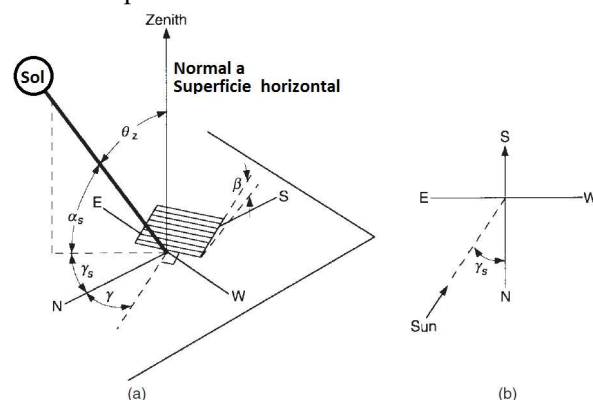


Figura 1. (a) Ángulo de zenit, pendiente, ángulo de azimut de superficie y ángulo de azimut solar para una superficie inclinada. (b) Vista en planta que muestra el ángulo del azimut solar.

2.6. Datos estadísticos de la radiación solar.-

La estación meteorológica de la carrera de Ingeniería Mecánica Electromecánica de la Facultad Nacional de Ingeniería, registra una variedad de datos meteorológicos. A continuación se muestra un resumen anual del promedio mensual de la incidencia de radiación global instantánea sobre una superficie horizontal (6) *Tabla 1*.

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1

7	123	62	34	13	1	0	0	2	51	145	190	175
8	352	270	255	208	157	114	108	160	260	376	412	394
9	568	472	477	414	347	295	293	359	463	586	612	595
10	749	644	664	587	507	451	454	529	631	756	771	759
11	880	771	801	710	620	562	571	652	748	869	879	873
12	952	843	876	773	675	619	634	718	806	919	925	928
13	960	855	884	771	670	618	638	720	798	900	907	922
14	902	806	825	705	603	557	582	659	727	815	826	853
15	783	700	702	579	481	443	471	540	597	670	689	727
16	611	545	525	404	314	285	314	373	419	477	505	554
17	402	352	310	197	121	103	130	175	210	252	290	348
18	173	141	82	10	0	0	0	4	14	32	71	128
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1. Incidencia de radiación global instantánea sobre una superficie horizontal.

2.7. Disgregación de la radiación difusa y directa en superficies horizontales.-

En el proceso de estimación de la radiación solar y sus distintas componentes generalmente se cuenta con datos históricos de la Radiación Solar Global instantánea sobre una superficie horizontal $[W=m^2]$, Sin embargo estos datos necesitan ser disgregados para ser utilizados en distintos cálculos ingenieriles en sus respectivas componentes (Directa, difusa y reflejada)(6).

Para poder disgregar las componentes de la radiación solar, es necesario conocer y evaluar algunas variables que dependen del tiempo y la ubicación geográfica de la región donde se evalúa dicha radiación, a continuación detallamos las principales variables.

Radiación diaria global sobre superficie horizontal

Es la sumatoria de la radiación instantánea global que incide sobre una superficie horizontal

multiplicada por el intervalo de tiempo en horas en que se realizó la toma de datos.

$$HHN = t * \sum IHN \left[\frac{W*hr}{m^2*dia} \right]$$

... Ec. 5

Radiación difusa día

$$DFN = FD * HHN \left[\frac{W*hr}{m^2*dia} \right]$$

... Ec. 6

Radiación solar difusa instantánea

La cuantificación de la radiación solar difusa se la puede realizar a partir del factor de conversión de radiación difusa rd , que según Liu y Jordan será:

$$rd = \frac{IDFH}{DFN} = \frac{\pi}{24} * \frac{\cos(w)\cos(w_s)}{\sin(w_s) - w_s \cos(w_s)}$$

... Ec. 7

Radiación solar directa instantánea

$$IDRH = IHN - IDFH [W/m^2]$$

... Ec. 8

Dónde:

IHN Radiación instantánea global sobre superficie horizontal $[W/m^2]$.

HHN Radiación diaria global sobre superficie horizontal $[W/m^2]$.
 t Intervalo de tiempo entre mediciones.
 FD Índice de fracción difusa.
 DFN Radiación difusa día.
 rd Factor de conversión de radiación difusa.
 IDFH Radiación difusa instantánea $[W/m^2]$.
 IDRH Radiación solar directa instantánea $[W/m^2]$.

Para superficies inclinadas el procedimiento ya es mucho más fácil con los datos previamente obtenidos para superficies horizontales:

$$IDF = \frac{IDFH \cdot (1 + \cos(\beta))}{2} \quad \dots \text{Ec. 9}$$

$$IDR = IDRH \cdot \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_h)} \quad \dots \text{Ec. 10}$$

Dónde:

IDF Radiación difusa en superficies inclinadas.
 IDR Radiación directa en superficies inclinadas.
 β Angulo de inclinación de la superficie.
 θ_i Angulo de incidencia solar para superficie inclinada.
 θ_h Angulo de incidencia solar para superficie horizontal.

3. MODELO EXPERIMENTAL.- TEORICO

La incidencia de la radiación solar en los distintos cerramientos, está expresada en $[W/m^2]$, las 16 orientaciones consideradas para la evaluación se muestran en la *Figura 2*, y expresadas de acuerdo al siguiente detalle: Norte, Norte Noreste, Noreste, Este Noreste, Este, Este Sureste, Sureste, Sur Sureste, Sur, Sur Suroeste, Suroeste, Oeste Suroeste, Oeste, Oeste Noroeste, Noroeste, Norte Noroeste, adicional a las orientaciones de superficie vertical,

también se ha incluido la cantidad de energía que llega a la superficie horizontal, datos que son útiles para la evaluación de techos y claraboyas.

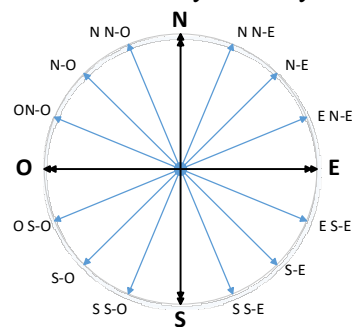


Figura 2. Dieciséis orientaciones consideradas para la ubicación de los cerramientos en proyecciones arquitectónicas.

Los registros históricos de radiación global instantánea en superficies horizontales se recopilaron en la estación meteorológica de la carrera de Ingeniería Mecánica Electromecánica, ubicada en la Ciudadela Universitaria Oruro - Bolivia.

Se evaluó los registros históricos que datan desde hace 10 años y corroborando con el método de cálculo expuesto anteriormente, fueron linealizados para obtener una curva representativa para cada mes del año llegando así a obtener una curva característica del comportamiento de la incidencia solar al mismo tiempo se evidencia un comportamiento cíclico de los valores registrados, de esta forma determinamos y validamos un registro meteorológico solar tipo para un año.

Con las curvas características obtenidas se procedió a disgregar la radiación difusa instantánea y radiación directa instantánea para evaluar la incidencia de radiación total en los cerramientos exteriores de edificaciones con distintas orientaciones para la valoración y análisis de las mismas. Este procedimiento se desarrolló en 16 orientaciones de un cerramiento exterior llegando a obtener los siguientes

comportamientos, representados en las

figuras siguientes:

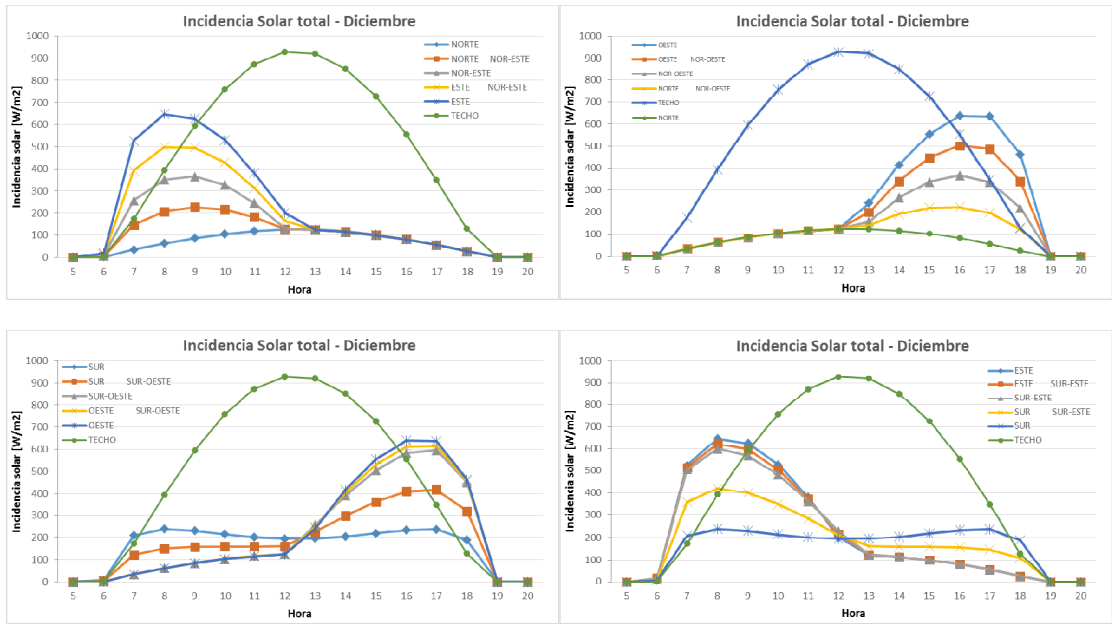


Figura 3. Promedio Incidencia solar en las distintas orientaciones de cerramiento mes de diciembre.

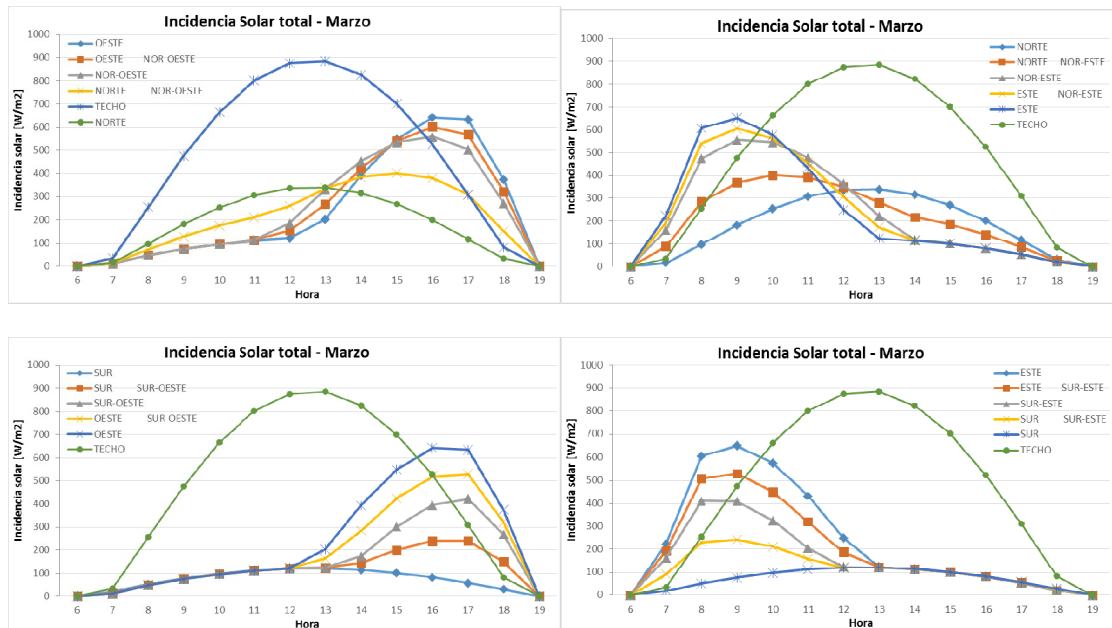


Figura4. Promedio Incidencia solar en las distintas orientaciones de cerramiento mes de marzo.

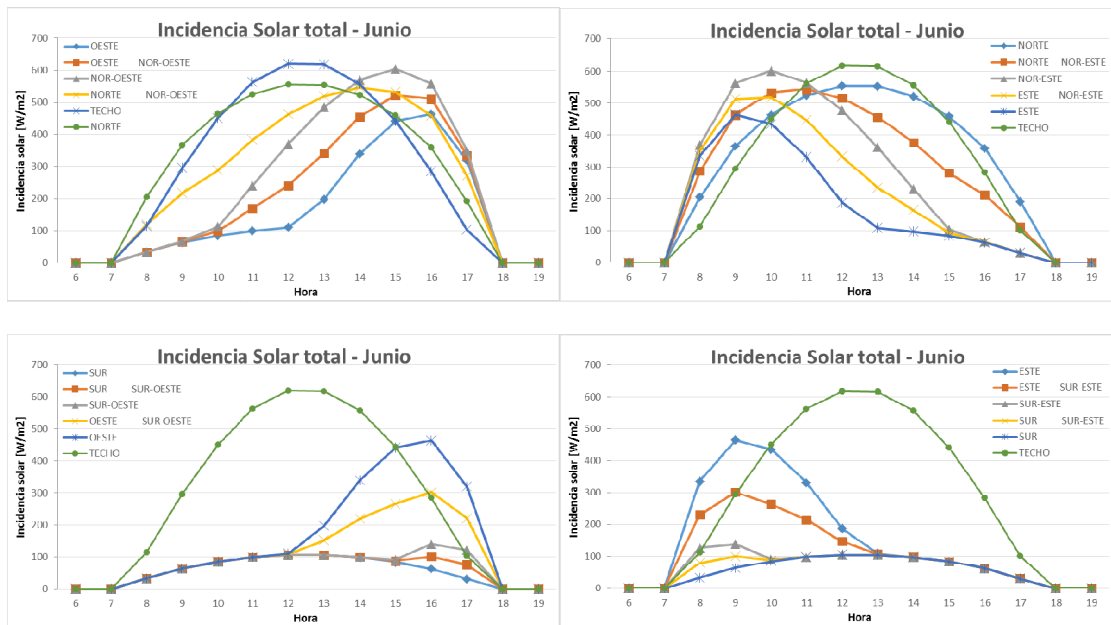


Figura5. Promedio Incidencia solar en las distintas orientaciones de cerramiento mes de junio.

Se observa que la radiación solar incidente en superficies horizontales alcanza valores máximos en la estación de verano, llegando a registrar al redero de $950 [W/m^2]$ en el medio día solar, al mismo tiempo los valores mínimos se registran en la estación de invierno con valores de $650 [W/m^2]$ en el medio día solar. Lo que muestra una gran incidencia solar apta para explotación en distintas áreas.

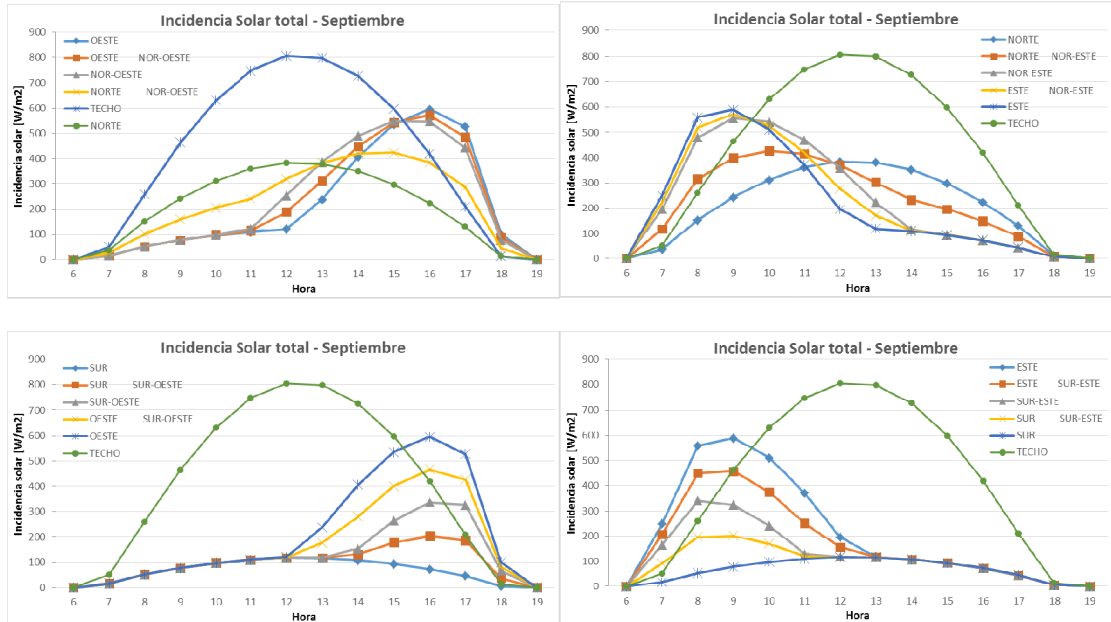


Figura6. Promedio Incidencia solar en las distintas orientaciones de cerramiento mes de septiembre.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.-

Con respecto a la incidencia solar sobre las orientaciones de los cerramientos evaluados podemos aseverar que:

- La radiación solar incidente total, sobre superficies horizontales, es mayor en la estación de verano, llegando a

registrar valores máximos de $950 [W/m^2]$ y mínimos en invierno de $650 [W/m^2]$.

- Los cerramientos orientados en dirección noreste a sudeste y noroeste a sud oeste *Figura 7* grupo A, no presentan cambios considerables de incidencia solar, sus comportamientos son recurrentes y cíclicos en el año, variando los mismos de acuerdo a la variación anual de la radiación global instantánea registrada.
- Los cerramientos orientados en dirección sudoeste *Figura 7* grupo B, no presentan incidencia de radiación directa en la estación de invierno, donde solo incide la radiación difusa.
- Los cerramientos orientados en dirección noreste *Figura 7* grupo C presentan grandes variaciones a lo largo del año. Registrando valores de incidencia altos en invierno y mínimos en verano, debido a la ubicación geográfica de la región.

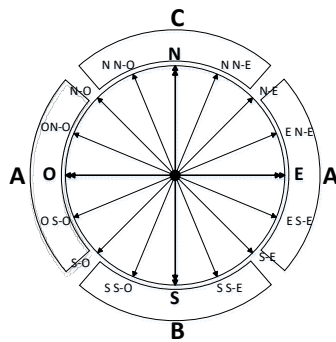


Figura 7. Orientaciones agrupadas según comportamiento en incidencia de radiación.

Se observa que la radiación solar incidente en la región tiene potencial para su explotación, y ésta debe ser considerada como una alternativa a largo plazo para la creciente demanda de energía de la región, al mismo tiempo buscando la independencia de las energías convencionales a partir de la

combustión de combustibles derivados del petróleo.

5. APLICACIONES.-

La aplicación de los datos históricos linealizados, en curvas características de un año tipo de radiación incidente en la región, tiene un campo amplio de uso, desde la formulación de proyectos a gran escala para su explotación, así como aplicaciones artesanales de servicios básicos en el hogar.

Desde un punto de vista específico, la caracterización de las incidencias solares en los cerramientos exteriores tiene una aplicación importante en el área de la arquitectura para el diseño y construcción, de cualquier tipo de edificaciones, brindando herramientas para la mejor captación de esta energía o en su caso un aislamiento adecuado.

Al mismo tiempo aporta de gran manera a la selección estratégica de materiales al momento de la construcción y/o mejoramiento de cualquier edificación.

6. CONCLUSIONES.-

La radiación incidente en la región se acentúa en la estación de verano y disminuye considerablemente en la estación de invierno.

En las superficies orientadas al norte y adyacentes, la incidencia solar es variable, con menor incidencia en la estación de verano y mayor incidencia solar en la estación de invierno, esta variación se debe más a la orientación del mismo.

Para las superficies orientadas al este, oeste y adyacentes, la incidencia solar es recurrente, y varia solo respecto a la incidencia total que se registra en la región.

Debido a la ubicación geográfica, la radiación incidente en el muro sud y orientaciones adyacentes es casi nula, la

radiación directa incidente en estas orientaciones, así mismo solo incide la radiación difusa la cual es pequeña en consideración de la primera.

Bibliografía

1. **UMSA, Universidad Mayor de San Andres.** *Laboratorio de geomagnetismo y meteorología en Patacamaya.* La Paz : s.n., 2006 - 2016.
2. **SENAMHI.** Servicio Nacional de meteorología e hidrología. [En línea] 10 de junio de 2017. [Citado el: 10 de junio de 2017.] <http://www.senamhi.gob.bo>.
3. **ASHRAE, Handbook of Fundamentals.** *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.* Atlanta : s.n., 2001.
4. *Tables of solar altitude and azimuth; Intensity and solar heat gain tables.* **Stephenson, D.G.** 1967, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Ottawa No 243.
5. **Benford, F. and J. E. Bock,** *A Time Analysis of Sunshine.* Trans. Am. Illumin. : Eng. Soc., 1939. 200.
6. **Edgar, Peñaranda Muñoz.** 2013, pág. 9., *CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR PARA LA CIUDAD DE ORURO A PARTIR DE LOS DATOS SOLARIMÉTRICOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA CARRERA DE ING. MECÁNICA ELECTROMECAÁNICA.*
7. **ENERGY, U. S. Depertament of.** Energy Pluss. [En línea] 10 de septiembre de 2014. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energypluss/weatherdata_about.cfm.
8. **E. Lamas,** Año tipo meteorológico de la ciudad de Oruro, 2013, Universidad Técnica de Oruro
9. **John A. Duffie, William A. Beckman.** *Solar Engineering of Thermal Processes.* United States of America : acid-free paper., 2013.
10. **ORT, Facultad de Arquitectura Universidad.** *Manual de energía solar térmica e instalaciones asociadas.* Uruguay : Imprenta Grafinel, 2009.
11. *The Interrelationship and Characteristic.* **Liu, B. Y. H. and R. C. Jordan,** 1960, Solar Energy, pág. 4.

LINEAMIENTOS DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO BASADAS EN NECESIDADES BIOCLIMÁTICAS PARA EL ALTIPLANO DE LA CIUDAD DE ORURO

Resumen

Las condiciones climáticas de Oruro presentan características particulares propias del altiplano, encontrándose a 17° Lat. Sur en la zona tropical, por su altitud a 3700 m.s.n.m, y con un contexto morfológico natural, que presenta una planicie inserta en la cordillera, permite que las condiciones climáticas cambien, generando un clima característico, la que presenta particularidades de clima cálido, templado y frío, durante casi todo el año los habitantes se encuentran fuera de la zona de confort, sobre todo en época de invierno.

El presente trabajo de investigación tiene el objetivo de demostrar, cuales las Necesidades Bioclimáticas que tienen los habitantes del altiplano de la ciudad de Oruro dentro de sus edificaciones y proponer diferentes acciones y consideraciones, que se deberán aplicar en el diseño arquitectónico, mediante una metodología de análisis climático científico, con propuesta de la Gráficas de Necesidades Bioclimáticas y respectivas acciones para el diseño arquitectónico en la ciudad de Oruro.

Palabras clave: *Arquitectura bioclimática, Zona de confort, Sostenibilidad, Análisis climático, Altiplano boliviano, Necesidades Bioclimáticas.*

Abstract

Oruro weather conditions has inherent characteristics of the Bolivian highlands. Located at 17° south latitude in the tropical zone of the planet, at an altitude of 3700 m.s.n.m. its geography presents a plain inserted in the Andean mountains chain, this situation creates a variation of climatic conditions ranging from; warm, temperate to cold. For much of the year its inhabitants are outside the comfort zone, being most extreme during the winter season.

This research aims to identify the bioclimatic needs of the inhabitants of the highland city of Oruro, within its buildings. Proposing a series of different considerations and actions to be implemented in the architectural design. All this based on a scientific methodology of climate analysis, providing a Graphic of Bioclimatic Needs with their respective actions for architectural design in the city of Oruro.

Key words: *Bioclimatic architectural, comfort zone, climate analysis, Bolivian highlands, Bioclimatic Needs*

1. Introducción

La relación de los primeros hombres con su medio natural fue muy cercana y se reflejó en sus intervenciones arquitectónicas, al adaptar sus moradas, que debían cumplir requisitos de protección y albergar a un clima característico del lugar, por ejemplo: en lugares de clima cálido sus moradas eran frescas planteando aberturas estratégicamente ubicadas, que permitían el paso de brisas que disminuía la temperatura en el interior; para lugares clima templado las ventanas estaban orientadas hacia la dirección de incidencia de radiación solar, para la época de invierno y permitir el paso del calor y no así en época de verano; para lugares con clima frío las edificaciones eran elaboradas con materiales robustos que recibían radiación solar durante todo el día almacenaban energía calorífica en su estructura y

transferían hacia el interior, cuando las temperaturas disminuían aún más.

Cada poblado es único ya que presenta características climáticas particulares acompañado de su relieve natural las que dan lugar a condiciones meteorológicas propias del sector, caracterizándolo de esta manera. La función y misión de un hecho arquitectónico será: el de proporcionar condiciones de confort ideales para el tipo de clima en el que se encuentra inserto, que respondan de manera apropiada a las necesidades y sobre todo a las térmicas de confort en el interior.

En el caso de la ciudad de Oruro las edificaciones por lo general no responden a su entorno natural, ya que son edificaciones con características y materiales modernos que no colaboran en el confort térmico en su interior. Es

primordial, la necesidad de un estudio que proponga características y acciones en el diseño arquitectónico, para que las edificaciones lleguen a satisfacer las necesidades de confort térmico en diferentes épocas del año.

2. Antecedentes

Las condiciones climáticas de la ciudad de Oruro presentan condiciones particulares propias, si bien se encuentra a los 17° Lat. Sur dentro de la zona tropical, por su altitud a 3706m.s.n.m, y en un contexto morfológico natural, con una planicie inserta en la cordillera, permite que las condiciones climáticas cambien, la temperatura desciende, se incrementa la velocidad del viento y los niveles de radiación se elevan, generando un clima característico del altiplano, la que presenta particularidades de clima cálido, templado y frío, con una temperatura promedio anual de 12°C (SENAMI 2015) y durante casi todo el año los habitantes se encuentran por debajo de la zona de confort, sobre todo en la época de invierno.

Con respecto a las edificaciones, en su mayoría no cumplen estándares que garanticen el confort térmico y el bienestar en el interior, edificaciones que además no tomaron en su diseño, consideraciones de arquitectura bioclimática específica, presentando problemas de disconfort térmico.

Las nuevas edificaciones en la ciudad de Oruro, no consideran un estudio científico preliminar del clima o quizá sí, pero este es muy elemental, no cuentan con una guía o lineamientos que proporcione los fundamentos necesarios para el diseño arquitectónico bioclimático, que garantice el confort térmico en el interior.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Identificar cuáles son las Necesidades Bioclimáticas, que se requiere en el interior de edificaciones arquitectónicas, del altiplano de la ciudad de Oruro, para determinar los lineamientos o acciones bioclimáticas que se deberán aplicar en el diseño arquitectónico.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar el análisis climático de la ciudad de Oruro mediante la elaboración e interpretación del climograma y la carta bioclimática.
- Realizar el análisis de soleamiento mediante la trayectoria solar, la posición del sol al medio día y la incidencia de radiación solar a través de un vidrio, en diferentes épocas.
- Realizar el análisis de intensidad y dirección de vientos en diferentes épocas.

- Proponer la Graficas de Necesidades Bioclimáticas con acciones para la el diseño arquitectónico en la ciudad de Oruro.

4. Justificación

4.1. Social

La propuesta a arribar, permitirá retomar saberes ancestrales de los antiguos pobladores de esta área altiplánica, ya que ellos tenían una relación más cercana con su medio natural, las vivencias y experiencias que se transmitieron y perfeccionaron de generación tras generación, arribaron a una propuesta arquitectónica que se adaptó a su entorno natural, de manera acertada.

La modernidad trajo consigo numerosos sistemas constructivos, materiales y modelos arquitectónicos, que, si bien resultaba y se adaptaba a diferentes lugares, al aplicarlo en el altiplano, estas no respondían de la misma manera. La propuesta científica, determinara los requisitos que se deberán emplear en el diseño para edificaciones arquitectónicas en el altiplano de la ciudad de Oruro, la que además permitirá una aceptación social por tratarse de soluciones que nuestros antepasados las empleaban.

4.2. Técnica

La Grafica de Necesidades Bioclimáticas con las acciones y consideraciones para edificaciones en el altiplano de la ciudad de Oruro, será aplicable para las futuras nuevas construcciones en general.

Por lo que facilitará a profesionales, constructores, personas en el área, para incorporar nuevos conceptos de diseño y selección de materiales de las nuevas edificaciones en la ciudad de Oruro.

4.3. Administrativa

En base al estudio realizado, será posible el desarrollo de políticas administrativas de construcción en la ciudad de Oruro; a objeto de que las edificaciones a ser construidas, permitan el confort térmico de sus habitantes.

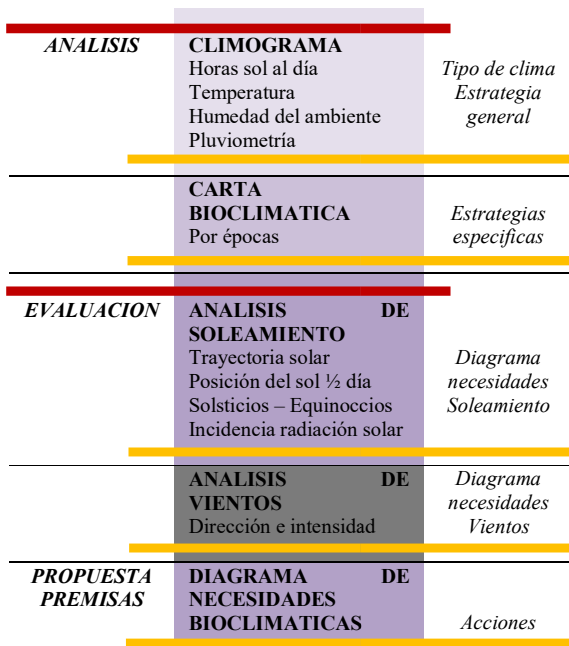
5. Ubicación

La ciudad de Oruro, que se encuentra en el altiplano boliviano departamento de Oruro en el sector oeste de Bolivia, específicamente en la Provincia Cercado, a una Latitud de 17°18'14''S y una Longitud de 67°07'O, a 3706 m.s.n.m. de altitud en una planicie altiplánica con una leve pendiente de este a oeste.

6. Metodología de trabajo

El Método que se ha empleado para el desarrollo del presente trabajo es el Método

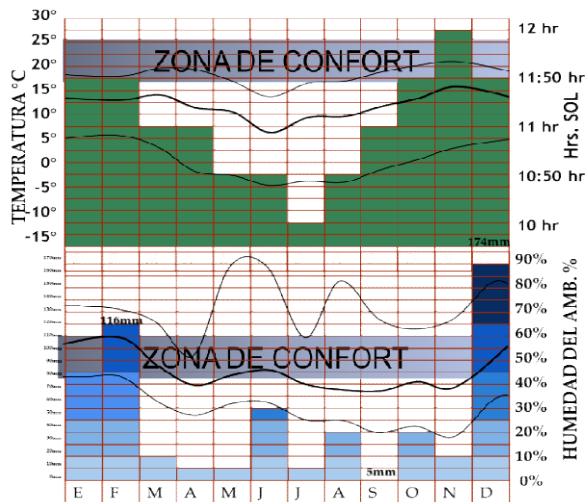
Deductivo, el análisis va de lo general a lo particular, tomando el siguiente procedimiento:



Graf. N°1 *Esquema metodológico para análisis climático*

7. Análisis climático

La aplicación del Climograma en el análisis climático, determina el tipo de clima al que corresponde y la estrategia general para direccionar el



análisis. Concluyendo en lo siguiente:

Graf. N°2 *Climograma ciudad de Oruro*
Fuente: *Elaboración propia*

- El altiplano de Oruro presenta características de clima cálido, ya que se halla ubicada a 17° de Lat. Sur, por su altitud a 3706 m.s.n.m. las

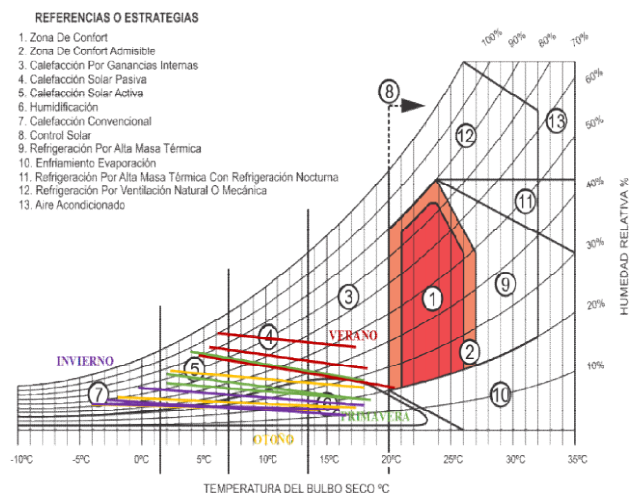
características generales cambian, la temperatura disminuye, encontrándose con temperaturas por debajo de la zona de confort (clima frío), exceptuando algunos días de verano de 12:00 a 14:00 con temperatura dentro de la zona de confort (Clima templado)

- La morfología natural del lugar presenta la planicie altiplánica inserta en la cordillera Occidental hacia el sector Oeste, acrecentando la velocidad de los vientos.
- La temperatura media anual de 12°C se encuentra por debajo de la zona de confort, exceptuando algunos días de verano.
- Existe una oscilación térmica pronunciada entre el día y la noche de 10°C a 20°C de diferencia.

Por lo tanto, la estrategia general a emplear será:

“ELEVAR LA TEMPERATURA DURANTE TODO EL AÑO Y SOBRE TODO EN INVIERNO”

La aplicación e interpretación de la carta Bioclimática de la ciudad de Oruro, indica que estrategias se deberán aplicar en el diseño arquitectónico, para que en el interior, el usuario



presente buenas condiciones de confort térmico.

Graf. N°3 *Carta Bioclimática ciudad de Oruro*
Fuente: *Elaboración propia*

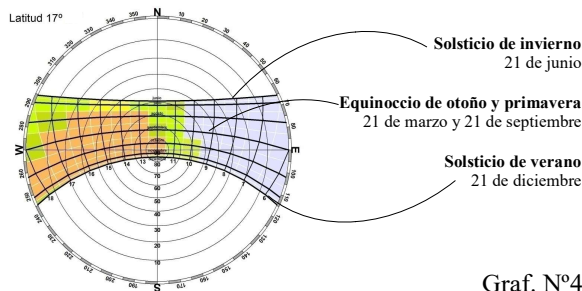
Por lo tanto, se requiere aplicar en propuesta, las siguientes estrategias:

- Calefacción por ganancias internas
- Calefacción solar pasiva
- Calefacción solar activa
- Calefacción convencional
- Humidificación
- Control solar

7.1. Análisis soleamiento

El análisis de soleamiento nos determinara la incidencia de radiación solar en las diferentes orientaciones ya que estas varían en función a la estación, si bien se requiere “Eleva la temperatura durante todo el año y sobre todo en época de invierno” mediante ganancias térmicas por “calefacción solar pasiva y calefacción solar activa”, se deberá emplear para la época de verano “control solar” para evitar que la temperatura se incremente más de lo requerido.

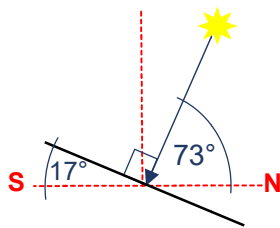
La trayectoria solar variará en función a la época del año, la ciudad de Oruro por encontrarse en el hemisferio Sur, el ángulo de los rayos solares será mayormente por la orientación norte.



Graf. N°4

Trayectoria solar en diferentes épocas del año

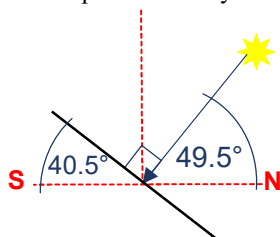
En los Equinoccios tanto de primavera el 21 de septiembre como el de otoño el 21 de marzo, el sol amanece exactamente del Este y el ocaso se da exactamente por el Oeste, la duración del día y la noche son similares, existe una inclinación al medio día de 73°, la fachada norte recibe radiación solar directa.



Graf. N°5

Sol 1/2 día Equinoccio Primavera y Otoño

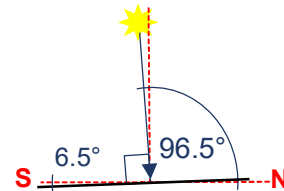
En el Solsticio de Invierno el 21 de junio, el sol amanece aproximadamente 20° desde el este hacia el noreste y el ocaso se da 20° desde el oeste hacia el noroeste, la duración de horas sol durante el día disminuye y la noche es más larga, existe una inclinación al medio día de 49.5° del norte, la fachada norte es la que recibe mayor radiación solar.



Graf. N°6

Sol 1/2 día Solsticio de Invierno

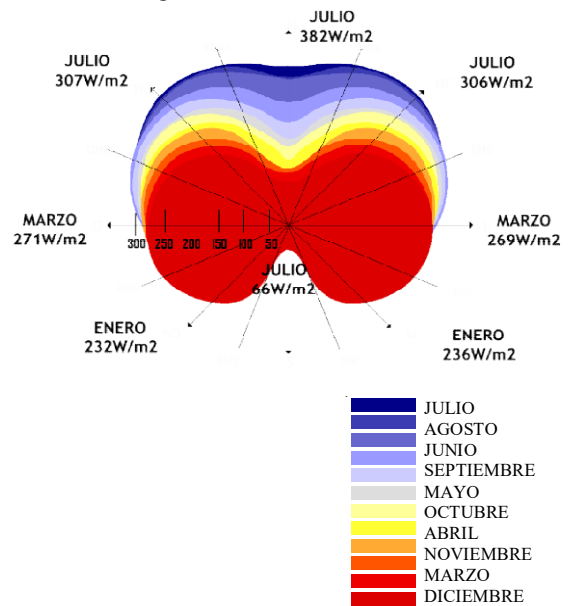
Para el Solsticio de Verano el 21 de Diciembre, el sol amanece aproximadamente 20° desde el este hacia el sudeste y el ocaso se da 20° desde el oeste hacia el sudoeste, la duración de horas sol durante el día se incrementa y la noche es más corta, existe una inclinación al medio día de 96.5° del norte, esto quiere decir que la fachada sur recibe radiación solar directa.



Graf. N°7

Sol 1/2 día Solsticio Verano

En función a los valores de la incidencia de radiación solar a través de un vidrio, en diferentes orientaciones y diferentes épocas del año, se determina lo siguiente:



Graf. N°8

Incidencia de radiación solar a través de un vidrio W/m2

Para la época de verano, se observa que la mayor incidencia de radiación solar se da hacia la orientación Este y Oeste 269 W/m2 y 271 W/m2

respectivamente, disminuyendo de manera considerable hacia el Norte y Sud.

Por el contrario, para la época de invierno la mayor incidencia de radiación solar se da hacia el norte con 382 W/m², hacia el ENE 306 W/m², hacia el ONO 307 W/m², disminuyendo notoriamente hacia el Sud con 66W/m².

Para la época de primavera y otoño la incidencia de radiación solar se da como transición entre estos dos extremos de invierno y verano.

7.2. Análisis de vientos

El análisis de vientos nos determinara la intensidad y dirección de vientos en diferentes épocas, si bien se requiere: “Eleva la temperatura durante todo el año y sobre todo en época de invierno” será necesario evitar los vientos según su denominación, aquellos que incrementen el desconfort térmico durante todo el año y sobre todo para la época de invierno.

La morfología del entorno natural de la ciudad de Oruro presenta una característica peculiar, la ciudad se encuentra en la ladera Oeste de una cadena montañosa, la que por su proporción funciona como una barrera natural contra los vientos que provienen de la zona Oeste, la intensidad de los vientos durante casi todo el año es de Brisa Moderada de 12 a 19 Km/hr, excepto en Julio que disminuye a Brisa Tenue, los vientos más fuertes se incrementan en la época de otoño llegando a 25 Km/hr.

8. Necesidades y acciones para el diseño arquitectónico bioclimático en la ciudad de Oruro

Con el análisis de las características de soleamiento y vientos, direccionadas con el tipo de clima al que corresponde, más la estrategia general que se determinó de la interpretación del climograma de la ciudad de Oruro es:

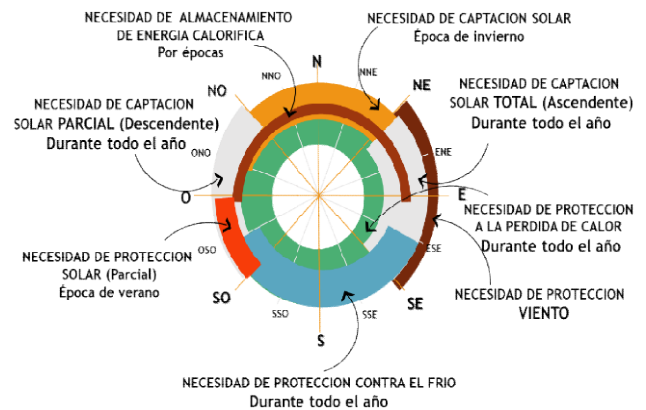
“Eleva la temperatura durante todo el año y sobre todo en época de invierno”

Las estrategias específicas resultado de la aplicación de la Carta bioclimática de Givoni, para mejorar las condiciones de confort, en el interior de hechos arquitectónico con el empleo de:

- Calefacción por ganancias internas
- Calefacción solar pasiva
- Calefacción solar activa
- Calefacción convencional
- Control solar

Se propone las siguientes “Necesidades arquitectónicas bioclimáticas” que llegarán a

satisfacer, mediante consideraciones y acciones, en el diseño y ejecución de la obra arquitectónica.



Esta gráfica nos determina cuales las diversas necesidades y en que orientaciones se deberá aplicar las acciones, para mejorar las condiciones de confort (térmicas) en el interior de las edificaciones arquitectónicas, la que se detalla en el siguiente Diagrama de necesidades bioclimáticas como propuesta:

Graf. N°9 **Diagrama de necesidades bioclimáticas para la ciudad de Oruro**

Para la **NECESIDAD DE CAPTACIÓN SOLAR** en época de invierno, que va desde la orientación de ENE hasta ONO, se aplicaran las siguientes acciones:

Empleo de Calefacción solar pasiva mediante:

- Con aportes directos como:
 - Ubicación de ambientes de mayor permanencia dependiendo de la actividad y las prioridades.
 - Abertura puertas y ventanas en esta dirección.
 - Relación de aberturas con materiales de alta inercia térmica, para acumulación y transferencia de calor.
- Con aportes indirectos como:
 - El empleo de muro trombe
 - Empleo de solera de piedra
 - Empleo de materiales robustos con elevada inercia térmica además de una excelente conductividad.
- Con aportes combinados como:
 - Invernadero adosado, generando espacios de transición, de uso múltiple o jardines internos.
- Con aportes independientes como:
 - Solera de piedra

- Empleo de colectores solares con materiales de elevado coeficiente de absorción de energía calorífica como: piedra, hormigón, contenedores de agua, entre otros más, ubicados en sectores con bastante incidencia de radiación solar, para almacenar y transferir mediante ductos hacia el interior de la edificación.

Para la **NECESIDAD DE PROTECCIÓN DEL VIENTO** durante todo el año que va desde la orientación NE hacia el SE, se aplicaran las siguientes acciones:

- Ubicación de ambientes de menor permanencia
- Empleo de barreras contra el viento como:
 - Barreras naturales, masas de vegetación intercalando entre vegetación alta, media y baja, la hilera de vegetación próxima a la edificación deberá ser de hoja caduca para permitir el paso de la radiación solar en época de invierno o ubicarla a una distancia inferior a los 49.6° de proyección de la sombra, sin alejarse del sector controlado por la vegetación.
 - Elementos arquitectónicos que se encuentren a una distancia que generen espacios controlados previos a aberturas como puertas y ventanas.
 - Elementos del hecho arquitectónico que permitan obstaculizar brisas moderadas como:
 - Persianas estructurales
 - Fachadas rompe vientos
 - Cambio de dirección de aberturas.

Para la **NECESIDAD DE CAPTACIÓN SOLAR TOTAL (ascendente)** durante todo el año que va desde la orientación NE hasta SE. Ya que los datos de temperatura mínima se ven al amanecer, es necesario recibir la mayor cantidad de radiación solar durante el amanecer y a lo largo de la mañana para lo cual se aplicarán las siguientes acciones:

- Empleo de calefacción solar pasiva con aportes directos como:
 - Ubicación de ambientes de mayor permanencia durante la mañana priorizando tipo de actividades.
 - Aberturas de puertas y ventanas en esta dirección.
 - Relación de aberturas con materiales de alta inercia térmica, para acumulación y transferencia de calor directa.

Para la **NECESIDAD DE PROTECCIÓN CONTRA EL FRIO** durante todo el año que va desde

la orientación SE hasta el SO, se aplicaran las siguientes acciones:

- Empleo de materiales aislantes como:
 - Muros dobles
 - Muros con cámara de aire
 - Cubiertas con cámara de aire
- Menor cantidad de aberturas como puertas y ventanas
- En caso que se tenga la única orientación para accesos se deberá emplear ambiente de transición entre el exterior y el interior de la edificación
- Si se ubicaran ventanas en esta orientación, se deberá emplear contraventanas, cámara de aire en cristales y sellar fisuras para evitar infiltraciones.

Para la **NECESIDAD DE CONTROL SOLAR** por épocas que va desde la orientación NO hasta el SO, se aplicaran las siguientes acciones:

- Empleo de elementos de control solar horizontales como
 - Aleros, volados pronunciados
 - Pórticos
 - Pantallas
 - Toldos
 - Repisas
 - Pérgolas
 - Persianas horizontales
- Empleo de elementos de control solar verticales
 - Repisas
 - Persianas verticales
- Empleo de elementos de control solar combinadas
 - Celosías
 - Partesol
 - Marcos

Para la **NECESIDAD DE CAPTACIÓN TÉRMICA** para las épocas de otoño, invierno y primavera desde la orientación NO hasta el SO. Se deberá tener mucho cuidado con esta orientación ya que coincide con la Necesidad de control solar, para lo cual se detalla la siguiente acción:

- Muro trombe ventilado, en época de otoño, invierno y primavera funcione de la manera tradicional; pero en época de verano cuando nos encontremos dentro la zona de confort se habilitará el paso del aire entre el cristal y el muro robusto, permitiendo únicamente almacenar energía calorífica en el muro robusto la cual se desprenderá en un lapso de 6 a 8 horas, durante la noche cuando la temperatura se encuentre por debajo de la zona de confort.

Para la **NECESIDAD DE PROTECCIÓN A LA PERDIDA DE CALOR** durante todo el año a

toda la envolvente de la edificación, se emplearan las siguientes acciones:

Empleo de materiales robustos con elevada inercia térmica.

La carta bioclimática recomienda a demás el empleo de **CALEFACCIÓN CONVENCIONAL**, para lo que se propone las siguientes acciones en el diseño arquitectónico:

- Chimeneas a leña o gas natural.
- Calefacción mediante agua caliente, empleando diferentes unidades terminales.

9. Conclusiones

El altiplano de la ciudad de Oruro presenta características de clima cálido, templado y frío, específico de un clima Altiplánico a 3706 m.s.n.m. a 17° de Lat. Sur. La temperatura media de todo el año se encuentra por debajo de la zona de confort, exceptuando algunos días de verano. Existe una oscilación térmica pronunciada entre el día y la noche de entre 10 a 20 grados de diferencia.

La estrategia general a aplicar en el diseño será:

“ELEVAR LA TEMPERATURA DURANTE TODO EL AÑO Y SOBRE TODO EN INVIERNO”

Para que edificaciones arquitectónicas en la ciudad de Oruro, presenten buenas condiciones de confort térmico interno, requieren aplicar en su propuesta las siguientes estrategias:

- *calefacción por ganancias internas*
- *calefacción solar pasiva*
- *calefacción solar activa*
- *calefacción convencional*
- *control solar*

La grafica de “Necesidades bioclimáticas” para el diseño arquitectónico en la ciudad de Oruro, es el resultado de todo el análisis, que al aplicarla llegará a satisfacer necesidades de confort térmico, mediante la aplicación de las consideraciones y acciones, en el diseño y ejecución de la obra arquitectónica.

10. Referencias

Libros

1. BROWN, G.Z: “Sol, luz y viento” Estrategias para el diseño arquitectónico, Editorial Trillas, México, 1ª Edición, Agosto de 1994.
2. HESSELGREN, Sven: “El hombre y su percepción del ambiente urbano”, Editorial Limusa, México, 1ª Edición, 1980.
3. HIGUERAS, Esther: “Urbanismo bioclimático” Criterios medioambientales en la ordenación de

asentamientos, Tesis de Doctorado en urbanismo, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid, Octubre 1999.

4. LACOMBA, Ruth y otros: “Manual de arquitectura solar”, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1ª Edición español, 1998.
5. “Arquitectura sostenible”, Lexus Editores, España, 1ª Edición, 2014.
6. OLGAY, Víctor: “Arquitectura y clima” Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1ª Edición español, 1998.
7. RODRIGUEZ, Viqueira y otros: “Introducción a la arquitectura bioclimática”, Noriega Editores, México, 2002.

Revistas

1. “El clima”, Bolivia Ecológica, N°14, Fundación Simón I Patiño, Cochabamba – Bolivia, 1999, pp. 1 – 23.
2. “Estrategias urbanas para urbanizaciones”, CA Ciudad / Arquitectura, N°100, Colegio de Arquitectos de Chile, Santiago de Chile. 2000, pp. 52 - 54
3. “Planificación de la imagen urbana”, CA Ciudad / Arquitectura, N°100, Colegio de Arquitectos de Chile, Santiago de Chile. 2000, pp. 54 - 56

CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN TÉRMICA APLICADA EN EL DISEÑO DE LA VIVIENDA BIOCLIMÁTICA PIA.ACC-UTO.60

Resumen

El presente trabajo describe una propuesta de optimización térmica a los criterios constructivos, aplicados en el diseño de la vivienda bioclimática del proyecto de investigación PIA.ACC-UTO.60, basados en la generación y discriminación de variables, que puedan ser modificadas con un criterio térmico, tomando en cuenta el diseño arquitectónico en sí, que rescata la arquitectura ancestral y el modelo bioclimático permitiendo a su vez diferenciar el rendimiento térmico de la vivienda al ser evaluada con la conceptualización inicial de un diseño convencional.

La simulación térmica se ha realizado mediante el uso de los softwares desarrollados en el Instituto de Investigación Mecánica-Electromecánica Facultad Nacional de Ingeniería, **Siter v1.0 y Hoja de cálculo para determinar cargas térmicas aplicando el método "RTS"**, los resultados muestran la diferencia del aprovechamiento energético en dos criterios: en el primero se evalúan las condiciones térmicas de la propuesta arquitectónica, considerando los criterios constructivos convencionales en la región; en el segundo se optimiza el modelo con criterios térmicos a partir de la simulación y conceptos desarrollados en el proyecto de investigación, como la selección adecuada del material, la inercia térmica, la orientación, la aislación térmica eficiente, entre otros. El contraste de ambos resultados se expone en el presente documento.

La optimización del modelo constructivo y la simulación predictiva del rendimiento térmico de la vivienda, e incluido las emisiones de CO₂, han permitido definir el modelo base para la construcción del prototipo de vivienda bioclimática en el proyecto de investigación PIA.ACC-UTO.60.

Palabras clave: Vivienda bioclimática, Eficiencia Energética, Simulación, Optimización, ahorro de energía.

1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura bioclimática puede definirse como el diseño de edificaciones, pensado para lograr un máximo confort dentro del edificio con el mínimo gasto energético (Henshaw Jones, 2003). Por lo tanto, una vivienda bioclimática aprovecha su entorno, transformando las condiciones climáticas externas en el confort térmico del interior, gracias al diseño inteligente, utilizando los materiales más simples y de esa manera convirtiendo los problemas en soluciones. A esta simplicidad se llega a través del conocimiento y la buena utilización de los elementos reguladores del clima y las energías renovables.

En este sentido, los diseños arquitectónicos pueden optimizarse seleccionando y perfeccionando un mínimo de variables trascendentales que provoquen una máxima eficiencia en el aprovechamiento de la energía en busca del confort de sus habitantes.

Para la vivienda bioclimática PIA.ACC-UTO.60, hay alta holgura en la selección de estas variables, siendo necesario efectuar la simulación y evaluación térmica en repetidas veces, acciones que pronostican el comportamiento de la demanda energética, que tendrá el edificio al someterse a las condiciones medioambientales normales y críticas de la región.

2. ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA VIVIENDA

El análisis del desempeño térmico de vivienda, consiste en realizar un procedimiento de cálculo manual o con un programa computacional, para modelar matemáticamente la integración de las variables recurrentes en procesos térmicos vinculada al confort térmico de la vivienda.

Los beneficios de la simulación térmica, anterior a la etapa de diseño, aportan los siguientes beneficios a la propuesta:

- Seleccionar la orientación perimetral y validar el resultado como el criterio de optimizar el aprovechamiento de la energía solar.
- Seleccionar los materiales de construcción en paredes, techos y suelos y validar la selección óptima con enfoque en el almacenamiento y distribución de la energía de exterior al interior.
- Seleccionar los materiales en ventanas y validar el resultado óptimo enfocado en la eficiencia térmica y ahorro energético.
- Evaluar las pérdidas energéticas por ventilación, infiltración, entre otros.
- Determinar la renovación de aire adecuada para la zona de confort.

Tras las modificaciones realizadas, después de la evaluación y validación del modelo a través de la simulación, los resultados han permitido definir el modelo base para la construcción del prototipo de vivienda bioclimática en el proyecto de investigación PIA.ACC-UTO.60.

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El proceso metodológico se fundamenta en la teoría del diseño basado en el desempeño. Esta teoría utiliza como punto de partida el comportamiento de la vivienda convencional (condiciones desfavorables desde el punto de vista térmico) y busca optimizarlo por medio de alteraciones secuenciales.

Primeramente se buscan y ordenan las variables fundamentales por relevancia y prioridad.

Una vez definidas las variables, se determina un modelo constructivo que sea estándar en la región y se define valores de las variables que respondan a ese modelo, luego se plantean las mejoras y se busca el resultado óptimo de aprovechamiento energético, en el primer parámetro; ya modificado éste, se comienza el proceso nuevamente para el siguiente, así sucesivamente hasta alcanzar modificar todos los parámetros de mayor influencia en el cálculo. Cuando se alcance la optimización de todos los parámetros de decisión se reúnen los valores hallados y en referencia a ellos se establece el modelo constructivo de características óptimas.

Finalmente se realizan simulaciones globales del edificio estándar y del edificio con las modificaciones óptimas obtenidas y se contrastan, los efectos obtenidos en ambos casos.

La principal herramienta para llevar a cabo esta metodología es la simulación térmica, para ello se ha utilizado modelos digitales basados en el concepto de evaluación que responde al cálculo simplificado del balance de energía y la adecuación del método de la serie de tiempo radiante. La presente investigación hace uso de los programas SITER V1.0 y HOJA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR CARGAS TÉRMICA, ambos softwares fueron desarrollados en la Facultad Nacional de Ingeniería de la ciudad de Oruro.

- **SITER V1.0:** El programa de simulación energética de edificios SITER V1.0 es una plataforma desarrollada dentro del Proyecto de Investigación “Tecnologías de Climatización Térmica para Viviendas del Altiplano Boliviano”, en la carrera de Ingeniería Mecánica – Electromecánica de la Facultad Nacional de Ingeniería. Este software determina la demanda energética

total para la calefacción, refrigeración y para el servicio de agua caliente sanitaria (ACS) de edificios, en función de sus dimensiones, orientación, ventilación y asombamiento entre otras variables. A partir del análisis horario, durante un año tipo, de las condiciones térmicas en exterior como en el interior, en la metodología de cálculo utiliza un balance de energía simplificada y el método de serie de tiempo radiante.

- **Hoja de Cálculo para Determinar Cargas Térmicas Usando el Método Radiant Time Series “RTS”:** Este software es programado en la plataforma Excel en la Carrera de Ingeniería Mecánica – Electromecánica, de la Universidad Técnica de Oruro en la gestión 2014.

Introduciendo condiciones de diseño, dimensionamiento del edificio, cargas internas por personas, iluminación y equipos y ventilación, el software determina la demanda térmica de energía en un intervalo de 24 horas. A partir de estos cálculos se puede obtener la demanda máxima para calefacción y refrigeración. El motor de cálculo es la serie de tiempo radiante, método que disgrega cada una de las aportaciones vinculadas a la evaluación, esta metodología fue desarrollada y de propiedad de ASHRAE, Estado Unidos y libre para los usuarios finales

4. OPTIMIZACIÓN DE LA VIVIENDA Y VARIABLES DE DECISIÓN

Una vivienda desde el concepto térmico, es un sistema dependiente de diversos factores que interactúan a través del tiempo y gobiernan los mecanismos de transferencia de calor desde y hacia el interior de la misma, cuyo resultado es la modificación de la condición meteorológica interior.

Cuando el caso de estudio corresponde a un diseño establecido como el de la vivienda PIA.ACC-UTO.60, las variables de decisión trascendentales que logren modificar el rendimiento térmico de la vivienda son: La orientación de la vivienda respecto al recorrido solar, el uso de materiales de construcción, la calidad de ventilación y el uso de elementos bioclimáticos (Figura 1).

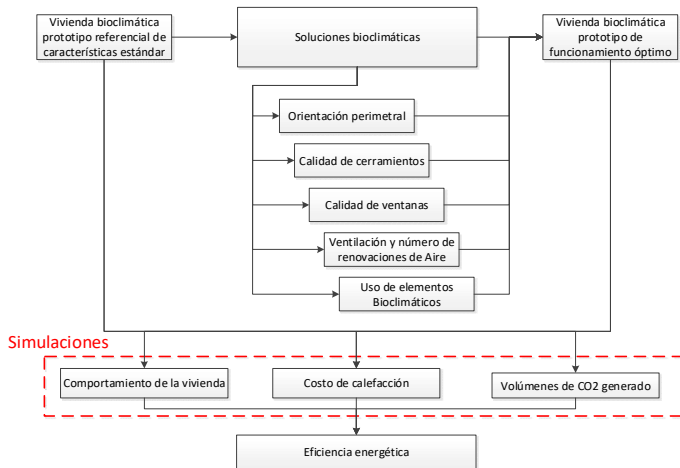


Figura 1. Relación entre variables.

- **Orientación perimetral:** La orientación perimetral es función de la trayectoria solar, en climas fríos como en el altiplano boliviano, se pretende aprovechar la radiación solar al máximo. Se determina la orientación óptima al rotar la vivienda sobre un eje vertical imaginario para sumar en cada orientación la energía total aprovechada; al final, la posición que haya captado mayor incidencia solar, sugerirá la posición final del modelo.

$$E_{Tot.Inc} = \sum \left(\frac{86,4}{1000} \cdot ITD \cdot Sup_{libre} \right)$$

Dónde:

$E_{Tot.Inc}$ = Energía total incidente en la vivienda por radiación solar directa en un día promedio del mes [MJ].

ITD = Irradiación total diaria por orientaciones $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Sup_{libre} = Superficie de pared no sombrada $[m^2]$.

La definición de la orientación en algunos casos no siempre puede ser la acertada, está en función de las características del espacio disponible para la construcción, la ubicación que esta disponga, la arquitectura alrededor, sin embargo es recomendable pretender un desarrollo con un diseño adecuado, es decir, máxima incidencia solar en la mayor área expuesta al exterior.

- **Cerramiento opacos:** Los materiales de construcción son de importancia en la valoración energética de una vivienda, la selección adecuada de los materiales, permite aislar la zona térmica de las condiciones meteorológicas externas, sí además, se incluye propiedades como

elementos pasivos (alta inercia térmica en los cerramientos), lo que permite acumular energía térmica de manera natural, para una vez se enfrió la zona térmica, ceder y mantener condiciones apropiadas de confort.

Ahí la necesidad de trabajar los muros con materiales del entorno, en el caso del altiplano boliviano podría enfocarse en materiales naturales primarios como el adobe, paja, piedra o madera, y/o los materiales cerámicos o pétreos como el ladrillo y adobillo, todos ellos poseen propiedades térmicas e inercia térmica interesantes.

La inercia térmica de los materiales puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

$$I = \sum (\alpha_i \cdot \sqrt{k_i \cdot \rho_i \cdot C_i})$$

Dónde:

I = Inercia térmica de materiales $\left[\frac{J}{m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}} \right]$

α = Fracción lineal del material

k = conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

ρ = Densidad del material $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

C = Calor específico del material $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$

El factor “U” como se le denomina comúnmente, es el coeficiente global de transferencia de calor, resultante de evaluar la capacidad térmica por conducción de las diferentes capas que componen el cerramiento, más, la transferencia de calor por convección en el interior y exterior del material, expresada en el sistema internacional en $W/m^2 \cdot K$.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{k_1} + \dots + \frac{e_n}{k_n} + \frac{1}{h_e}$$

Dónde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

h_i = Coeficiente de transferencia de calor por convección interior $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

h_e = Coeficiente de transferencia de calor por convección exterior $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

e_i = espesor transversal del material [m]

k_i = Coeficiente de transferencia de calor por conducción $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

- **Ventanas:**

La ubicación y orientación de las ventanas de las viviendas tendrán gran impacto en la iluminación y calefacción natural, con la ubicación adecuada se proveerá la energía emitida por el sol y podrá distribuirse en el interior de la vivienda.

Cuando incrementa la temperatura, por la incidencia solar en una gran superficie de ventana, se podría tener un sobrecalentamiento en el interior de la casa, en tales circunstancias será necesario proteger las superficies acristaladas mediante cobertizos, cortinas o filtros solares, acciones que impidan el ingreso de la radiación solar de manera directa.

Una preocupación al momento de incluir amplias áreas vidriadas en las paredes es el aislamiento térmico de la ventana. En este sentido, se debe escoger un vidrio adecuado para las ventanas, lo recomendable es disponer de vidrios cuya conductividad térmica sea reducida, o en su caso incluir dos vidrios sencillos con una separación entre ambos, de esa manera mejorar la propiedad térmica del cristal.

La transmitancia se puede definir en razón del coeficiente global de transferencia de calor a través de los vidrios y marcos expresado en la ecuación anterior

Tabla 1. Coeficiente global de transferencia de calor en vidrios.

Tipo de acristalamiento	$U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
Monolítico	5,7
Doble acristalamiento	3,3 a 2,7
Triple acristalamiento	2,9 a 1,6
Doble acristalamiento ATR	2,5 a 1,1
Triple acristalamiento ATR	2,6 a 0,9
Doble acristalamiento ATR mejorado	2,0 a 0,5

Fuente: (Ramos Vilariño, 2011).

El factor solar del vidrio, es la relación entre la cantidad de radiación que se transmite al interior del edificio, en relación a la energía reflejada al exterior. El tipo de vidrio aconsejable para cada región, se selecciona en función del clima; en climas fríos, como en el altiplano, interesa que exista mayor ingreso de luz y/o energía por las ventanas, por ello, es necesario un vidrio que permita mayor ingreso de energía solar y cambiada la longitud de onda no permita salir la energía acumulada.

Tabla 2. Factor Solar de tipos de vidrios.

PRODUCTO	TL(%)	g
966 PLANILUX 6 mm	88.52	0.82
966 PLANILUX 8 mm	87.48	0.80
966 PARSOL GRIS 6 mm	41.36	0.57
966 PARSOL VERDE 6 mm	73.00	0.57
966 COOL-LITE ST 120 6 mm	20.04	0.30
966 COOL-LITE ST 420 6 mm	16.78	0.28
966 PLANITHERM ULTRA N 6 mm	87.50	0.63
966 PLANISTAR 6mm	77.90	0.47
966 COOL-LITE KNT 164 6 mm	63.70	0.53
966 COOL-LITE XTREME 6 mm	66.40	0.33
966 COOL-LITE ST 150 6 mm	50.74	0.56

Fuente: (Ramos Vilariño, 2011)

- **Número de renovaciones de aire:** Una vivienda eficiente necesita ventilación y cambios de aire regulares para evitar la acumulación de aire viciado. El confort y el bienestar de sus habitantes dependen de tener aire fresco y renovado periódicamente.

El metabolismo vital de las personas exige un determinado consumo de oxígeno en función de variados factores tales como el tamaño, género, tipo de actividad realizada, etc., lo que obliga a una renovación mínima del aire de los ocupantes. Por otra parte la renovación excesiva puede repercutir desfavorablemente en el confort térmico de la vivienda.

Para determinar los niveles de ventilación necesarios en la vivienda recurriremos a la normativa (CTE-DB-HS-3).

Donde la tasa de cambio de aire (ACPH por sus siglas en inglés), se mide a partir del caudal de ingreso

$$ACPH = \frac{60 \cdot Q}{Vol}$$

Dónde:

ACPH = Número de cambios de aire por hora. Los valores más altos corresponden a una mayor ventilación.

Q = Tasa de flujo volumétrico $\left[\frac{m^3}{m} \right]$

V = Volumen $[m^3]$.

- **Comportamiento de la vivienda:** La curva de comportamiento térmico de la vivienda es la representación gráfica del historial de eficiencia térmica de la vivienda en un periodo definido y de los requerimientos energéticos necesarios para lograr confort interno. También a través de esta se consigue manifestar la divergencia entre la temperatura de confort interior con la temperatura instantánea.
- **Costos por calefacción:** Para determinar el gasto por el consumo de energía

convencional en una vivienda, se cuantifica la demanda energética para calefacción, y se relaciona con el costo unitario de las energías utilizada por el servicio del equipo, de esa manera se conoce los precios diarios y anuales de la calefacción del recinto.

$$Costo_{anual} = \frac{E \cdot C_U}{PCS}$$

Dónde:

$Costo_{anual}$: Precio de calefacción [Bs/año]

E : Energía consumida para climatización en un año [kWh/año]

C_U : Costo unitario de energía ofertada [Bs/m³]

PCS : Poder calorífico superior [kWh/m³]

- Cantidad de CO₂ generado:

En climatización, la contaminación al medio ambiente está directamente relacionada con la generación de dióxido de carbono y otros elementos no deseados, en el objeto de mantener condiciones de confort de la vivienda, utilizando diferentes recursos energéticos (electricidad, gas natural, entre otros).

Cuantificando la demanda energética para climatización instantánea se puede conocer la cantidad de contaminación generada.

$$m_{CO_2} = f(E_o)$$

Dónde:

m_{CO_2} : Cantidad de CO₂ generada [Tn/año]

E_o : Energía instantánea consumida para climatización [kWh]

5. RESULTADOS

5.1. Vivienda estándar referencial

La vivienda PIA.ACC-UTO.60 con construcción estándar responde al modelo arquitectónico y las preferencias populares de construcción que existen en la zona altiplánica boliviana (base la construcción periurbana de Oruro).

- **Orientación:** De acuerdo a planos iniciales, la fachada es orientada con el norte solar.
- **Cerramientos opacos:** Resultado de un estudio estadístico que determina usar para todas las superficies opacas un cerramiento tipo-0 (Ladrillo y yeso y mortero), para todos los suelos del interior se utilizará el Cerramiento tipo-1 (Mortero, piedra andesita y tierra vegetal) y en todos los techos se utilizará el Cerramiento tipo-2 (Techo de calamina).

- **Cerramientos Semitransparentes:** En todas las áreas vidriadas se utilizará la ventana estándar de vidrio monolítico de acuerdo a la descripción realizada en la tabla anterior.tipo-3.

- **Renovaciones de aire por hora:**El número de renovaciones hora es calculado de acuerdo con la Norma UNE, para viviendas unifamiliares el número de renovaciones hora varía entre 0.5 a 1.5.

5.2. Vivienda Mejorada

La vivienda de funcionamiento óptimo responde al mismo modelo arquitectónico, en ella se optimizan parámetros en las soluciones constructivas, orientación, entre otros.

- **Orientación:** Se determina el mejor aprovechamiento solar cuando la fachada es orientada con el norte solar, aspecto que se coincide con el planteamiento arquitectónico.

- **Cerramientos opacos:** Resultado de la formulación u optimización de los materiales son:

Las superficies verticales: aplica el cerramiento tipo-4 (Mortero, ladrillo 16 huecos, aislación, mortero y yeso) en la orientación sur en vez de ladrillo se ha incorporado adobe, en orientación esteladrillo de 6 huecos,mantenido la composición del cerramiento tipo-4.

Para suelos y áreas internas se utilizará la capa base con aislamiento compuesta por los siguientes materiales (base aislada de paja, ladrillo gambote y mortero con piedra); el acabado varía: el dormitorio se recomienda utilizarmachimbre, la cocina y baño se utilizará piso de cerámica tipo-5

Finalmente, en el techo se utilizará el cerramiento tipo-5 (Calamina y cámara de aire horizontal, y la inclusión de cielo raso con aislante).

El aislante térmico es, polietileno de alta densidad de 4 cm de espesor.

- **Cerramientos Semitransparentes:** En todas las áreas vidriadas se utilizará la ventana estándar de tipo-6 (Vidrio simple de 4mm de espesor con cámara de aire intermedia entre ambos).

- **Renovaciones de aire por hora:**de acuerdo al cálculo:

$$NRH = 0,753$$

6. RESULTADOS SIMULACIONES

6.1. Comparación demandas máximas por refrigeración y calefacción en ambos modelos

Las demandas energéticas máximas requeridas para la calefacción, de las viviendas referencial y optimizada en un año con condiciones medioambientales promedio, son obtenidas por simulaciones en el programa “HOJA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR CARGAS TÉRMICAS USANDO EL MÉTODO RADIANT TIME SERIES “RTS”. La confrontación de los resultados obtenidos son expuestas en la siguiente tabla, donde además se resalta el porcentaje diferencial alcanzado por la comparación de ambos modelos.

Tabla 3. Comparación demandas de energía máxima.

	Edificio de referencia	Edificio de funcionamiento óptimo	Diferencia alcanzada	Porcentaje diferencial alcanzado
Calefacción [W]	11.923,20	4.089,05	7.834,15	65,71%

6.2. Comparación de la demanda energética por calefacción de la vivienda

La demanda energética anual, mensual y diaria en relación a la superficie habitable del modelo en ambos casos fueron determinados mediante simulaciones en el programa SITER V.1.0., y son contrastadas en la siguiente tabla.

Tabla 4. Comparación entre las demandas energéticas para calefacción.

	Edificio de referencia	Edificio de funcionamiento óptimo	Ahorro alcanzado	Porcentaje de ahorro alcanzado
kWh/año	41.923,000	17.038,000	24.885,0	59,36%
kWh/día	115,173	46,808	68,365	
kWh/m ²	1302,000	529,100	772,900	

6.3. Comparación de costos por calefacción de la vivienda

El costo económico anual, diario por superficie habitable, que conlleva el uso de energía convencional para la calefacción de la vivienda PIA.ACC-UTO.60 y el modelo optimizado, se obtuvieron en relación a los consumos energéticos obtenidos en el anterior párrafo y es expresado en unidades monetarias.

Tabla 5. Comparación costo económico necesarios para calefacción en ambos casos.

	Edificio referencial	Edificio de funcionamiento óptimo	Ahorro alcanzado
Bs/año	3.015,739	1.225,632	1.791,100
Bs/día	8,285	3,367	4,918
Bs/m ²	93,660	38,061	55,050

6.4. Contaminación por calefacción de la vivienda

Del mismo modo, la generación de dióxido de carbono anual, diaria y en relación a la superficie habitable, en ambos modelos se obtuvieron en relación a los consumos energéticos obtenidos en

el programa SITER V.1.0. y son contrastadas en la siguiente tabla.

Tabla 6. Comparación de la generación de polución necesaria para calefacción.

	Edificio referencial	Edificio de funcionamiento óptimo	Ahorro alcanzado
m3CO2/año	4.020,820	1588,833	2.431,987
m3CO2/día	335,709	132,388	203,321
m3CO2/m2	124,871	49,341	75,530

6.5. Inercia de los cerramientos

El programa “HOJA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR CARGAS TÉRMICAS USANDO EL MÉTODO RADIANT TIME SERIES “RTS” determina el desenvolvimiento energético de los materiales utilizados en los muros de las viviendas referencial y optimizada; la gráfica muestra la energía radiante almacenada en los diferentes cerramientos a lo largo del día, donde se evidencia que el material con mayor inercia es el adobe con aislante, la respuesta en el tiempo es mayor, en relación a un cerramiento construido con ladrillo cuya respuesta es casi inmediata.

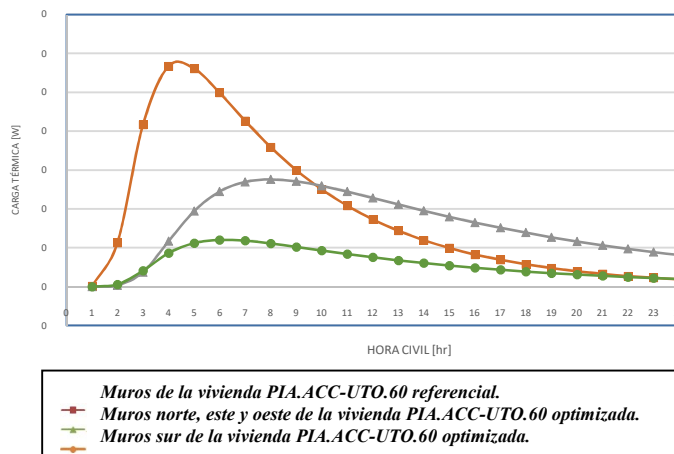


Figura 2. Factores de respuesta de los muros de la vivienda Referencial y Optimizada.

6.6 Curva de demanda energética de las viviendas

El programa “HOJA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR CARGAS TÉRMICAS USANDO EL MÉTODO RADIANT TIME SERIES “RTS” simula el desenvolvimiento que tendrán las viviendas referencial y optimizada; las gráficas simulan las necesidades energéticas para alcanzar confort en un día de invierno con las condiciones más desfavorables, los ahorros energéticos son apreciables, existiendo una diferencia considerable al comparar ambos casos, he ahí el ahorro energético obtenido con la implementación de un modelo con criterio bioclimático.

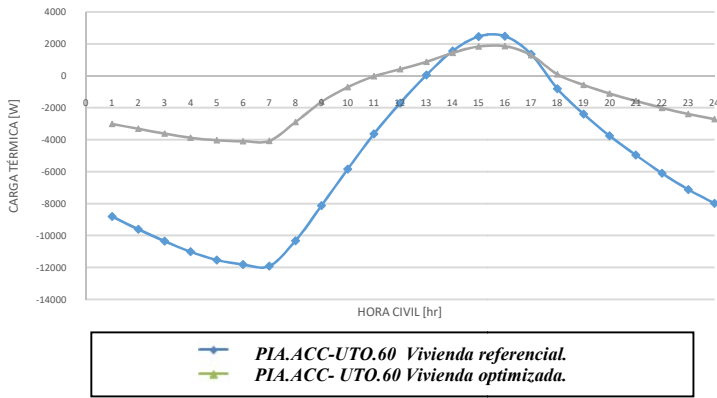


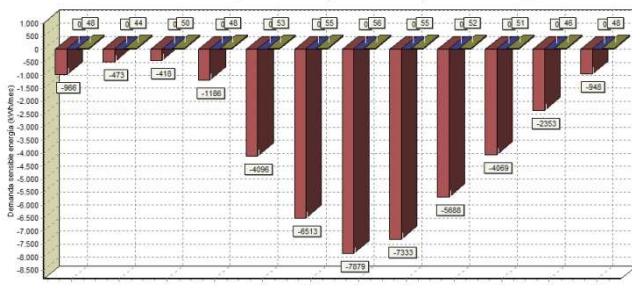
Figura 3. Confrontación de las curvas de demandas energéticas para calefacción.

6.7 Consumo de energía para mantener condiciones de confort

As determinaron las demandas energéticas anuales de las viviendas referencial y optimizada, los resultados muestran la diferencia existente al comprar ambos casos.

Demanda sensible por servicio (kWh/año): Calef. 41923,0

Demanda sensible por servicio (kWh/m² año): Calef. 1302,0



Demanda sensible por servicio (kWh/año): Calef. 17038,0

Demanda sensible por servicio (kWh/m² año): Calef. 529,1

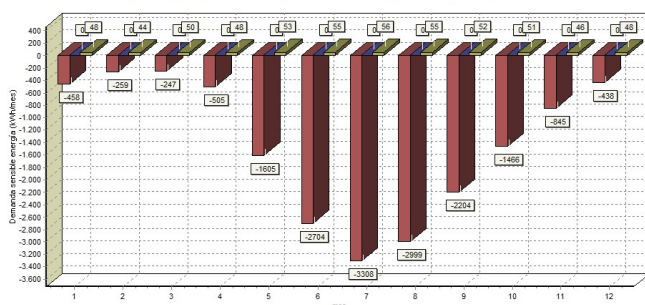


Figura 4. Consumos energéticos anuales para calefacción.

7. CONCLUSIONES

- La aplicación correcta de los criterios establecidos en el presente artículo contribuye a mejorar los diseños arquitectónicos de viviendas, de cara aminorar el consumo de energía y por ende la contaminación al medioambiente.
- Se consigue el ahorro energético con el aprovechamiento de la energía natural, el aprovechamiento del entorno, el uso de aislante en los muros, aplicación de la inercia térmica en los cerramientos y la

optimización a partir de la simulación térmica de la vivienda.

- Una correcta interpretación de los resultados contribuirá también a que profesionales del rubro generen nociones propias de bioclimatismo, lo cual les permitirá mejorar el rendimiento energético de las futuras construcciones desde la etapa de diseño.
- En la condición óptima de la mejora el ahorro energético es del 65%, el resto de energía será proporcionada por un acumulador pasivo en el caso del prototipo de vivienda bioclimática.

8. REFERENCIAS

- ATECYR. (s.f.). *DTIE 7.03 Entrada de datos a los programas LIDER y CALENER V y P*. Madrid, España: Gráficas ELISA, S.L.
- ATECYR, A. T. (2008). Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios. Madrid, España.
- Fernández S., V. (2012). Simulación energética de una vivienda de consumo casi nulo. *DINA Energía y Sostenibilidad*.
- Galindo, M. (s.f.). Tipos de Ventanas y su Etiqueta de Eficiencia Energética. *ecoesmás*.
- Henshaw Jones, S. (2003). Sustainability architecture. *blueprints*, 6-7.
- Lamas S., E. V. (2014). *Manual del Método de los grados día*. Oruro, Bolivia: Latinas Editores Ltda.
- Lamas S., E. V. (2016). PIA.ACC-UTO.60 005/2016 Diálogo de saberes locales. Oruro: IIIME.
- Lamas S., E. V. (2017). PIA.ACC-UTO.60 001/2017 diálogo de saberes ancestrales. Oruro: IIIME.
- Lamas S., E. V. (2017). PIA.ACC-UTO.60 003/2017 Determinación de las necesidades bioclimáticas para el diseño arquitectónico en la ciudad de Oro. Oruro: DIIME.
- Lamas S., E. V. (2017). PIA.ACC-UTO.60 004/2017 Temperatura del suelo y Sola-Aire a partir de las oscilaciones diarias de la temperatura. O
- Ruiz O., M. A., & Flores C., C. A. (s.f.). Sistema de calefacción asistido por energía solar.
- S.A., Y. T. (18 de Marzo de 2018). *YACIMIENTOS PETROLÍFEROS FISCALES BOLIVIANOS*. Obtenido de <http://www.ypftransporte.com>
- Vera, S., & Ordenes, M. (2012). *Evaluación del desempeño Energi - Térmico de una Vivienda Social en Chile*. Santiago, Chile: Universidad Católica de Chile.