

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Caso de estudio: sistemas constructivos para Vivienda de Interés Social en Montevideo-Uruguay.

Artículo recibido 21-08-14
aceptado 03-11-14

Economic Evaluation of Energy Efficiency
Case study: Construction systems for social housing in Montevideo, Uruguay.

KEREN GERWER GHELFGOT.
Universidad del Bío Bío, Concepción Chile/ arq.
kgerwer@gmail.com

Palabras clave:
vivienda social, sistemas constructivos no tradicionales, eficiencia energética, simulación energética, análisis financiero.

RESUMEN

Este artículo aborda la evaluación del desempeño energético de viviendas concebidas con diversos sistemas constructivos, proponiendo un modelo de análisis del beneficio económico derivado de las soluciones de eficiencia energética en la etapa de diseño.

La investigación se realizó en torno a la vivienda de interés social en Uruguay, considerando la importancia de la *Ley de Promoción de la Vivienda de Interés Social* (Ley 18.795), aprobada en agosto de 2011, que busca satisfacer las necesidades de la población de sectores socioeconómicos medios y medios bajos.

El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) admite la utilización de sistemas constructivos no tradicionales, como alternativa al hormigón armado y mampostería, con la aprobación de un *Documento de Aptitud Técnica*, donde el proveedor se compromete a satisfacer estándares de desempeño establecidos en el documento *Estándares de desempeño y requisitos para la vivienda social*. El estudio empleó tres metodologías combinadas de forma transversal y secuencial. Se llevó a cabo una selección de casos que permitió acotar el examen. Simulaciones energéticas y análisis financieros se realizaron para evaluar la rentabilidad de la incorporación de eficiencia energética. Y, como resultado, se propuso un modelo de análisis para el estudio de otras soluciones.

Keywords:
social housing, non-traditional construction systems, energy efficiency, energy simulation, financial analysis.

ABSTRACT

This article deals with the assessment of energy performance of homes designed with different construction systems. It proposes a model of analysis to study the economic benefits derived from energy efficiency solutions in the design stage. Research was carried out on social housing in Uruguay, taking into consideration the importance of the Law for the Promotion of Social Housing (Law 18,795), which was approved in August 2011 and seeks to meet the needs of the middle and lower-middle socioeconomic sectors of the population.

The Ministry of Housing, Territorial Planning and Environment (MVOTMA) allows the use of non-traditional construction systems as an alternative to reinforced concrete and masonry with the approval of a Technical Qualification Document in which the supplier pledges to meet performance standards established in the document *Performance standards and requirements for social housing*. In the study, three combined methodologies were used transversally and sequentially. A selection of cases was carried out to limit the inquiry. Energy simulations and financial analyses were performed to assess the profitability of the incorporation of energy efficiency. As a result, an analysis model for the study of other solutions is proposed.

1 INTRODUCCIÓN

Como todo edificio, la vivienda demanda energía para su funcionamiento. En su diseño se definen diversas condicionantes que afectan el costo asociado para satisfacer esta demanda en su etapa de uso. El problema de investigación abordado en el presente artículo radica en que al adquirir una vivienda, el usuario no valora su costo de acondicionamiento térmico mensual. Así, el estudio se centra en la evaluación de la demanda energética para calefacción y análisis financiero de prototipos de viviendas concebidas con distintos sistemas constructivos en Montevideo, planteando como hipótesis que no existe una vinculación directa entre el costo de la vivienda y su costo de acondicionamiento térmico de calefacción en la etapa de uso.

Desde esta perspectiva, Alejandro Arena, en el marco de su artículo "Análisis de Ciclo de Vida y sustentabilidad ambiental de los edificios. Experiencia en Argentina" (2005), explica:

[...] de todas las fases del ciclo de vida de un edificio, claramente la fase de uso tiene mayor importancia, dada la gran duración de su vida útil y la magnitud de los consumos y emisiones que se producen durante ella. En líneas generales, los factores que afectan los consumos energéticos de un edificio durante su uso son:

El efecto de la forma y la orientación del edificio sobre las cargas de calefacción y de acondicionamiento; El papel de la envolvente del edificio sobre la luz solar, la ganancia de energía del sol y la ventilación natural; La eficiencia energética de los equipos de climatización, iluminación y producción de agua caliente sanitaria; El papel de los ocupantes en la estrategia de operación para el control climático del edificio. (Arena, 2005:2)

Esta investigación enfoca su atención en el papel de la envolvente, realizando una evaluación energética seguida de una evaluación económico-financiera de distintas alternativas constructivas. Con un alcance exploratorio, se asume como objetivo general evaluar el desempeño energético de viviendas concebidas con diversos sistemas constructivos en Montevideo, estableciendo un modelo de análisis para el estudio de rentabilidad de la incorporación de soluciones de eficiencia energética en la etapa proyectual. Se presentan las siguientes contribuciones:

-Simulación del desempeño energético de tipologías y sistemas constructivos en Montevideo.

-Evaluación de los costos de construcción y costos de acondicionamiento térmico de calefacción de los sistemas elegidos en un periodo de uso determinado.

-Establecimiento de un modelo de análisis, cuyo fin es servir de base para el estudio de otras tecnologías.

2 METODOLOGÍA

Para realizar la evaluación económica se llevaron a cabo las siguientes tareas, las cuales se combinan en las distintas metodologías de trabajo desarrolladas posteriormente:

1. Elección de los casos de estudio: caso base y casos alternativos.
2. Definición de los parámetros fijos y variables.
3. Simulación energética.
4. Análisis financiero.

Empleándose tres metodologías, se diagramó una hoja de ruta para conseguir los objetivos de la investigación. Primeramente, el estudio de casos se incorporó en base a lineamientos establecidos por Hernández (2010), permitiendo un estudio holístico, que cortó transversalmente las otras dos metodologías aplicadas. Los casos sirvieron de instrumento de estudio, aplicándose a tres elementos: la elección de las viviendas –Vivienda de Interés Social, sostenida por la creación de la nueva *Ley de Promoción a la Vivienda de Interés Social (VIS)*–; la elección de los sistemas constructivos –construcción tradicional uruguaya y sistemas constructivos no tradicionales, sustentada por el aval técnico obtenido con la aprobación de su *Documento de Aptitud Técnica* para la construcción de VIS–; y la elección de los sistemas de calefacción –eléctrico, leña y supergás, respaldada por datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y el Ministerio de Industria, Energía y Minería–.

La segunda metodología empleada fue la simulación computacional, cuyo fin fue calcular la demanda energética, para lo cual se estableció parámetros fijos, bajo directrices normativas vigentes, datos estadísticos y otras fuentes citadas. Las simulaciones fueron realizadas con el programa TAS (Thermal Analysis Software), por sus prestaciones en términos de simulación de demanda energética y validaciones internacionales.

Finalmente, el análisis financiero se empleó como método de evaluación económica de las distintas soluciones estudiadas, con el propósito de comparar, mediante un análisis de ciclo de vida, la relación entre el costo inicial y el valor presente de los costos operativos de calefacción, así como el valor presente neto de todos los costos considerados y año de repago de la inversión, si lo hubo.

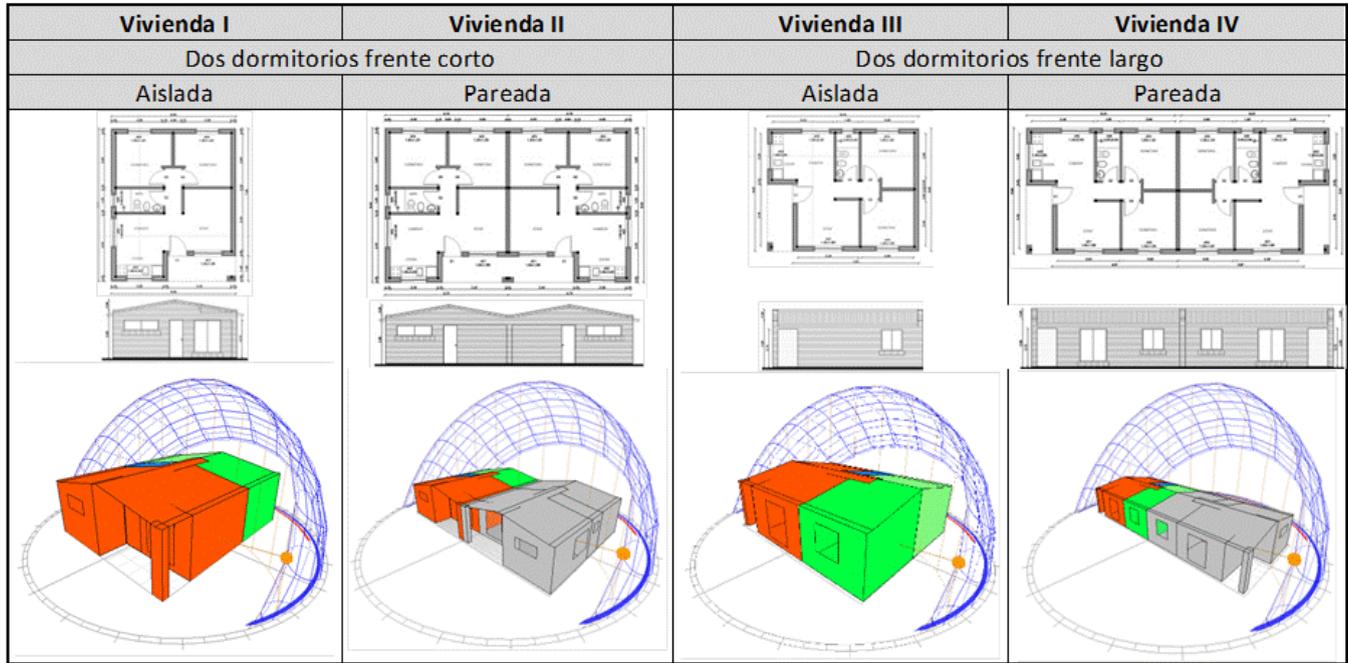


Tabla 2.1 Casos de estudio: prototipos de viviendas

	Vivienda I	Vivienda II	Vivienda III	Vivienda IV
Superficie interior de radier (m ²)	42,4	42,4	42,4	42,4
Superficie interior de techos (m ²)	52,9	52,9	52,9	52,9
Superficie de envolvente (m ²)	91,2	64,6	91,2	72,2
Superficie de ventanas (m ²)	9,9	9,9	9,9	9,9
Superficie de puertas exteriores (m ²)	2,1	2,1	2,1	2,1

Tabla 2.2 Características físicas de los prototipos de viviendas

2.1 CASOS DE ESTUDIO

2.1.1 Elección de las tipologías de vivienda

El MVOTMA (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente) facilita proyectos de viviendas económicas para autoconstrucción. Se eligieron, para este estudio, dos de sus prototipos –dos dormitorios frente corto y dos dormitorios frente largo–, y dos alternativas de agrupación –vivienda aislada y vivienda pareada–. (Tabla 2.1 y Tabla 2.2)

2.1.2 Elección de los sistemas constructivos

Con fundamento en el *Informe de Divulgación sobre Situación de la Vivienda en Uruguay* (INE, 2006), se eligió como caso base un sistema de construcción tradicional usualmente utilizado para viviendas de nivel socioeconómico bajo.

El mismo documento expresa que las viviendas elaboradas bajo dicho sistema presentan frecuentes patologías constructivas producto de un desempeño higrotérmico deficiente:

Las viviendas presentan en forma muy difundida problemas de construcción y conservación. Entre los que afectan a más del 25% de los hogares en todo el país, se encuentra las humedades en los techos o en los cimientos, las goteras y la caída de revoque en paredes o techos. Se observa en forma generalizada mayor deterioro en el interior urbano que en Montevideo, y más aún en el interior rural. (INE, 2006:52)

Sistema Constructivo Tradicional 1 (SCT 1): El caso base, edificado a partir de este sistema, correspondió a una construcción de muros de bloques cementicios de 11 cm de espesor y techo de chapa con 3 cm de aislación térmica de poliestireno expandido. Se incorporó al estudio un sistema de construcción tradicional avalado por el MVOTMA en su propuesta para autoconstrucción de Vivienda Económica y sistemas constructivos no tradicionales (SCNT) con *Documento de Aptitud Técnica* aprobado por el MVOTMA. Los SCNT fueron validados con el fin de respaldar su desempeño en aspectos como seguridad estructural, seguridad frente al fuego, seguridad de uso, habitabilidad y confort, entre otros. Todos ellos se explican a continuación.

Sistema Constructivo Tradicional 2 (SCT 2): Construcción húmeda basada en una envolvente de muro doble de ladrillo de campo, cámara de aire y aislaciones, y techumbre de hormigón armado, capas de aislamiento y cobertura de chapa.

Sistema Constructivo No Tradicional 1 (SCNT 1): Es un sistema basado en el montaje de una estructura

de chapa plegada y la proyección de un mortero a base de yeso, cemento, arena y poliestireno expandido. Permite gran flexibilidad de diseño y buen desempeño térmico, ignífugo, acústico y estructural.

Sistema Constructivo No Tradicional 2 (SCNT 2): Consiste en la construcción de una envolvente monolítica aislante, compuesta por paneles de muro y losa autoportantes. Los paneles están constituidos por un alma de espuma de poliestireno expandido entre dos capas de mortero armado, proyectado *in situ*.

Sistema Constructivo No Tradicional 3 (SCNT 3): Es un sistema de paneles y conectores de PVC rellenos de hormigón u otros materiales *in situ*. Este sistema es utilizado para muros y admite cubiertas de otros sistemas constructivos. Las piezas de PVC se fabrican de distintos espesores. Es un sistema abierto versátil y liviano.

Las siguientes tablas presentan los datos técnicos de cada uno de los materiales utilizados en los distintos elementos de muros exteriores y techos.

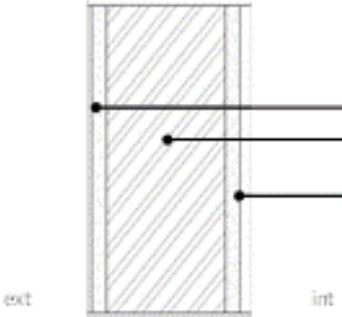
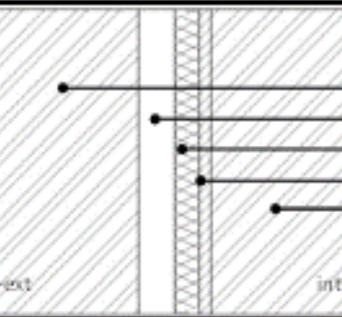
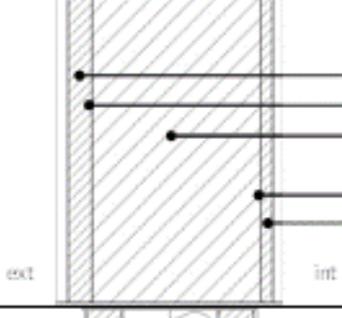
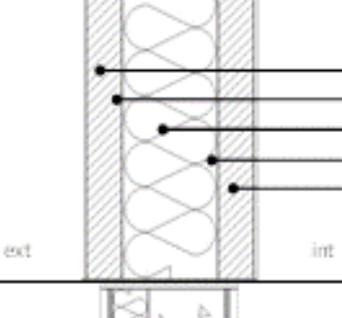
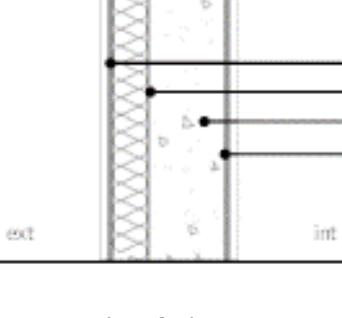
		Materiales	Ancho m	Conduct. Térmica W/mK	Factor de difusión de vapor	Densidad Kg/m³	Calor Específico J/KgK
SCT 1		1-Mortero exterior	0,015	1,400	34,0	2100,0	920,0
		2-Bloque de hormig. de 8x19x39	0,080	1,000	23,0	1300,0	920,0
		3-Mortero interior	0,015	1,100	34,0	1800,0	920,0
		U = 3,645 W/m² K					
SCT 2		1-Ladrillo de campo	0,120	0,650	8,0	1300,0	750,0
		2-Cámara de aire	0,030	Conv. 1,01	1,0	0,0	0,0
		3-Poliestireno exp.	0,020	0,039	21,0	15,0	1210,0
		4-Hidrófugo	0,010	1,400	1,0	2100,0	920,0
		5-Ladrillo de campo (expuesto a la lluvia)	0,120	0,790	8,0	1300,0	750,0
U = 0,829 W/m² K							
SCNT 1		1-Acabado SCNT1	0,020	0,349	34,0	1355,0	920,0
		2- Malla electrosol.					
		3-Protección SCNT1 /Estructura metálica	0,140	0,138	34,0	644,0	920,0
		4-Malla electrosol.					
		5- Acabado SCNT1	0,010	0,349	34,0	1355,0	920,0
U = 0,787 W/m² K							
SCNT 2		1-Mortero	0,035	1,400	34,0	2100,0	920,0
		2-Malla de acero					
		3-Poliestireno exp.	0,080	0,039	21,0	15,0	1210,0
		4-Malla de acero					
		5-Mortero	0,035	1,100	34,0	1800,0	920,0
U = 0,439 W/m² K							
SCNT 3		1-PVC SCNT3	0,003	0,160	99,0	1390,0	837,0
		2-Poliestireno exp.	0,030	0,032	21,0	24,0	1210,0
		3-Hormigón	0,064	1,650	24,0	2200,0	920,0
		4-PVC SCNT3	0,003	0,160	99,0	1390,0	837,0
U = 0,657 W/m² K							

Tabla 2.3 Muros exteriores de sistemas constructivos.

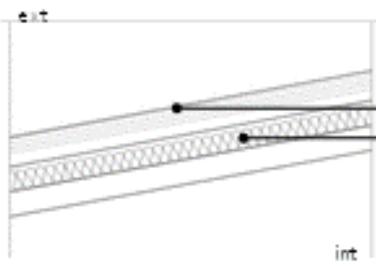
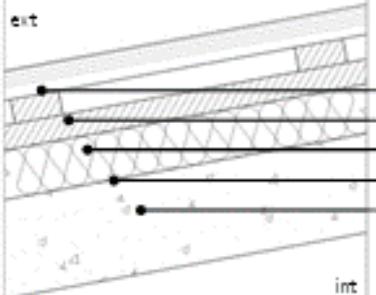
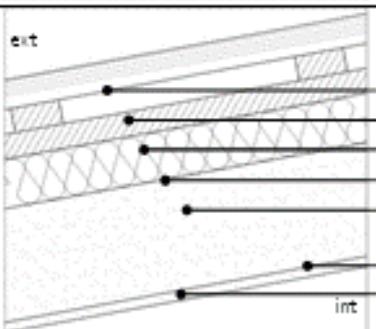
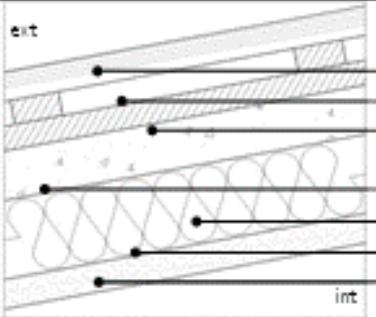
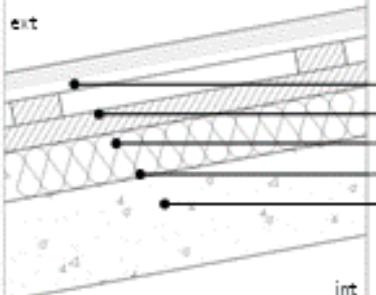
		Materiales	Ancho m	Conduct. Térmica W/mK	Factor de difusión de vapor	Densidad Kg/m ³	Calor Específico J/KgK
SCT 1		1-Chapa de Zinc	0,0020	112,000	9999,99	7100,0	380,0
		2-Poliestireno exp.	0,0200	0,039	21,00	15,0	1210,0
		U = 1,53 W/m ² K					
SCT 2		1-Chapa de Zinc	0,0020	112,000	9999,99	7100,0	380,0
		2-Cámara de aire	0,0500	conv. 1,77	1,00	0,0	0,0
		3-Poliestireno exp.	0,0500	0,039	21,00	15,0	1210,0
		4-Film de polietileno	0,0002	14,000	0,001	1090,0	2100,0
		5-Losa de HA	0,1000	1,630	24,00	2400,0	920,0
		U = 0,773 W/m ² K					
SCNT 1		1-Chapa de Zinc	0,0020	112,000	9999,99	7100,0	380,0
		2-Cámara de aire	0,0500	conv. 1,77	1,00	0,0	0,0
		3-Poliestireno exp.	0,0500	0,039	21,00	15,0	1210,0
		4-Malla electrosol.					
		5-Protección SCNT1 /Estructura SCNT1	0,1400	0,138	12,00	644,0	920,0
		6-Malla electrosol.					
		7-Acabado SCNT1	0,0100	0,349	12,00	1355,0	920,0
		U = 0,440 W/m ² K					
SCNT 2		1-Chapa de Zinc	0,0020	112,000	9999,99	7100,0	380,0
		2-Cámara de aire	0,0500	conv. 1,77	1,00	0,0	0,0
		3-Carpeta de compresión	0,0500	2,000	34,00	2400,0	920,0
		4-Malla de acero					
		5-Poliestireno exp.	0,0800	0,039	21,00	10,0	1210,0
		6-Malla de acero					
		7-Revoque	0,0850	1,100	34,00	1800,0	920,0
		U = 0,415 W/m ² K					
SCNT3		1-Chapa de Zinc	0,0020	112,000	9999,99	7100,0	380,0
		2-Cámara de aire	0,0500	conv. 1,77	1,00	0,0	0,0
		3-Poliestireno exp.	0,0500	0,039	21,00	15,0	1210,0
		4-Film de polietileno	0,0002	14,000	0,001	1090,0	2100,0
		5-Losa de HA	0,1000	1,630	24,00	2400,0	920,0
		U = 0,446 W/m ² K					

Tabla 2.4 Techos de sistemas constructivos.

	Área	Volumen	Ocupantes		Infiltración	Ventilación	Ganancias por iluminación		Ganancias de calor sensible por ocupación	Ganancias de calor latente por ocupación	Ganancias de calor sensible por equipos	Ganancias de calor latente por equipos	Horarios de ocupación
	MVOTMA	MVOTMA	nº	ach	ach	W/m²	W/m²	W/m²	W/m²	W/m²	W/m²		
	m²	m³										Ashrae	
Acceso	4,9	12,9	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	sin horarios
Cocina-comedor	22,3	58,8	4	0,5	16,0	8,1	11,6	9,9	14,6	2,4			según zona
Dormitorio 1	8,4	21,9	2	0,5	8,0	10,7	14,3	9,5	20,8	5,7			según zona
Dormitorio 2	8,4	21,9	2	0,5	8,0	5,3	14,2	9,5	20,8	5,7			según zona
Baño	3,2	8,3	/	0,5	4,0	/	/	/	/	/	/	/	sin horarios
Horarios de ocupación				24 hs	según zona	según zona	según zona	según zona	según zona	según zona	según zona		

Tabla 2.5 Resumen de ganancias internas

Aparato	Electricidad (kWh/año)	Fracción de carga sensible	Fracción de carga Latente
Refrigerador	434	1,000	0,00
Lavarropas	897	0,150	0,05
Diversas	2091	0,734	0,20
Televisión	673	1,000	0,00
Microondas	78	1,000	0,00

Tabla 2.6 Cargas de calor sensible y latente según aparato

2.1.3 Elección de los sistemas calefacción

El INE revela el uso predominante de sistemas de calefacción como estufas, paneles radiantes o similares. En cuanto a las fuentes, indica que el supergás, la electricidad y la leña para estos fines son, en orden decreciente, las fuentes de energía más empleadas, no sólo en Montevideo, sino también en el resto del país (INE, 2006). Para el estudio, fueron seleccionados tres sistemas de calefacción: estufa a cuarzo de 1400 W, salamandra y estufa con garrafa de 13 kg. Con el fin de determinar la cantidad de equipos a instalar, se consideró que la demanda quedara siempre cubierta. Cabe aclarar que se analizó la cantidad de calor suministrado por cada sistema según el poder calorífico de la fuente de energía y el rendimiento del equipo, sin considerar la calidad de calor y confort que brinda cada una de estas tecnologías. A modo de ejemplo, no es la misma la dispersión del calor, los olores y gases generados por los distintos sistemas. Tampoco se incluyó en el estudio una evaluación del impacto ambiental de las fuentes de energía involucradas en el análisis.

2.2 Simulación energética

Las simulaciones se realizaron con la herramienta TAS. Se trata, como sostiene González, en su investigación titulada *Evaluación de herramientas de simulación energética*, de un instrumento “[...] ampliamente validado y utilizado en investigaciones científicas [...]” (2012:100). TAS está reconocido como software BEEM (Building Energy and Environmental Modelling) y aprobada por ASHRAE 140-1 e ISO 13791.

Para llevar a cabo la simulación, se parametrizaron los siguientes conceptos:

- Emplazamiento y parámetros climáticos de Montevideo, según datos de Meteornorm.
- Zonas térmicas, según proyecto de arquitectura dado por el MVOTMA.
- Condiciones internas, según Tabla 2.5 y Tabla 2.6.
- Termostatos, horarios de ocupación y calendarios de uso, según parámetros de confort y supuestos de uso considerados.

2.3 Análisis financiero

Los procedimientos para realizar el análisis financiero son comúnmente empleados para este tipo de estudio analítico, permitiendo evaluar las alternativas propuestas y la determinación de la más rentable (Fiscal, 2001). Los supuestos estimados son parte del caso de estudio y su alteración afecta el resultado del análisis.

Se evaluaron los siguientes indicadores financieros:

- Valor Presente Neto (VPN): valor actual de un pago futuro, calculado según ecuaciones paramétricas que consideran el año del pago y su tasa de descuento.
- Período de repago: tiempo de recuperación de una inversión respecto de un caso base. Se incluyó los siguientes costos e indicadores:
 - Costos de las viviendas según modelos de pago contado y financiado.
 - Costos de mantenimiento de las viviendas.
 - Costos operativos de acondicionamiento térmico según condiciones de uso establecidas.
 - Costos de los sistemas de calefacción.
 - Horizonte de análisis: 20 años, según criterio comúnmente empleado para obras de construcción.
 - Tasa de descuento: 5,7%, según tasa de descuento pasiva del Banco Central del Uruguay, en el momento de realizado el estudio.
 - Tasa de escalonamiento de la electricidad: 8,35%, según datos de la compañía eléctrica de Uruguay, UTE.
 - Tasa de escalonamiento de la leña: 5,88%, según datos del Ministerio de Industria, Energía y Minería del Uruguay.
 - Tasa de escalonamiento del supergás: 13,20%, según Unión de Vendedores de Nafta del Uruguay.
 - Costo de oportunidad: se considera que la compra de la vivienda no implica la renuncia a otra inversión.

2.3.1 Costos iniciales de las viviendas

Se solicitó a los proveedores de los SCNT que cotizaran las viviendas bajo requerimientos equivalentes, estableciéndose su costo inicial. Se consideró dos formas de adquisición de las viviendas: la primera, según pago contado, y la segunda, según un pago financiado por medio del simulador de créditos del Banco Hipotecario del Uruguay. El plan de financiamiento permite un pago inicial mínimo del 20% y un financiamiento del resto del costo en 240 cuotas con una tasa de interés del 6%.

	Vivienda I		Vivienda II		Vivienda III		Vivienda IV	
	(usd)	(usd/m ²)	(usd)	(usd/m ²)	(usd)	(usd/m ²)	(usd)	(usd/m ²)
SCT 1	48.227	1.020	47.263	999	48.227	1.020	47.745	1.009
SCT 2	66.448	1.405	64.262	1.359	66.448	1.405	65.355	1.382
SCNT 1	61.644	1.303	60.563	1.280	61.644	1.303	61.104	1.292
SCNT 2	54.401	1.150	53.744	1.136	54.401	1.150	54.073	1.143
SCNT 3	61.095	1.292	61.095	1.292	61.095	1.292	61.095	1.292

Tabla 2.7 Cuadro resumen de costos iniciales de las viviendas.

2.3.2 Costos de mantenimiento de las viviendas

El costo de mantenimiento de las viviendas se estimó anualizado, considerándose trabajos de pintura, mantenimiento y reparaciones menores. Como base, se estableció para las viviendas concebidas con los SCT 2, SCNT 1 y SCNT 2, un costo de USD500 anuales; para el SCNT 3, de USD300 anuales, por no requerir trabajos de pintura en las paredes, y para el SCT 1, se estimó en USD900 anuales, debido a su alto riesgo de condensación.

2.3.3 Costos de adquisición, vida útil y características de los equipos de calefacción

3 SIMULACIÓN ENERGÉTICA

3.1 Análisis de demanda energética de calefacción

Según los parámetros establecidos, se realizaron las 20 simulaciones computacionales en TAS. El Gráfico 3.1 muestra el indicador de demanda energética de calefacción por metro cuadrado de construcción según cada vivienda y sistema constructivo.

3.2 Cálculo del consumo

En base a la demanda obtenida de las simulaciones y los datos establecidos en la sección de metodología, se realizó el cálculo de consumo, partiendo del concepto $Cc = Dc / R$. Además de la demanda a satisfacer y el rendimiento del sistema, debe considerarse la capacidad

Fuente de energía	Equipo	Costo del equipo	Vida útil	Poder Calorífico Inferior	Rendimiento	Costo de la energía
Electricidad	A Estufa a cuarzo de 1400 W	50 usd	5 años	100% KJ/kWh	100%	0,21usd/kWh
Leña	B Salamandra	408 usd	25 años	40% KJ/kg de leña	40%	0,14usd/kg de leña
Supergás	C Estufa con garrafa de 13 Kg	204 usd	10 años	85% KJ/kg de supergás	85%	1,51usd/kg de gas

Tabla 2.8 Costo y vida útil del sistema de calefacción.

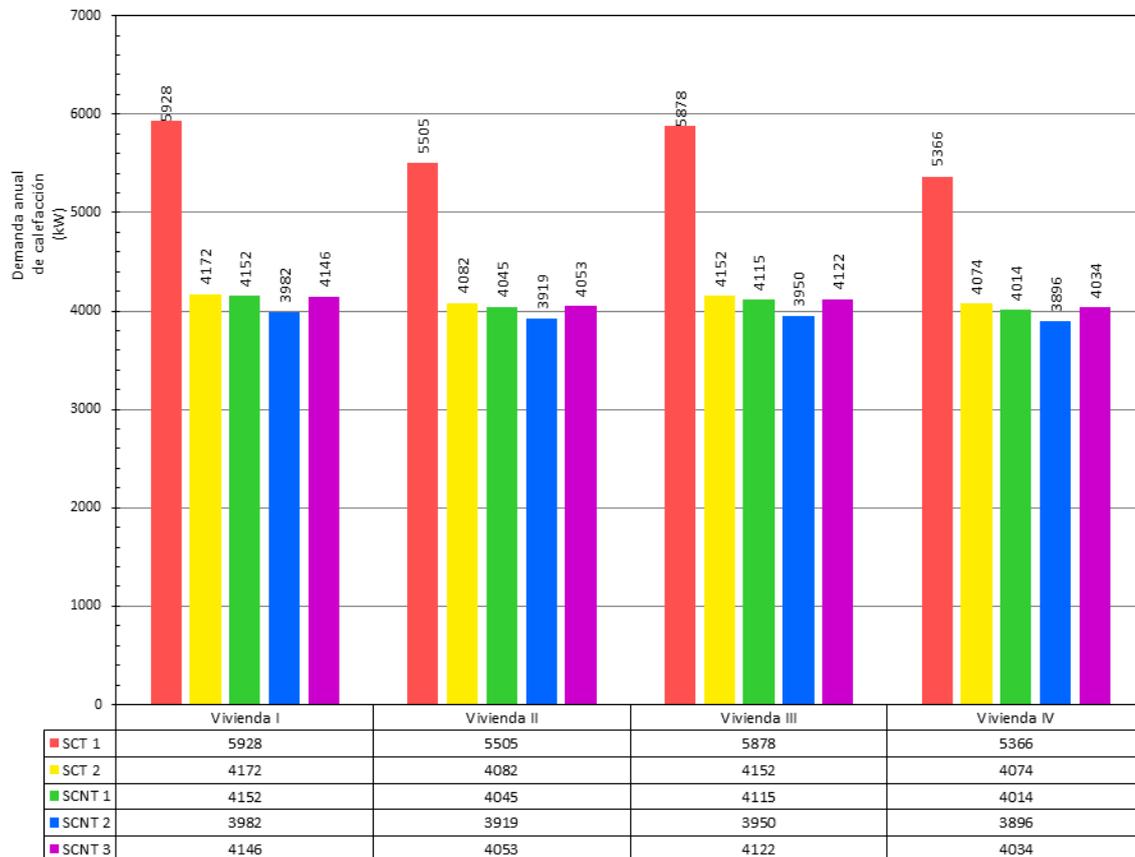


Gráfico 3.1 Demanda de calefacción anual según vivienda y sistema constructivo en kW/m2

de la fuente de liberar calor, producto de la unión química entre el combustible y el comburente. Este concepto conocido como “poder calorífico inferior”, se integra en la ecuación de la siguiente manera:

$$Q = Cc / PCI \text{ (Click Renovables).}$$

$$Q \text{ (USD)} = Q \times \text{Costo}$$

Q: Cantidad de combustible necesario anual (unidad según fuente)

Cc: Consumo energético de calefacción anual (unidad según fuente)

Dc: Demanda energética de calefacción anual (unidad según fuente)

R: Rendimiento del sistema (%)

PCI: Poder calorífico inferior (kJ/kWh)

Costo: Costo (USD/unidad según fuente)

Las siguientes gráficas ilustran el consumo energético anual de calefacción según sistema constructivo, presentado en dólares americanos.

El promedio de los costos por consumo de calefacción con estufa a cuarzo (A) resultó de USD940 anuales, mientras el promedio del sistema de salamandra (B) fue de USD478 anuales y el de estufa a supergás (C), de USD617 anuales. De esta forma, queda ilustrado que el sistema eléctrico requiere prácticamente el doble de costo que el sistema a leña y un 52,5% más que el sistema a supergás. El consumo del sistema a leña resultó un 22,5% más económico que el sistema a gas.

Concretamente, en relación al sistema eléctrico, el costo de consumo de calefacción anual asciende a USD1.217, para SCT 1, y USD871 como valor promedio del resto de los sistemas alternativos aprobados por

el MVOTMA. Respecto a la calefacción a leña, el monto alcanza los USD619 y USD443, respectivamente; y para la calefacción a supergás, USD799 y USD571.

Se puede observar que, en términos de costo anual de energía, en todos los casos la leña resultó más económica que la electricidad.

4 ANÁLISIS FINANCIERO

El análisis financiero, según vivienda y sistema de calefacción, se realizó para los dos supuestos de pago: contado y financiado. Se presenta aquí las planillas de evaluación realizadas para la Vivienda I y sistema de calefacción A (Tabla 4.1 y Tabla 4.2), incluyéndose los costos iniciales de las viviendas, los costos equipos de calefacción, sus costos de reemplazo, las cuotas de pago anuales en el caso de pago financiado, los costos anuales de mantenimiento estimado de las viviendas y los costos anuales operativos según la fuente de energía utilizada. El Gráfico 4.1 y Gráfico 4.2 ilustran los costos acumulados anualmente para ambos casos. Los cortes de las curvas indican el retorno de una inversión alternativa respecto de otra. En el supuesto de pago contado, el SCNT 1 logra recuperar la inversión inicial respecto del caso base (SCT 1) en el año 19; el SCNT 2 lo hace en el año 8; y el SCNT 3 en el año 12. El SCT 2 no consigue recuperar la inversión realizada para el periodo de ACV (Análisis de Ciclo de Vida). En el supuesto de pago financiado, SCNT 1 logra recuperar la inversión inicial en el año 19; el SCNT 2 lo consigue en el año 3; y el SCNT 3 lo hace en el año 7. El SCT 2 no recupera la inversión realizada para el periodo de ACV.

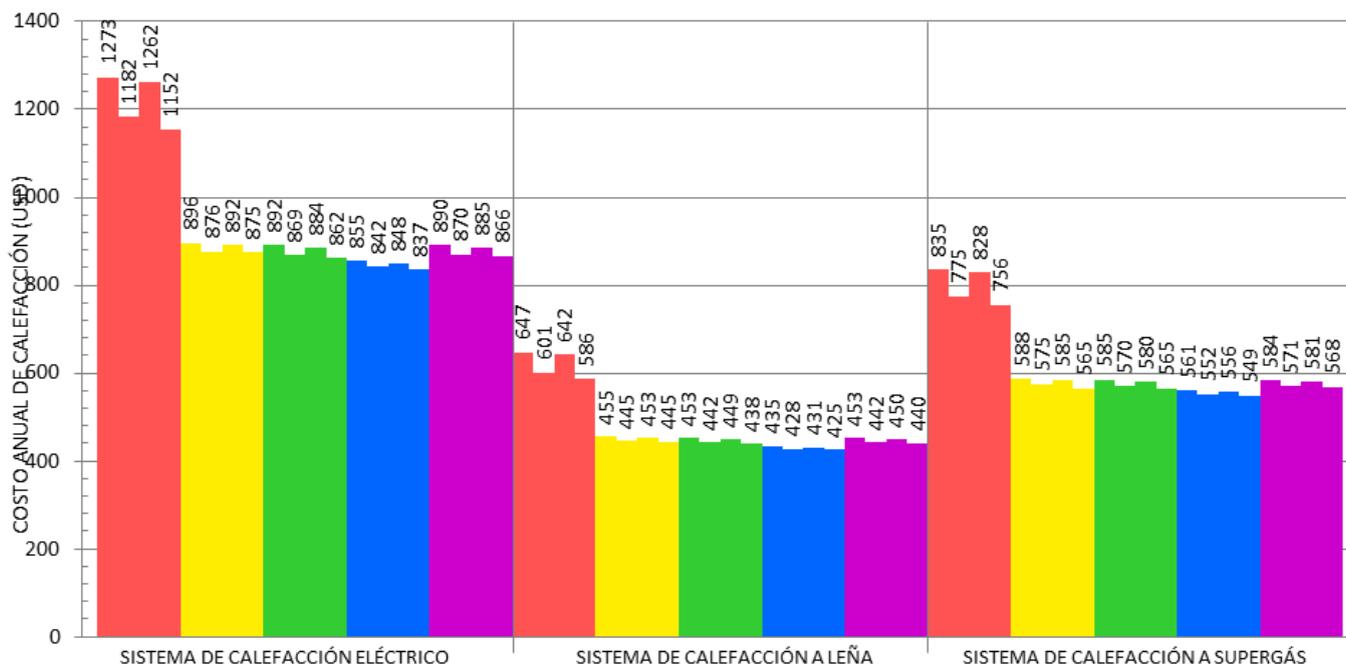


Gráfico 3.2 Consumo energético anual según vivienda, sistema constructivo y sistema de calefacción en USD

Título del proyecto		VIVIENDA I SISTEMA A PAGO CONTADO		Base		Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C		Alternativa D	
Tasa de descuento		5,70%		Descripción:		Descripción:		Descripción:		Descripción:		Descripción:	
Ciclo de vida (años)		20		SCT1		SCT2		SCNT1		SCNT2		SCNT3	
Fecha		Mayo de 2014		Costo	VP	Costo	VP	Costo	VP	Costo	VP	Costo	VP
Costos Iniciales	Costos iniciales												
	Costo inicial de la vivienda	100%	48.227	48.227	66.448	66.448	61.782	61.782	54.401	54.401	58.832	58.832	
	Costo del sistema de calefacción		402	402	302	302	302	302	302	302	302	302	
	TOTAL COSTOS INICIALES Y COLATERALES			48.629	66.750	62.083	54.703	59.134					
DIFERENCIA COSTO INICIAL VALOR PRESENTE				-18.121	-13.454	-6.074	-10.505						
Reemplazo / Vida residual	Reemplazo		año	FVP									
	Costo del sistema de calefacción	5	0,76	402	305	302	229	302	229	302	229	302	229
	Costo del sistema de calefacción	10	0,57	402	231	302	173	302	173	302	173	302	173
	Costo del sistema de calefacción	15	0,44	402	175	302	131	302	131	302	131	302	131
	Costo del sistema de calefacción	20	0,33	402	133	302	100	302	100	302	100	302	100
	TOTAL COSTOS REEMPLAZO / VIDA RESIDUAL			843	633	633	633	633					
DIFERENCIA COSTO REEMPLAZO VALOR PRESENTE				211	211	211	211						
Costos Anuales	Costos Anuales		FVP s/escal.										
	Costo de mantenimiento de la vivienda	11,75	900	10.579	300	3.526	500	5.877	500	5.877	300	3.526	
	Tasa Escalonamiento		FVP/ escal.										
	Costo de energía para calefacción	8,35%	26,20	1.273	33.361	896	23.475	892	23.364	855	22.406	890	23.332
	TOTAL COSTOS ANUALES			43.940	27.001	29.241	28.284	26.859					
DIFERENCIA COSTOS ANUALES VALOR PRESENTE				16.939	14.699	15.656	17.081						
Costos Ciclos de Vida	Costos Ciclo de Vida (valor presente)			93.412	94.384	91.957	83.619	86.625					
	DIFERENCIA COSTO VALOR PRESENTE		SCT1		-972	1.455	9.793	6.787					
	DIFERENCIA COSTO VALOR PRESENTE		SCT2	972		2.427	10.764	7.759					

Tabla 4.1 Evaluación económica: Vivienda I – Sistema A – supuesto de pago contado

Título del proyecto		VIVIENDA I SISTEMA A PAGO FINANCIADO		Base		Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C		Alternativa D	
Tasa de descuento		5,70%		Descripción:		Descripción:		Descripción:		Descripción:		Descripción:	
Ciclo de vida (años)		20		SCT1		SCT2		SCNT1		SCNT2		SCNT3	
Fecha		Mayo de 2014		Costo	VP	Costo	VP	Costo	VP	Costo	VP	Costo	VP
Costos Iniciales	Costos iniciales												
	Costo inicial de la vivienda	20%	9.645	9.645	13.290	13.290	12.356	12.356	10.880	10.880	11.766	11.766	
	Costo del sistema de calefacción		402	402	302	302	302	302	302	302	302	302	
	TOTAL COSTOS INICIALES Y COLATERALES			10.047	13.591	12.658	11.182	12.068					
DIFERENCIA COSTO INICIAL VALOR PRESENTE				-3.544	-2.610	-1.134	-2.021						
Reemplazo / Vida residual	Reemplazo		año	FVP									
	Costo del sistema de calefacción	5	0,76	402	305	302	229	302	229	302	229	302	229
	Costo del sistema de calefacción	10	0,57	402	231	302	173	302	173	302	173	302	173
	Costo del sistema de calefacción	15	0,44	402	175	302	131	302	131	302	131	302	131
	Costo del sistema de calefacción	20	0,33	402	133	302	100	302	100	302	100	302	100
	TOTAL COSTOS REEMPLAZO / VIDA RESIDUAL			843	633	633	633	633					
DIFERENCIA COSTO REEMPLAZO VALOR PRESENTE				211	211	211	211						
Costos Anuales	Costos Anuales		FVP s/escal.										
	Costo de cuota anual de la vivienda	11,75	3.552	41.752	4.884	57.409	4.548	53.460	3.996	46.971	4.332	50.921	
	Costo de mantenimiento de la vivienda	11,75	900	10.579	300	3.526	500	5.877	500	5.877	300	3.526	
	Tasa Escalonamiento		FVP/ escal.										
	Costo de energía para calefacción	8,35%	26,20	1.273	33.361	896	23.475	892	23.364	855	22.406	890	23.332
TOTAL COSTOS ANUALES			85.692	84.410	82.701	75.255	77.779						
DIFERENCIA COSTOS ANUALES VALOR PRESENTE				1.282	2.991	10.437	7.913						
Costos Ciclos de Vida	Costos Ciclo de Vida (valor presente)			96.583	98.634	95.991	87.069	90.480					
	DIFERENCIA COSTO VALOR PRESENTE		SCT1		-2.051	592	9.513	6.103					
	DIFERENCIA COSTO VALOR PRESENTE		SCT2	2.051		2.643	11.565	8.154					

Tabla 4.2 Evaluación económica: Vivienda I – Sistema A – supuesto de pago financiado.

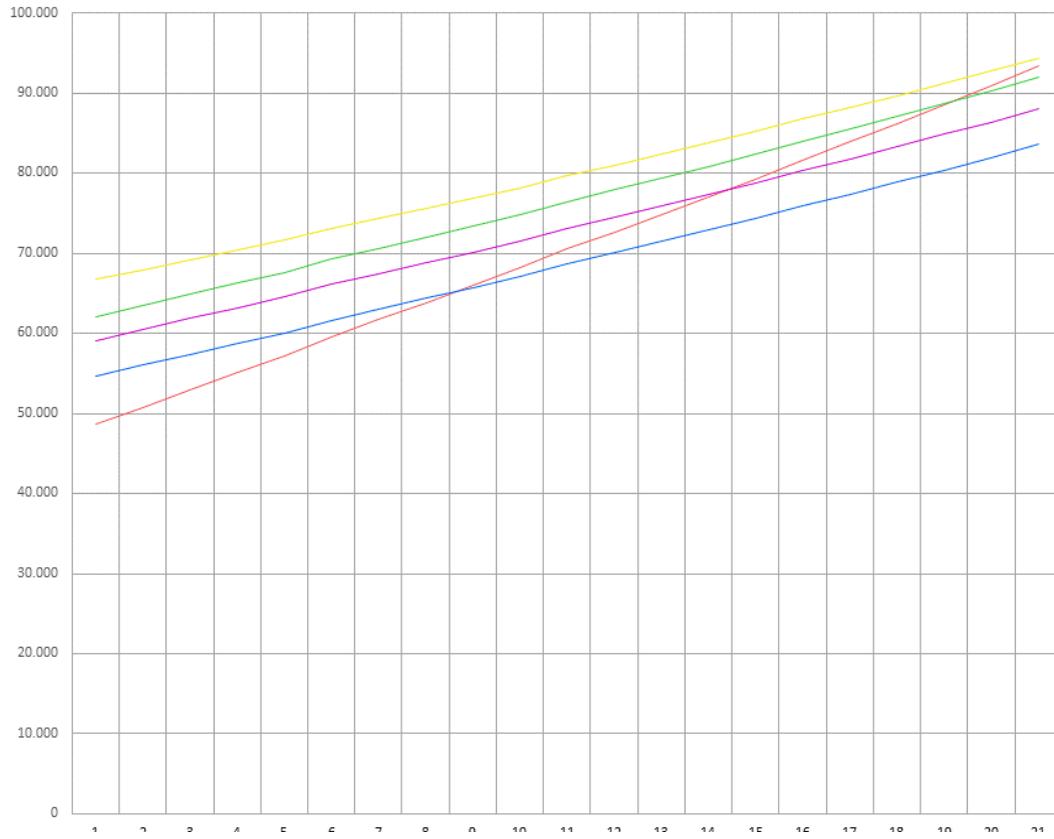


Gráfico 4.1 Costos acumulados Vivienda I – Sistema A – supuesto de pago contado.

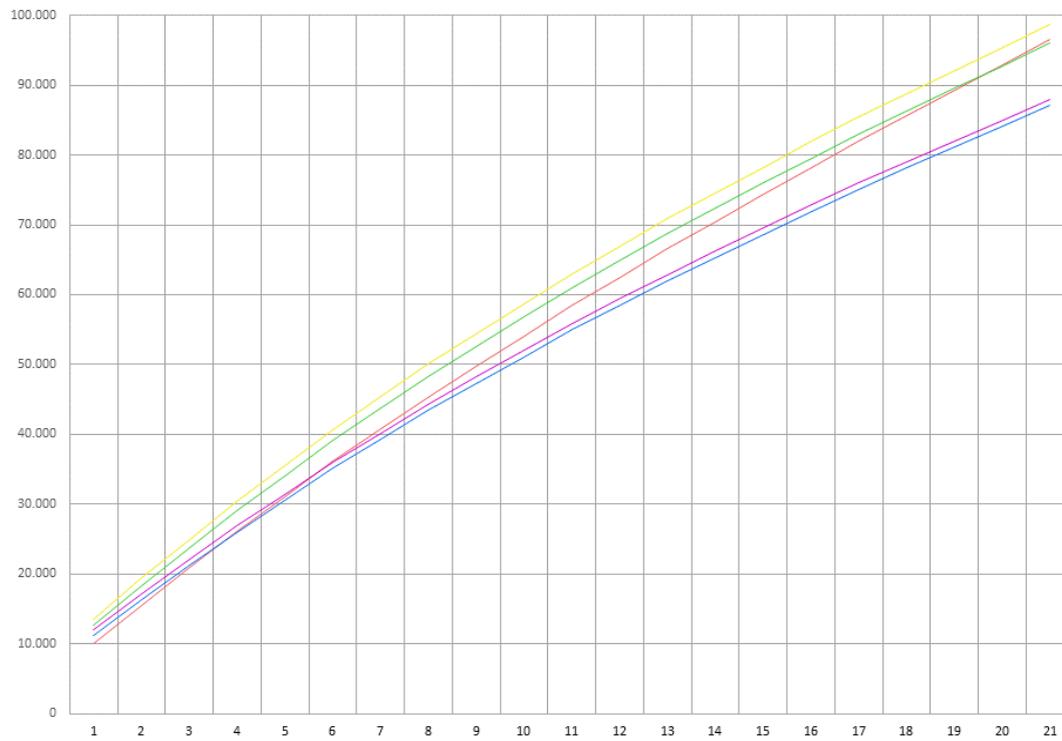


Gráfico 4.2 Costos acumulados Vivienda I – Sistema A – supuesto de pago financiado.

En la Tabla 4.3 se han tabulado los VPN de todos los casos estudiados y en la Tabla 4.4 se presenta un cuadro de valores de repago de las soluciones alternativas respecto del caso base, evidenciándose que, para los casos estudiados, los sistemas constructivos aprobados

presentan un beneficio económico en el ACV realizado respecto del caso base, producto del ahorro en energía para calefacción. En algunos casos es posible repagar la inversión inicial en el tiempo de análisis propuesto.

Sistema de calefacción	Sistema constructivo	Supuesto de pago contado				Supuesto de pago financiado			
		Vivienda I	Vivienda II	Vivienda III	Vivienda IV	Vivienda I	Vivienda II	Vivienda III	Vivienda IV
A Estufa a cuarzo	SCT 1	93.412	89.908	93.129	89.611	96.583	93.003	96.300	92.745
	SCT 2	92.960	90.408	92.848	91.386	98.634	95.856	98.523	97.017
	SCNT 1	90.318	88.695	90.112	89.034	95.991	94.185	95.786	94.545
	SCNT 2	83.619	82.607	83.438	82.810	87.069	86.019	86.888	86.241
	SCNT 3	86.675	86.148	86.538	86.044	90.480	89.953	90.343	89.849
B Estufa a leña	SCT 1	72.804	70.899	73.104	71.073	75.975	73.994	75.863	74.206
	SCT 2	78.233	75.989	78.601	76.993	83.908	81.437	83.864	82.625
	SCNT 1	75.659	74.400	75.989	74.843	81.332	79.890	81.251	80.354
	SCNT 2	69.539	68.742	69.879	69.021	72.989	72.154	72.918	72.452
	SCNT 3	72.035	71.827	72.392	71.786	75.840	75.632	75.786	75.591
C Estufa a gas	SCT 1	97.030	93.418	96.716	93.035	100.201	96.513	99.887	96.168
	SCT 2	95.404	92.797	95.281	93.769	101.079	98.244	100.955	99.401
	SCNT 1	92.750	91.061	92.522	91.380	98.423	96.551	98.195	96.891
	SCNT 2	85.946	84.894	85.745	85.083	89.396	88.306	89.195	88.514
	SCNT 3	89.104	88.519	88.952	88.403	92.909	92.323	92.756	92.208

Tabla 4.3 Resumen de VPN (USD)

	Supuesto de pago contado				Supuesto de pago financiado			
	SCT 2	SCNT 1	SCNT 2	SCNT 3	SCT 2	SCNT 1	SCNT 2	SCNT 3
Vivienda I - Sistema A	-	19	8	12	-	19	3	7
Vivienda II - Sistema A	-	-	10	15	-	-	5	12
Vivienda III - Sistema A	-	19	8	12	-	19	3	8
Vivienda IV - Sistema A	-	-	10	15	-	-	5	12
Vivienda I - Sistema B	-	-	12	18	-	-	5	20
Vivienda II - Sistema B	-	-	14	15	-	-	8	-
Vivienda III - Sistema B	-	-	12	19	-	-	5	20
Vivienda IV - Sistema B	-	-	14	-	-	-	8	-
Vivienda I - Sistema C	20	18	9	13	-	18	4	9
Vivienda II - Sistema C	-	20	10	15	-	-	6	13
Vivienda III - Sistema C	20	18	9	13	-	18	4	9
Vivienda IV - Sistema C	-	20	10	15	-	-	6	13

Tabla 4.4 Resumen de periodo de repago (años).

5 RESULTADOS

5.1 Sumario de resultados obtenidos

El estudio realizado se ha basado en el cálculo y la simulación, donde siempre que se mantengan los mismos datos de entrada o partida se llegará a un mismo resultado, sin dar lugar al azar o a la incertidumbre. Por este motivo, se trata de una investigación determinista: el resultado estará determinado por las decisiones definidas que se ingresan en el modelo matemático.

Resultó evidente la diferencia en prestaciones alcanzadas por los sistemas aprobados por el MVOTMA y el sistema de construcción tradicional a base de bloques cementicios. Las diferencias que presentan los sistemas alternativos respecto del caso base son más evidentes que las diferencias entre los sistemas alternativos entre sí. Al hacer *zoom* con fin de evaluar las variaciones entre los sistemas alternativos considerados, se apreció que optimizando la elección de tipología, materialidad y sistema de calefacción por separado, se asegura al usuario el mejor desempeño energético de las variables consideradas, condicionado a que cada una de las opciones esté dentro del rango de valores para el cual fue diseñado. Sin embargo, cuando se realiza una evaluación financiera se involucran otros costos en un ACV que pueden variar la toma de decisión, principalmente, producto de las tasas de escalonamiento de la energía.

Según el análisis realizado, cuando se comparan los resultados de demanda y consumo obtenidos por tipologías, la vivienda IV –pareada de frente largo– fue la solución que requirió menor demanda energética anual. Cuando se evalúan los sistemas constructivos, el SCNT 2 resultó ser la solución más eficiente. Y cuando se analizó el consumo energético, el sistema de calefacción B –Salamandra– fue la opción más económica.

Al incorporar al análisis una evaluación financiera se demuestra que no siempre la misma solución resulta ser la más económica. Dicho análisis incluyó una serie de costos y parámetros que afectaron los resultados iniciales, como los costos de adquisición y mantenimiento de las viviendas, costo inicial y de reposición de sistemas de calefacción utilizados, los costos operativos de calefacción y los indicadores y tasas involucrados, que por medio de ecuaciones paramétricas permiten ajustar el valor del dinero en el tiempo.

Las gráficas presentadas a continuación ilustran cómo se afectan los distintos costos comparados. El Gráfico 5.1 muestra la relación entre los costos iniciales de las viviendas y los costos anuales de calefacción, observándose claramente las diferencias entre los tres sistemas de calefacción. El sistema a leña se revela como la propuesta más económica, seguida del sistema a supergás y, por último, solución eléctrica.

El Gráfico 5.2 presenta la relación entre los costos iniciales de las viviendas y el valor presente de los costos

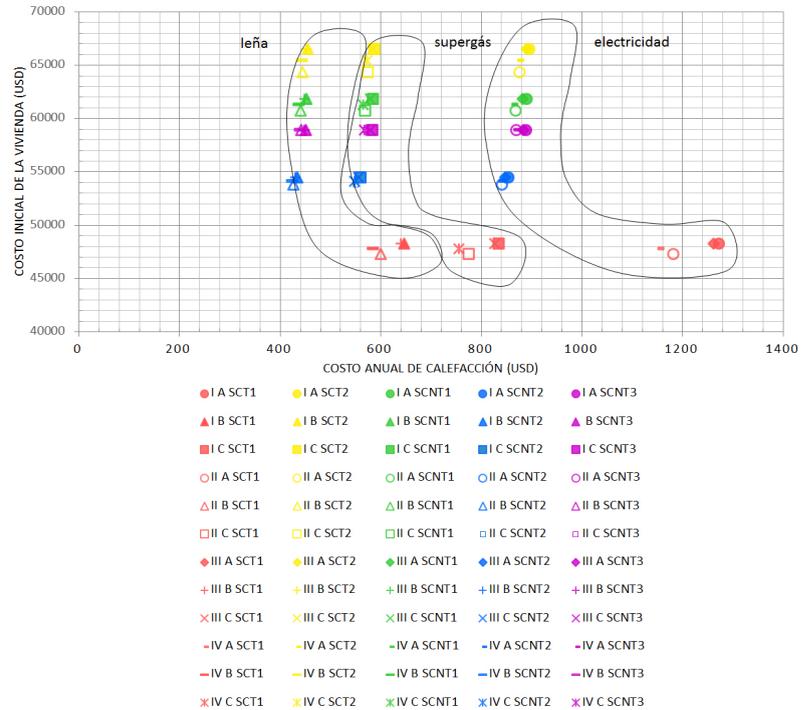


Gráfico 5.1 Gráfico comparativo entre costo inicial de la vivienda y costo de calefacción anual.

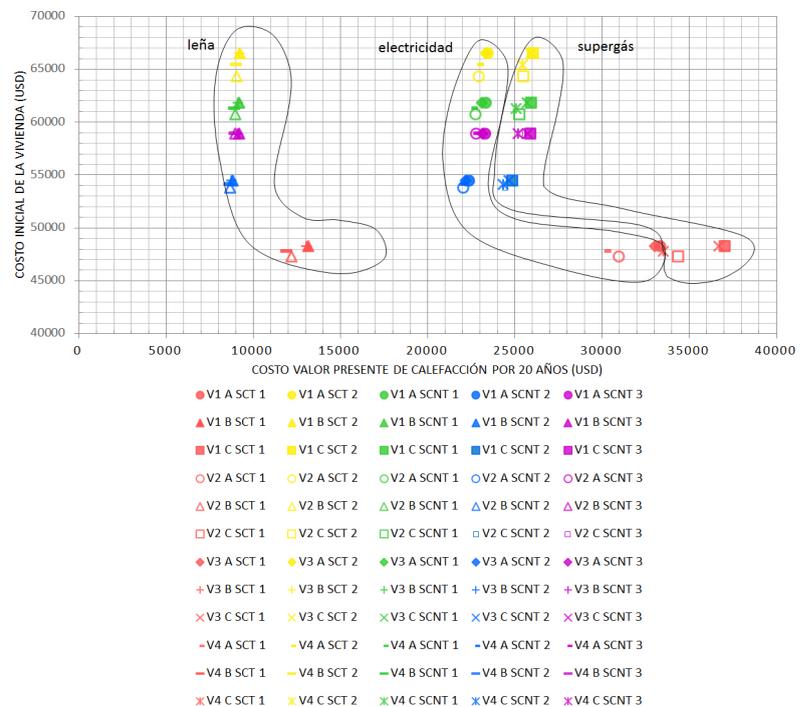


Gráfico 5.2 Gráfico comparativo entre costo inicial de la vivienda y valor presente del costo de calefacción a 20 años.

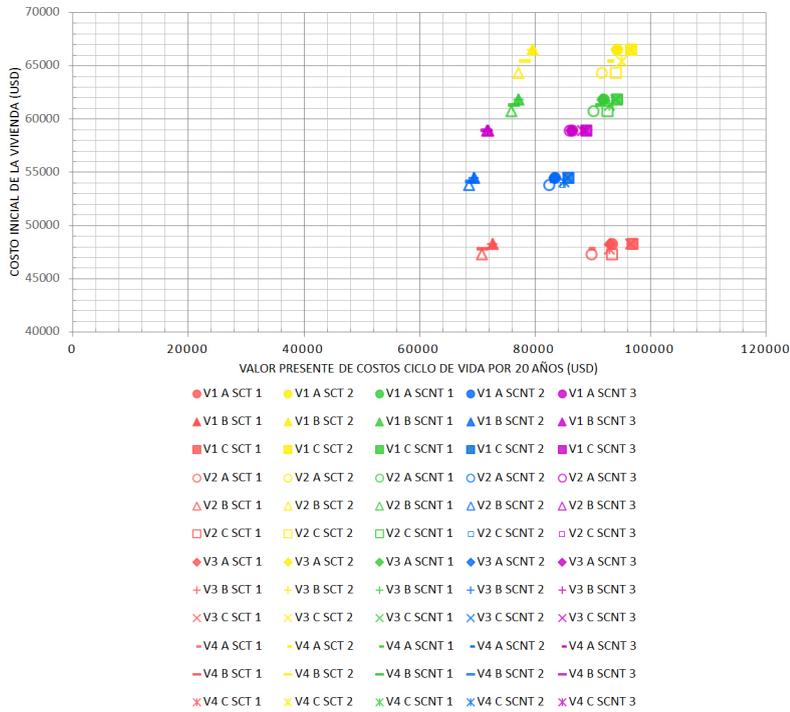


Gráfico 5.3 Gráfico comparativo entre costo inicial de la vivienda y VPN de ACV, según supuesto de pago contado

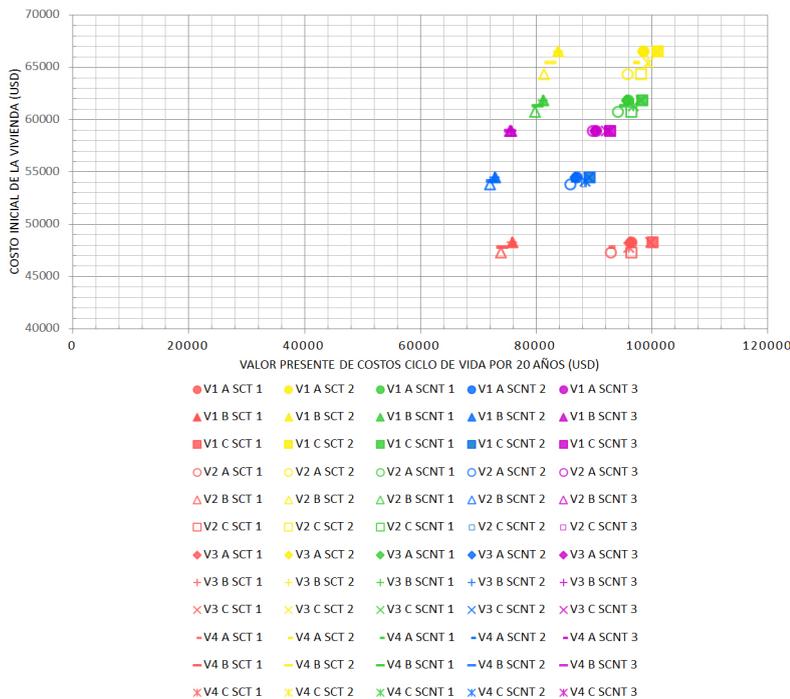


Gráfico 5.4 Gráfico comparativo entre costo inicial de la vivienda y VPN de ACV según supuesto de pago financiado.

de calefacción para el periodo de ACV, a partir de lo cual es posible visualizar que, en el periodo de análisis establecido, la tecnología a gas resultó más onerosa que la electricidad, producto de la tasa de escalonamiento que presenta esta fuente de energía.

Asimismo, se puede advertir que, en mayor o menor medida, los puntos se agrupan por sistema constructivo y sistema de calefacción. La tipología no tuvo mayor incidencia, en los casos estudiados.

El Gráfico 5.3 expone el vínculo entre los costos iniciales de las viviendas y los VPN del ACV, según supuesto de pago contado, y el Gráfico 5.4 exhibe el nexo entre estos costos, según supuesto de pago financiado. Se observa, en ambos casos, la no correlación entre abscisas y coordenadas. Tal como se estimó en las etapas preliminares de la investigación, los resultados fueron aleatorios, pues no se percibió una relación directa entre los costos iniciales y los costos operativos de calefacción.

5.2 Modelo de análisis

Se presenta, ahora, un modelo de análisis que resume las tres fases de evaluación realizada. El primer elemento a considerar es la elección de la tipología edilicia y los distintos sistemas constructivos, los cuales implican costos iniciales y de mantenimiento. Con estas dos variables y el establecimiento de supuestos de uso y condiciones internas, se determina la demanda energética de las opciones elegidas –mediante cálculo o simulación computacional estática o dinámica–. Luego, se incorpora el sistema de calefacción, que implica su costo inicial y costo de reposición (dependiendo del sistema, pudiera requerir costos de mantenimiento).

Según el poder calorífico de la fuente de energía, las características de rendimiento del sistema y el valor de demanda energética determinada, se calcula el consumo energético, el cual involucra un costo operativo en el periodo de análisis establecido. La tercera fase se compone del análisis financiero. Para determinar los indicadores del análisis de ciclo de vida, debe estudiarse las condiciones locales de tasas de intereses, periodos de depreciación de la vivienda y tasas de escalonamientos de las anualidades consideradas.

De la misma forma que se estableció un mapa de ruta para la realización de la evaluación económica de las soluciones de vivienda, sistema constructivo y sistema de calefacción, puede elaborarse un mapa genérico que permita evaluar el beneficio económico de la incorporación de soluciones de eficiencia energética (Gráfico 5.5).

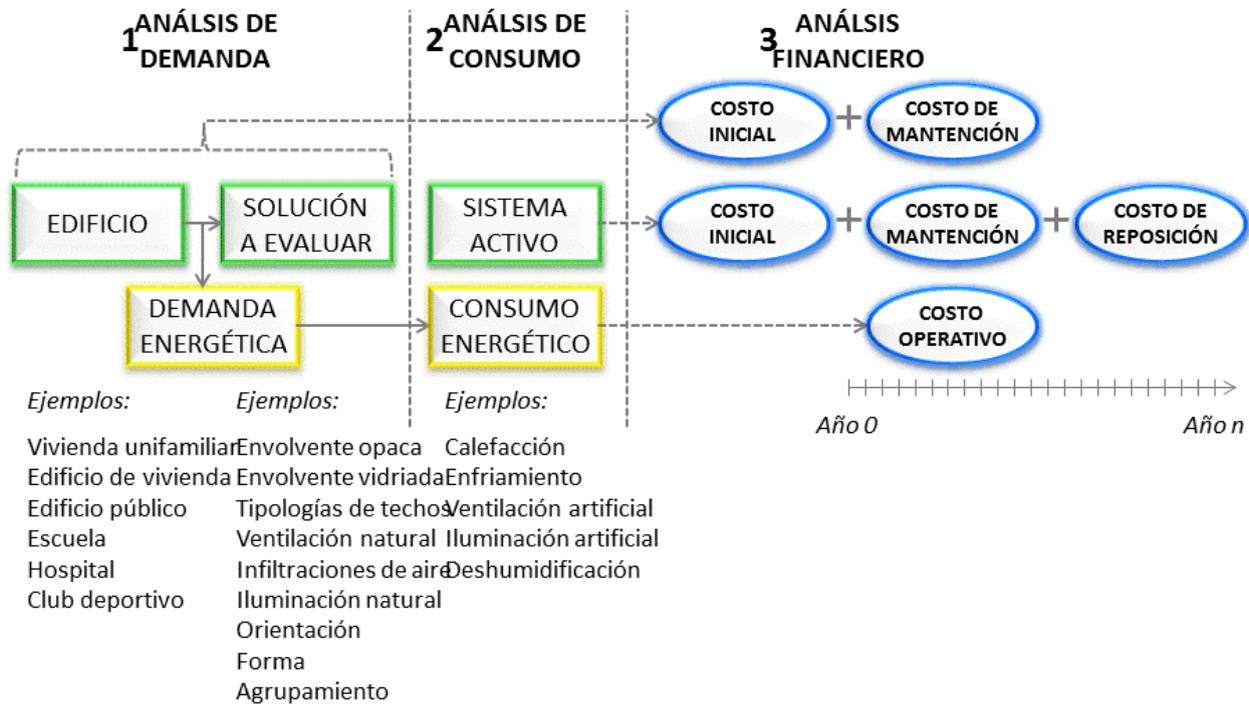


Gráfico 5.5 Mapa semántico del modelo de análisis general.

CONCLUSIONES

Factores sociales, ecológicos y económicos, deben conjugarse para conseguir un desarrollo sostenible. En la investigación aquí expuesta, se consideraron aspectos de carácter social respecto al confort y calidad de vida que deben asegurarse en la vivienda; aspectos ecológicos en cuanto a la demanda y consumo de energía requerida para su calefacción; junto a aspectos económicos financieros, con fin de analizar el beneficio de la eficiencia energética.

Los gráficos de demanda energética presentados demuestran que existe una apreciable diferencia entre los sistemas avalados por el MVOTMA y el caso base considerado, revelando la evidente mejora en la demanda y consumo energético que éstos consiguen. Para los casos estudiados, los sistemas con estas calidades de envolvente presentaron requerimientos de acondicionamiento térmico similares, independientemente de la tecnología utilizada.

Se concluye que el marco legal asegura al usuario acceder a una vivienda cuyo confort higrotérmico está garantizado por la normativa vigente, minimizando pequeñas variaciones que se obtienen por el uso de las diferentes tecnologías disponibles en el mercado uruguayo.

Cuando se realiza una evaluación financiera, las conjeturas realizadas en el análisis de demanda y consumo pueden variar, pues en las ecuaciones paramétricas inciden el periodo de análisis de ciclo de vida, la tasa de descuento y las tasas de escalonamiento de la energía.

A partir del análisis financiero, se infiere que las soluciones más eficientes desde el punto de vista energético, no siempre resultaron ser más onerosas que las menos eficientes, pues a nivel de mercado existen otros criterios en juego, como paradigmas y valoraciones de los usuarios –ubicación, dimensiones, terminaciones–. Se entendió de antemano que el costo de la vivienda y el costo de calefacción son dos variables independientes, que fueron analizadas comparativamente con fin de contraponer los costos de las viviendas los costos operativos de calefacción, garantizando el confort térmico interior. Las evaluaciones económicas demuestran que no existe una correlación entre los costos iniciales de las viviendas y sus valores presentes netos para las distintas soluciones, validando la hipótesis planteada.

El modelo de análisis propuesto constó de tres fases: análisis de demanda, análisis de consumo y análisis financiero. En cada fase se consideraron supuestos fijos y parámetros variables. Se deja constancia de que estos parámetros, naturalmente, afectaron los resultados obtenidos, pudiendo ser considerados como casos de estudio.

El estudio realizado se concentró en el análisis de la envolvente opaca. Entendiendo la vivienda como un sistema integral debieran equilibrarse las inversiones realizadas en eficiencia energética de distintos componentes. Para conseguir un balance energético eficiente, han de optimizarse las pérdidas térmicas por ventilación y transmisión de calor, debiendo estar en concordancia con los parámetros locales, la normativa vigente y el estado de avance de las tecnologías disponibles en el mercado.

El balance energético se aplica a todo producto que demanda energía para funcionar. En este sentido, se alinea con la definición de desarrollo sostenible, entendiendo que aspectos sociales, ecológicos y económicos deben trabajarse sinérgicamente. Se considera que lo primero a garantizar, como punto de partida, es la dimensión social referida a la calidad de vida –en este caso, dentro de la vivienda–.

Luego, en relación con los aspectos ecológicos, es necesario que estos se desarrollen con el avance de la tecnología, atendiendo las necesidades sociales y sean acompañados de la viabilidad económica que permita su inserción en los mercados.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a los proveedores de los sistemas constructivos estudiados y funcionarios del Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, por su interés y colaboración en el trabajo; también a mis profesores guía Ing. Ariel Bobadilla e Ing. Roberto Arriagada, por su exigencia y respaldo; al profesor Ing. Jaime Soto y equipo de trabajo del CITEC-UBB que me apoyaron en el manejo de la herramienta TAS y análisis realizados.

BIBLIOGRAFÍA

ARENA, Pablo. Análisis de Ciclo de Vida y sustentabilidad ambiental de los edificios. Experiencias en Argentina [en línea]. *Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación*. Consultado 9 noviembre 2014. Disponible en: www2.medioambiente.gov.ar/ciplycs/documentos/archivos/Archivo_480.pdf

CLICK RENOVABLES. Cómo calcular la potencia, las necesidades de combustible y el ahorro que obtienes con una instalación de biomasa (Caso práctico y comparativa) [en línea]. *Click Renovables*. Consultado 9 noviembre 2014. Disponible en: www.clickrenovables.com/blog/como-calcular-la-potencia-las-necesidades-de-combustible-y-el-ahorro-que-obtienes-con-una-instalacion-de-biomasa-caso-practico-y-comparativa

DNE. Política Energética 2005-2030 [en línea]. *Dirección Nacional de Energía*, 2010. Consultado 6 abril 2014. Disponible en: www.dne.gub.uy/documents/49872/0/Pol%C3%A9tica%20energ%C3%A9tica%202005-2030?version=1.0&t=1378917147456

DNE [en línea]. Consultado 6 abril 2014. Disponible en: www.dne.gub.uy

EVISOS [en línea]. Consultado 6 abril 2014. Disponible en: montevideo.evisos.com.uy/venta-de-lena-seca-para-estufas-la-mejor-id-34724

FISCAL, Raúl. Estudio técnico económico de eficiencia energética en sistemas eléctricos industriales costa afuera [en línea]. *Boletín IIE*, marzo-abril 2001, 87-92. Consultado 6 abril 2014. Disponible en: www.iie.org.mx/2001b/tecnico1.pdf

GONZÁLEZ, Alex. *Evaluación de herramientas de simulación energética: estudio del caso de la determinación de la demanda de calefacción en viviendas en concepción*. Tesis de magíster INÉDITA. Chile: Universidad del Bío-Bío, 2012.

HERNÁNDEZ, Roberto. *Metodología de la investigación*. 5ta ed. México: McGrawHill, 2010. [/sites/mvd2030.montevideo.gub.uy/files/descargas/modelo_suamvi.pdf](http://sites/mvd2030.montevideo.gub.uy/files/descargas/modelo_suamvi.pdf) [consulta: 30 julio 2013].

INE. *Informe de Divulgación sobre Situación de la Vivienda en Uruguay* [en línea] 2006. <www.ine.gub.uy/enha2006/ENHA_Vivienda_%20Final_Corr.pdf> [consulta: 28 julio 2013].