



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO**

**Metodología de evaluación de potencial solar según condiciones formales,
para la implementación de sistemas fotovoltaicos en cubierta,
en establecimientos educacionales en la comuna de Concepción, Chile.**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

AUTOR: Arq. Daniel Sosa Ibarra

PROFESOR GUÍA: Dr. Arq. Rodrigo García Alvarado

CONCEPCION, 24 de agosto de 2016

A mis padres, por su apoyo incondicional...

Resumen

Los establecimientos educacionales constituyen servicios de gran relevancia social, con localización dispersa en la ciudad y volúmenes extensos. Además, presentan consumos energéticos crecientes, que podrían atenuarse mediante la incorporación de sistemas fotovoltaicos en cubierta; pero deben ser orientados mediante estrategias de diseño, para maximizar sus capacidades. Este trabajo presenta una evaluación paramétrica de las morfologías arquitectónicas de infraestructuras educacionales, para determinar la capacidad solar activa de cubierta y sugerir formas con mejores desempeños, a partir de un estudio de establecimientos existentes en Concepción-Chile. La revisión del parque educacional, permite reconocer condiciones formales y energéticas; comprobando consumos eléctricos de 11,1 kWh/m²-año en ciclo básico-medio y casi 4 veces más en ciclo superior. Una evaluación multifactorial permite descifrar la posición óptima de paneles fotovoltaicos; comprobando mejores desempeños en la generación energética y menores tiempos de retorno de la inversión. Se determina el aporte de energía solar en el desempeño energético; suficiente para cubrir el consumo de hasta 4 plantas en ciclo básico-medio y 3 plantas en superior. Generando remanentes que pueden mejorar las condiciones de confort de los establecimientos, compartirse localmente o volcarse a la red urbana. La información recopilada, se implementa en una definición paramétrica de exploración formal, que puede asistir decisiones tempranas de diseño de nuevos establecimientos educacionales; evaluando de manera interactiva el potencial solar, según variaciones de la morfología arquitectónica. Verificando mediante ensayos exploratorios, que el potencial de generación de un establecimiento de extensión promedio, permite cubrir el auto-consumo y abastecer los requerimientos eléctricos anuales, de hasta 60 viviendas.

Palabras Clave

Establecimientos Educacionales, Potencial Solar, Sistemas Fotovoltaicos, Optimización Formal Energética, *Ladybug*

Abstract

The educational establishments constitute services of great social relevancy, with territorial dispersion in the city and extensive volumes. In addition, they present increasing energy consumption, what can be dimmed using photovoltaic systems in roof; but they must be oriented by design strategies to maximize their capabilities. This work presents a parametric evaluation of the architectural morphologies of educational infrastructure, to determine the active solar roof capacity and suggest forms with better performances, based on studies of existing establishments in Concepción-Chile. The review of the educational infrastructure, allow recognizing formal and energy conditions; verifying electrical consumptions of 11,1 kWh/m²-year in elementary-middle cycle and almost 4 times more in university cycle. A multifactorial evaluation allows deciphering the optimum position of photovoltaic panels; verifying better performances in energy generation and less payback period times. The contribution of solar energy in the energy performance is determined; enough to cover the consumption of up to 4 floors in elementary-middle cycle and 3 floors in university cycle. Generating remnants that can improve the conditions of comfort of the establishments, be shared locally or get overturn to the urban network. The information collected is implemented in a parametric definition of formal exploration, which can assist early decisions of design of new educational establishments; evaluating interactively the solar potential, according to architectural morphology variations. Verifying through exploratory essays, that the potential of generation of an establishment of average extension, can cover the self-consumption necessities and supply the annual electrical requirements, of up to 60 houses.

Keywords

Educational Establishments, Solar Potential, Photovoltaic Systems, Formal Energy Optimization, Ladybug

Índice de contenidos

Resumen	3
<i>Abstract</i>	4
Tabla de ilustraciones	7
Prefacio	10
Introducción	11
a. Formulación general del problema - oportunidad	11
b. Hipótesis de investigación	13
c. Objetivo general	13
d. Objetivos específicos	13
e. Mapa metodológico	14
Capítulo 1	
Marco teórico para el estudio de potencial solar en relación a condiciones formales	15
1.1 Incidencia de condiciones formales en el desempeño energético de las edificaciones	16
1.1.1 Diseño paramétrico en la optimización formal arquitectónica	17
1.1.2 Desempeño energético en establecimientos educacionales	20
1.2 Energía solar y sistemas fotovoltaicos	22
1.2.1 Recurso solar en el contexto nacional y local	22
1.2.2 Funcionamiento y clasificación de sistemas fotovoltaicos	25
1.2.3 Tecnología fotovoltaica en arquitectura y educación	27
1.3 Marco Regulatorio Energético Nacional	30
1.3.1 Funcionamiento y particularidades de la Ley 20.571	30
Capítulo 2	
Características de establecimientos educacionales en la comuna de Concepción	32
2.1 Catastro de establecimientos educacionales	33
2.2 Caracterización formal por tipo de establecimiento	36
2.2.1 Nivel básico-medio: escuelas, liceos y colegios	37
2.2.2 Nivel superior: universidades	44
2.3 Caracterización energética por tipo de establecimiento	49
2.3.1 Nivel básico-medio: escuelas, colegios y liceos	49
2.3.2 Nivel superior: universidades	51

Capítulo 3

Factibilidad de incorporación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos educacionales	54
3.1 Simulación energética con implementación de sistemas fotovoltaicos	55
3.1.1 Criterios de selección de casos de estudio	55
3.1.2 Consideraciones de simulación energética	58
3.1.3 Resultados de simulación energética y análisis comparativo multifactorial	62
3.2 Análisis de costos de ciclo de vida	71
3.2.1 Supuestos económicos	71
3.2.2 Resultados del análisis de costos de ciclo de vida	73
3.3 Aporte de energía solar en el desempeño energético	78
3.3.1 Condición de análisis en relación a la Ley 20.571	78
3.3.2 Superficie mínima de captación según escenarios de consumo energético	81
3.4 Estrategias de incorporación de sistemas fotovoltaicos	84
3.4.1 Distancia mínima entre filas de captación	84
3.4.2 Límites geométricos para sistemas en posición optimizada	86
3.4.3 Límites geométricos para sistemas en otras posiciones	90

Capítulo 4

Definición paramétrica de optimización solar activa en establecimientos educacionales	93
4.1 Reglas paramétricas formales	94
4.1.1 Patrón de crecimiento para configuración espacial	94
4.1.2 Variación formal de cubierta	97
4.2 Desarrollo de la definición paramétrica: <i>iGUANA</i>	99
4.2.1 Parámetros de entrada interactivos	100
4.2.2 Resultados obtenidos en tiempo real	103
4.3 Ensayos exploratorios sobre generación de energía eléctrica con <i>iGUANA</i>	104
4.3.1 Relación entre generación y consumo de energía eléctrica	105
4.3.2 Variación en generación de energía eléctrica según acimut e inclinación	106
4.3.3 Generación de energía eléctrica en establecimiento promedio	107
4.4 Recomendaciones de diseño e incorporación arquitectónica	112

Resumen de resultados	115
------------------------------	------------

Conclusiones y discusión	116
---------------------------------	------------

Agradecimientos	119
-----------------	-----

Glosario	120
----------	-----

Referencias Bibliográficas	121
----------------------------	-----

Anexos	125
--------	-----

Tabla de ilustraciones

Figuras

Figura 1. Mapa metodológico de la investigación	14
Figura 2. Ejemplo de definición paramétrica en <i>Grasshopper</i>	19
Figura 3. Radiación solar global horizontal en Chile. solargis.info	22
Figura 4. Radiación solar global mensual y anual en Concepción. Registro solarimétrico	23
Figura 5. Radiación solar global anual en Concepción. TRNSYS - Modificado de Con-Fin	24
Figura 6. Tecnología de células fotovoltaicas	25
Figura 7. Concepto de generador fotovoltaico	26
Figura 8. Clasificación de sistemas fotovoltaicos por tipo de conexión	26
Figura 9. Implementación arquitectónica de sistemas fotovoltaicos	27
Figura 10. Tecnología fotovoltaica en establecimientos educacionales	28
Figura 11. Esquema de funcionamiento de la Ley 20.571. Modificado de CDT	30
Figura 12. Consumo y generación para distintos programas. Modificado de arquitecturayenergía.cl	31
Figura 13. Establecimientos educacionales en la comuna de Concepción	35
Figura 14. Metodología de caracterización formal de establecimientos educacionales	36
Figura 15. Establecimientos seleccionados de nivel básico-medio en la comuna de Concepción	38
Figura 16. Planta de polígonos de ejemplos seleccionados de nivel básico-medio	39
Figura 17. Planta de polígonos de la Universidad del Bío-Bío sede Concepción	45
Figura 18. Edificios UBB seleccionados para la caracterización formal de nivel superior	46
Figura 19. Caracterización de edificios en Universidad del Bío-Bío sede Concepción	56
Figura 20. Edificio de aulas AB de la Universidad del Bío-Bío sede Concepción	57
Figura 21. Planta tipo del edificio de aulas AB	57
Figura 22. Modelo de simulación del edificio de aulas AB	58
Figura 23. Distancia mínima entre filas de captación. CDT y CCHC	85
Figura 24. Ocupación máxima de cubierta en sección transversal de bloque norte-sur	86
Figura 25. Ocupación máxima de cubierta en sección longitudinal de bloque este-oeste	88
Figura 26. Variación de ala norte en sección transversal de bloque norte-sur	90
Figura 27. Variación de alas de cubierta en sección transversal de bloque este-oeste	91
Figura 28. Incidencia de parámetros y demanda por orientación en EEduc en Concepción. GEEEduc	95
Figura 29. Patrón de crecimiento y configuración espacial en definición paramétrica	95
Figura 30. Reordenamiento de configuración espacial en función del ángulo norte	96
Figura 31. Variación formal de cubierta en sección transversal de bloque norte-sur	97
Figura 32. Variación formal de cubierta en sección longitudinal de bloque este-oeste	98

Figura 33. Definición paramétrica de <i>iGUANA</i> en <i>Grasshopper</i>	99
Figura 34. Entorno visual y secuencia de definición paramétrica en <i>iGUANA</i>	101
Figura 35. Configuración espacial en ensayo de generación de energía eléctrica	107
Figura 36. Imagen objetivo de abastecimiento eléctrico de establecimiento promedio	110
Figura 37. Imagen objetivo de abastecimiento eléctrico integrado en la comuna de Concepción	111
Figura 38. Análisis de radiación según escalonamiento del establecimiento	112
Figura 39. Análisis de radiación según deslinde del establecimiento	113

Tablas

Tabla 1. Catastro de establecimientos educacionales en la comuna de Concepción	34
Tabla 2. Establecimientos seleccionados para la caracterización formal de nivel básico-medio	37
Tabla 3. Resultados de caracterización formal de bloques de aulas de nivel básico-medio	40
Tabla 4. Resultados de caracterización formal de bloques de aulas de nivel superior	46
Tabla 5. Consumo de energía eléctrica en establecimientos de nivel básico-medio	49
Tabla 6. Consumo de energía eléctrica en establecimiento de nivel superior	52
Tabla 7. Calendarios de simulación para casos de estudio	59
Tabla 8. Registro comparado de radiación solar en Concepción	61
Tabla 9. Procesamiento de datos de simulación horaria	65
Tabla 10. Comparativo multifactorial en caso de estudio de nivel superior	65
Tabla 11. Comparativo multifactorial en caso de estudio de nivel básico-medio	69
Tabla 12. Análisis financiero para sistemas FV con distintas inclinaciones	74
Tabla 13. Recuperación de la inversión para sistemas FV con distintas inclinaciones	75
Tabla 14. Análisis financiero para generación energética extensiva	76
Tabla 15. Recuperación de la inversión para generación energética extensiva	77
Tabla 16. Relación entre cargo por energía y por potencia en EEduc	79
Tabla 17. Procesamiento de datos en análisis de saldo de energía	80
Tabla 18. Incremento promedio de superficie de captación para aumentar una planta	82
Tabla 19. Información energética según caso de estudio, escenario y número de plantas	83
Tabla 20. Ocupación máxima de cubierta para distintos anchos de crujía en bloque norte-sur	87
Tabla 21. Resumen de superficie mínima de captación según escenario y límites geométricos	89
Tabla 22. Radiación y ancho de captación según inclinación en bloque norte-sur	90
Tabla 23. Radiación y ancho de captación según inclinación en bloque este-oeste	92
Tabla 24. Superficie construida de EEduc abastecida con 1m ² de panel FV en posición optimizada	105
Tabla 25. Variación en generación de energía eléctrica según acimut e inclinación	106
Tabla 26. Generación y excedentes eléctricos de establecimiento promedio. Parte 1	108
Tabla 27. Resultados de simulación entregados por <i>iGUANA</i>	109
Tabla 28. Generación y excedentes eléctricos de establecimiento promedio. Parte 2	110
Tabla 29. Ocupación máxima de cubierta según orientación y ancho de crujía	113

Tabla 30. Prioridad de inclinación según orientación de cubierta	114
--	-----

Gráficos

Gráfico 1. Dispersión de bloques de aulas de nivel básico-medio	41
Gráfico 2. Histograma de largo de bloques de aulas de nivel básico-medio	41
Gráfico 3. Histograma de ancho de bloques de aulas de nivel básico-medio	42
Gráfico 4. Histograma de proporción de bloques de aulas de nivel básico-medio	42
Gráfico 5. Recuento por número de plantas de bloques de aulas de nivel básico-medio	43
Gráfico 6. Recuento por tipo de cubierta de bloques de aulas de nivel básico-medio	43
Gráfico 7. Recuento por configuración espacial de establecimientos de nivel básico-medio	44
Gráfico 8. Dispersión de bloques de aulas de nivel superior	47
Gráfico 9. Histograma de largo de bloques de aulas de nivel superior	47
Gráfico 10. Histograma de ancho de bloques de aulas de nivel superior	48
Gráfico 11. Histograma de proporción de bloques de aulas de nivel superior	48
Gráfico 12. Recuento por número de plantas de bloques de aulas de nivel superior	49
Gráfico 13. Histórico anual de consumo eléctrico en nivel básico-medio	50
Gráfico 14. Estimación de carga eléctrica por destino final en Escuela Rene Louvel Bert	51
Gráfico 15. Histórico anual de consumo eléctrico en nivel básico-medio y superior	52
Gráfico 16. Consumo eléctrico por edificio en UBB campus Concepción	53
Gráfico 17. Variación de generación energética según posición de paneles fotovoltaicos	60
Gráfico 18. Consumo y generación mensual de energía en nivel superior	62
Gráfico 19. Consumo y generación para paneles en posición horizontal [00°] en nivel superior	63
Gráfico 20. Consumo y generación para paneles optimizados para julio [51°] en nivel superior	64
Gráfico 21. Consumo y generación para paneles optimizados anual [25°] en nivel superior	64
Gráfico 22. Consumo y generación mensual de energía en nivel básico-medio	67
Gráfico 23. Consumo y generación para paneles en posición horizontal [00°] en nivel básico-medio	67
Gráfico 24. Consumo y generación para paneles optimizados para julio [51°] en nivel básico-medio	68
Gráfico 25. Consumo y generación para paneles optimizados anual [25°] en nivel básico-medio	68
Gráfico 26. Consumo y generación para días característicos en ambos casos de estudio	70
Gráfico 27. Comparación costo neto de adjudicación en USD/Wp. PTSP	72
Gráfico 28. Costos fijos de operación y mantenimiento para ERNC. NREL	73
Gráfico 29. Tiempo de retorno de inversión para sistemas FV con distintas inclinaciones	75
Gráfico 30. Tiempo de retorno de inversión para generación energética extensiva	77
Gráfico 31. Relación entre superficie de captación y saldo de energía	80
Gráfico 32. Superficie mínima de captación para saldo de energía nulo	82

NOTA Todos los contenidos en los que no se especifique la fuente son de autoría propia.

Prefacio

El presente trabajo de tesis, se enmarca en el proyecto de investigación Conicyt-AKA ERNC-007 «CON*FIN - Evaluación del Potencial Solar en Áreas Urbanas», desarrollado conjuntamente entre Chile y Finlandia entre los años 2012 y 2016, con el financiamiento de la Comisión Nacional Científica y Tecnológica de Chile y la Agencia Finlandesa de Ciencias. El proyecto está dirigido por el Dr. Rodrigo García Alvarado, en calidad de investigador principal y los investigadores Dra. Maureen Trebilcock y Dr. Sergio Baeriswyl de la Universidad del Bío-Bío, Dr. Adelqui Fissore y Dr. Cristian Cuevas de la Universidad de Concepción-Chile y el Prof. Peter Lund de la Universidad Aalto de Helsinki-Finlandia; además de la coordinación de la Dra. Paulina Wegertseder y diversos técnicos y tesisistas de postgrado.

El objetivo general del proyecto, es desarrollar una metodología consistente y probada de evaluación del potencial solar urbano, considerando diversas tipologías de edificación en la ciudad de Concepción y Helsinki. El objeto de estudio de esta tesis se centra en el análisis particular de establecimientos educacionales, como programa específico y relevante dentro de la dimensión del contexto urbano construido. Para el desarrollo de este trabajo se utilizan antecedentes del proyecto CON*FIN, pero sólo como base para el desarrollo de acciones específicas relacionadas con el estudio de establecimientos educacionales; realizadas de forma personal. El análisis particular de la tipología educacional es un aspecto emancipado del proyecto marco, que se desarrolla exclusivamente en esta tesis de magíster, siendo sus objetivos y metodología desarrollados en forma individual y bajo la tutoría del Dr. Rodrigo García Alvarado. De esta manera, este trabajo de tesis constituye un aporte al desarrollo del proyecto marco, pero a través de una investigación independiente y emancipada, centrada en la tipología educacional como objeto particular de estudio.

a. Formulación general del problema - oportunidad

La mitad de la población mundial vive en ciudades, siendo Chile uno de los países más urbanos del mundo, con el 90% de la población viviendo en áreas urbanas (UN 2014) y un creciente consumo energético, acoplado al desarrollo socio-económico. Con una alta dependencia de combustibles fósiles en la matriz energética -32,9% petróleo y 24,4% carbón- y en la matriz eléctrica, de generación predominantemente térmica -41% carbón y 11% gas natural- (MINERGIA 2014). En este escenario, la energía solar ofrece quizás una de las mejores posibilidades de utilización de Energías Renovables No Convencionales [ERNC] en zonas urbanas, por sus posibilidades de interconexión entre diferentes sectores de la ciudad, entre otras ventajas (Lund 2012). Esta lógica de interconexión, ha sido analizada a nivel urbano para la ciudad de Concepción (García et al. 2014), demostrando que el recurso solar disponible en la ciudad, podría abastecer el consumo mediante la transferencia entre sectores de baja densidad con sobre-potencial y sectores de alta densidad con menor captación. Estos criterios, podrían hacerse extensivos a las infraestructuras educacionales, fundamentados en sus características intrínsecas propicias de dispersión urbana, extensión territorial y ocupación estacional. Dando respuesta a las necesidades de auto-consumo, donde se comprueba una intensificación de necesidades energéticas en el sector educativo en economías emergentes (Pérez-Lombard, Ortiz y Pout 2008), pero contribuyendo también con aportes a la generación eléctrica distribuida.

A nivel país, existe un escenario favorable para el desarrollo de las ENRC, respaldado en el marco normativo, que propicia la ampliación de la matriz energética mediante ENRC («Ley N° 20.698» 2013) y en planes como la Estrategia Nacional de Energía (MINERGIA 2013) -que establece la elaboración de un Plan de Acción de Eficiencia Energética [PAEE20]-, la Estrategia Nacional de Construcción Sustentable (MINVU 2013) -que aspira a aportar desde el sector de la construcción, a que un 10% de la energía generada sea por fuentes renovables al año 2024-, o Energía 2050 (MINERGIA 2014), un proceso participativo para la política energética de largo plazo, que pretende que el 60% de la generación eléctrica nacional, provenga de ERNC para el año 2035 y el 70% para el 2050. A estas iniciativas, se suman otras orientadas específicamente a la promoción de energía

solar, como los sistemas de incentivo para los medios de generación en base a energías renovables [Net Billing] («Ley N° 20.571» 2014) , las franquicias para los sistemas solares térmicos («Ley N° 20.365» 2009) o el Programa Techos Solares Públicos [PTSP] (MINERGIA [sin fecha]), orientado al mercado de sistemas fotovoltaicos para auto-consumo. Si bien todas estas iniciativas demuestran un claro compromiso energético a nivel país, ninguna de ellas menciona directamente a los establecimientos educacionales como espacio de oportunidad para el desarrollo de estrategias de sustentabilidad y eficiencia energética, y sólo el Plan Estratégico de Infraestructura Escolar (MINEDUC [sin fecha]), hace mención a una línea en sustentabilidad, confort y eficiencia energética, como criterio de diseño para nuevos espacios educativos, pero sin mayores detalles.

Los establecimientos educacionales presentan consumos energéticos crecientes, en sintonía con los nuevos modelos educativos que incrementan progresivamente el uso de las tecnologías de información y comunicación, y un limitado desempeño ambiental, desprovisto de climatización en la mayoría de los edificios públicos. Estas condiciones pueden atenuarse mediante la incorporación de sistemas fotovoltaicos en cubierta; pero deben ser orientados mediante estrategias de diseño que permitan maximizar sus capacidades, alcanzando un correcto dimensionamiento de las instalaciones. El aprovechamiento de energía solar en establecimientos educacionales, constituye por lo tanto, una potencial oportunidad tanto para autoabastecimiento, como para mejorar las condiciones de confort, llegando incluso a poder contribuir en aportes a la generación urbana eléctrica distribuida. Esta oportunidad se fundamenta en características intrínsecas propias de los establecimientos, como la localización dispersa en la ciudad -como resultado de ser un servicio social, vinculado a la densidad y crecimiento de la población-, la extensión volumétrica, con superficies relevantes dentro de la trama urbana y la ocupación estacional. Particularmente en el contexto de la comuna de Concepción, a esto se suma también una alta representatividad, reflejada en el importante número de establecimientos existentes.

Todas estas condiciones fortalecen la idea en términos de oportunidad y permiten imaginar que en futuros escenarios energéticos, los establecimientos educacionales podrían llegar a constituirse como espacios significativos en la generación de energía distribuida a escala local; contribuyendo con importantes aportes durante los periodos sin uso, e incluso activando sus propios espacios como lugares de encuentro para fines sociales. La propuesta sintoniza a la vez, con un nuevo modelo educativo contemporáneo, donde el edificio actúe como educador en prácticas sustentables de eficiencia energética, apoyando un proceso de concientización medioambiental.

b. Hipótesis de investigación

La capacidad solar activa de cubierta de los establecimientos educacionales, permite satisfacer la totalidad de los requerimientos energéticos existentes y puede optimizarse ampliamente en función de las condiciones formales y de configuración espacial; generando remanentes para mejorar los estándares de confort de los establecimientos y volcarse a la red eléctrica urbana, estableciendo un aporte significativo en la generación local de energía distribuida.

c. Objetivo general

Evaluar las condiciones formales -dimensión, diseño de cubierta, número de plantas, entre otros- y configuración espacial de establecimientos educacionales de distintos niveles formativos en la comuna de Concepción-Chile, en relación a su potencial solar activo de cubierta; para establecer estrategias de implementación de sistemas fotovoltaicos, que permitan contribuir en aportes a su desempeño energético y al desarrollo de una cultura solar en contextos urbanos.

d. Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones formales y de desempeño energético de infraestructuras educacionales, según distintos niveles formativos, para decodificar las características más representativas de los establecimientos.
- Establecer las condiciones favorables de estrategias de incorporación de tecnología solar fotovoltaica en edificios educacionales, que permiten optimizar el desempeño de los sistemas, minimizando costos asociados.
- Determinar el aporte de energía solar en el desempeño energético de distintos escenarios de consumo, para casos de estudio representativos, con el objetivo de evaluar la factibilidad de implementación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos educacionales.
- Explorar las incidencias paramétricas de la forma de los establecimientos educacionales, para interpretar los efectos de las decisiones de diseño que optimizan el potencial solar activo.
- Construir recomendaciones de diseño e incorporación arquitectónica, asociadas al uso de energía solar fotovoltaica, para establecimientos educacionales en la comuna de Concepción.

e. Mapa metodológico

Esta investigación se centra en métodos de simulación de casos de estudio representativos, seleccionados a partir de la caracterización del catastro educacional existente. La investigación se presenta en orden secuencial, integrando la metodología y los resultados a cada capítulo, dado que los resultados obtenidos en una etapa, son utilizados como insumo en la siguiente.

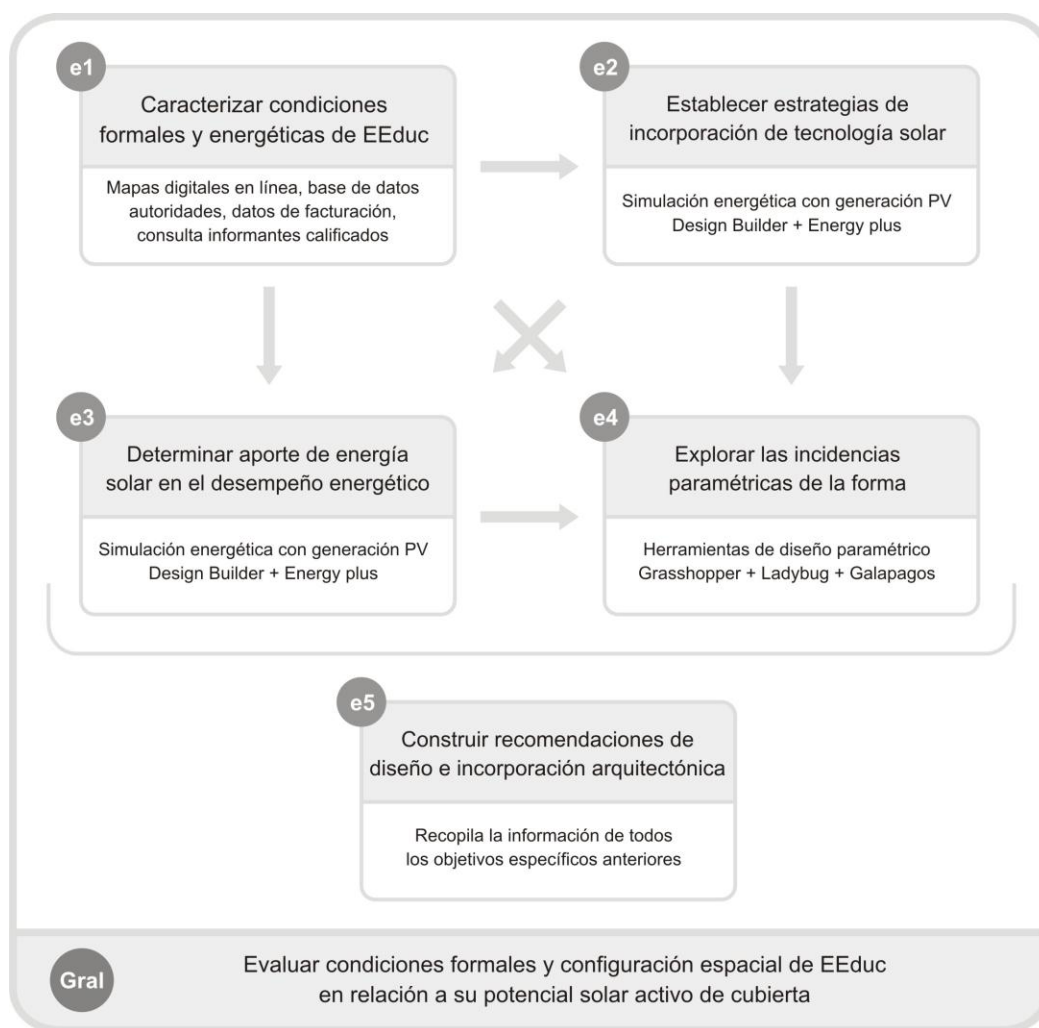


Figura 1. Mapa metodológico de la investigación

La Figura 1 presenta el mapa metodológico de la investigación, definido por los objetivos específicos y sus relaciones, e incluyendo también las principales herramientas utilizadas en cada etapa. El análisis y definición del conjunto de objetivos específicos, permite dar cumplimiento al objetivo general de la investigación.

Marco teórico para el estudio de potencial solar

en relación a condiciones formales

1.1 Incidencia de condiciones formales en el desempeño energético de las edificaciones

La incidencia de las condiciones formales en el desempeño energético de las edificaciones, ha sido estudiada por numerosos autores a lo largo del tiempo. En *Arquitectura y Clima* (Olgay 1962), el arquitecto y urbanista pionero en bioclimática Víctor Olgay, establecía una analogía entre el concepto de adaptación de los objetos naturales a las fuerzas de la naturaleza -desarrollado por el biólogo y matemático D'Arcy Wentworth Thompson en su libro *On Growth and Form*, 1952- y la adaptación de los edificios a los efectos del clima; analizando la incidencia de la radiación solar en distintas fachadas y estableciendo formas óptimas con orientaciones predominantes, en base a la relación de proporción entre los lados, en función del clima de diferentes regiones. Otros estudios (Coch y Serra 1995), mencionan el valor espacial de la energía y sus repercusiones climáticas, lumínicas y acústicas, rescatando como características definitorias de la forma, la compacidad -en relación al grado de concentración de masa-, la porosidad -relacionando el volumen lleno y vacío de los edificios-, y la esbeltez, definida por las proporciones generales del edificio. Al considerar la incidencia de las condiciones formales en relación al clima, estudios más recientes (Depecker et al. 2001), establecen una relación inversamente proporcional entre compacidad y consumo de energía, pero con resultados determinantes sólo para climas fríos; sin poder realizar determinaciones concluyentes para climas templados. En el contexto chileno, estudios actuales (García y González 2014), analizan la importancia de las condiciones de forma en viviendas unifamiliares; identificando incidencias en la contigüidad, altura y variación, pero con escasa repercusiones por efecto de la orientación, y sugiriendo un factor de regulación vinculado a la superficie de muros expuestos, para reducir el gasto energético de las viviendas.

Sin embargo, estos estudios refieren especialmente a las condiciones de forma en el desempeño energético, centrados en la búsqueda de un equilibrio entre las tensiones térmicas de interior y exterior. El reciente desarrollo de las tecnologías solares, abre un nuevo capítulo sobre las condiciones de forma, asociadas a la optimización de potencial solar. Mientras que en la definición original, las condiciones formales apuntaban a un equilibrio entre forma y desempeño energético de la edificación, en la definición contemporánea, vinculada a la capacidad solar activa, se agrega una condición relacionada a la accesibilidad al sol; afectada por elementos como la superficie y posición relativa de los planos de captación o los factores de sombreado. Esta condición se

justifica aún más, al considerar el bajo rendimiento general que las tecnologías fotovoltaicas han alcanzado hasta ahora, y los elevados costos de inversión inicial que las instalaciones implican.

Partiendo de la premisa de que las condiciones de forma y envolvente solar pueden ser modificadas para controlar los efectos de la demanda energética, algunas exploraciones (Knowles 2003), han propuesto un desarrollo arquitectónico, tomando como referencia los límites derivados del movimiento relativo del sol. Otros trabajos (Hachem, Athienitis y Fazio 2011), han investigado los efectos de las variaciones formales en la configuración espacial y el diseño de cubierta, sobre el potencial solar de viviendas unifamiliares de latitudes medias; concluyendo que, en geometrías con auto-sombreado, el número de fachadas en sombra y sus dimensiones, son los principales parámetros que afectan la incidencia del sol y la radiación transmitida. En el contexto regional, la creciente demanda energética residencial, ha llevado a estudiar el potencial de captación solar asociado a las características formales de cubierta en viviendas unifamiliares, probando que la producción solar, puede suplir con creces el promedio de consumo eléctrico anual de una vivienda (Zalamea y García 2014).

Aunque todos estos estudios muestran desde distintos enfoques y escenarios, las relaciones entre forma, desempeño energético y potencial solar en la arquitectura, estas condiciones no han sido revisadas para el programa específico de establecimientos educacionales. Si bien existen muchos ejemplos de incorporación de tecnologías solares en este tipo de programa, no se ha abordado la decodificación de las incidencias de la forma en relación al potencial solar, a partir de las características intrínsecas particulares de los establecimientos educacionales.

1.1.1 Diseño paramétrico en la optimización formal arquitectónica

Las exploraciones formales arquitectónicas, adquieren actualmente una nueva dimensión en base al desarrollo de herramientas de diseño paramétrico. El diseño paramétrico, es un proceso basado de relaciones coherentes entre valores, que permite que cambios en un solo aspecto, produzcan alteraciones dentro del sistema total (Sakamoto y Ferré 2008). A partir de la definición de una familia de parámetros iniciales y la programación de las relaciones formales que se establecen entre ellos, se puede obtener como resultado la generación de una determinada geometría. De esta manera, se establece una relación entre un conjunto de parámetros variables de entrada y un

resultado, que en consecuencia es también variable y puede adaptarse a múltiples requerimientos y criterios de evaluación (Salcedo 2012).

La capacidad y potencialidad de estas herramientas de diseño paramétrico, puede combinarse con una serie de plugins de análisis energético, que permiten sortear la brecha existente entre el modelado de diseño paramétrico y el software de análisis o simulación. En los procesos tradicionales, los arquitectos diseñan un edificio o un espacio y su forma, para luego someterlo a un análisis energético; a partir del cual rara vez la forma original se ve modificada. Los procesos de simulación, solo se contemplan una vez que los aspectos formales de arquitectura han sido definidos, siendo el proyecto demasiado rígido en esta etapa de diseño, por lo que sólo se incorporan cambios menores en las consideraciones formales. En cambio, las nuevas modalidades de trabajo integrado, permiten que los profesionales realicen una integración activa del análisis energético en el desarrollo de la forma arquitectónica, desde etapas tempranas de diseño. De esta manera, el producto de la arquitectura deja de ser una imposición de deseo de los arquitectos, para transformarse en una respuesta basada en el análisis y desempeño y generada a partir de múltiples variables fundamentadas en datos reales (Anton y Tănase 2016).

La flexibilidad de las herramientas de diseño paramétrico, permite obtener un universo de resultados de desempeño en un tiempo reducido. Lo que hace necesario poder identificar la solución más eficaz, para resolver un determinado problema. Para dar solución a esta particularidad, en 1970, John Holland incorporó una técnica de Inteligencia Artificial basada en Algoritmos Genéticos [AG], llamados así por su relación con la evolución biológica en base a la genética molecular. De manera similar a lo que sucede en la evolución biológica de una población de individuos, estos algoritmos modifican un conjunto de datos para evaluar un determinado criterio o función objetivo, sometiéndolos a acciones selectivas de mutación y recombinación, en función de las cuales los valores más adaptados permanecen y los menos aptos se descartan. De manera general, los AG evalúan la puntuación o *fitness* de cada uno de los individuos, permitiendo que se reproduzcan de acuerdo a su puntuación y permitiendo que los individuos de la nueva población intercambien material genético, pudiendo incluso ser alterados por una mutación espontánea (Salcedo 2012).

Una de las herramientas utilizadas en diseño paramétrico, es el software *Grasshopper* (Robert Mc Neel & Associates [sin fecha]); un editor de algoritmos visuales integrado a la plataforma de

modelado *Rhinoceros*, que permite crear modelos de diseño paramétrico y algorítmico, a partir componentes generadores. El software, incluye un módulo de optimización paramétrica llamado *Galapagos Evolutionary Solver* que, partiendo del concepto de principios evolutivos aplicados a la resolución de problemas (Rutten 2010), permite determinar un óptimo a partir de soluciones evolutivas y algoritmos genéticos; para maximizar o minimizar un valor objetivo en función de parámetros variables. Como complemento, existen una serie de plugins de código abierto para análisis ambiental, como *Ladybug* (Sadeghipour y Pak 2013), que provee una variedad de gráficos interactivos 3D, para la toma de decisiones durante etapas primarias de diseño.

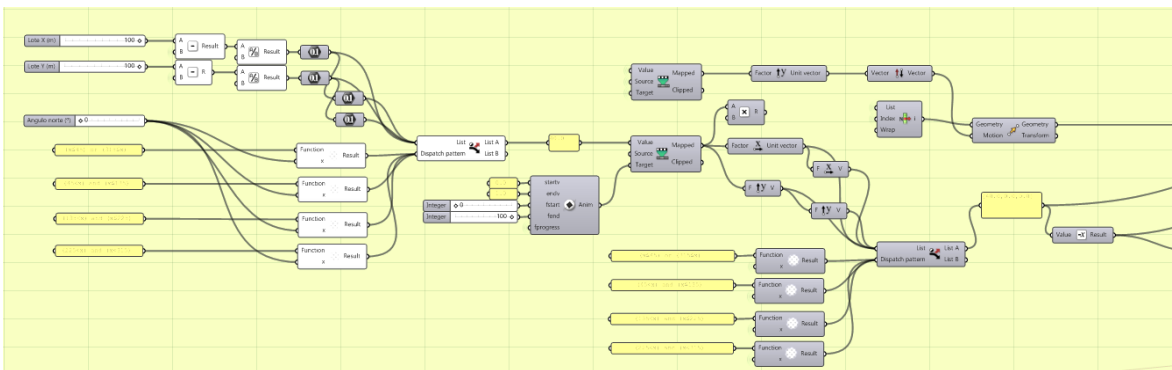


Figura 2. Ejemplo de definición paramétrica en *Grasshopper*

La Figura 2, muestra una definición paramétrica -grupos de actividades preestablecidas para dar solución a un problema de diseño concreto-, en el entorno visual de *Grasshopper*. Las definiciones involucran la creación de tareas personalizadas, definidas a partir de variables interactivas y buscando el resultado más eficiente para resolver un determinado problema. A su vez -por su carácter de código abierto-, estas definiciones constituyen una base de datos, que puede ser utilizada en otros trabajos que guarden cierto grado de similitud, con los objetivos que se busca alcanzar (Morales 2012). La flexibilidad que otorgan las herramientas paramétricas, permite que la información involucrada en una definición, pueda cambiarse fácilmente -al cambiar las características de contexto o climáticas, por ejemplo-, generando una nueva definición, con parámetros modificados adaptados al nuevo contexto.

En arquitectura, existen múltiples investigaciones en las que se utilizan algoritmos genéticos para evaluar uno o varios indicadores de desempeño energético. Algunos estudios (Tuhus-Dubrow y Krarti 2010), utilizan la combinación de AG con simulación energética, para desarrollar herramientas que permitan optimizar la forma y envolvente de las edificaciones, con el objetivo de

minimizar el uso de energía en tipologías residenciales; concluyendo que las formas rectangulares y trapezoidales tienen el mejor desempeño en cinco climas distintos. En el contexto local, otras experiencias (Troncoso et al. 2015), utilizan un análisis multi-objetivo mediante AG y simulación dinámica, para generar un diseño paramétrico de mansarda -concebida como extensión de la vivienda unifamiliar-, con integración de tecnologías solares. La función objetivo del algoritmo, se define para cumplir tres objetivos integrados -maximizar la energía solar, maximizar la superficie habitable y minimizar la longitud de los elementos estructurales-, otorgando como resultado una solución adaptada que varía según la orientación de la vivienda.

Estas experiencias, presentan nuevos escenarios de diseño, donde la evaluación de parámetros de desempeño energético, se incorpora a la exploración de condiciones formales desde etapas tempranas de diseño. Todas estas manifestaciones, constituyen el punto de partida para el desarrollo de esta investigación, donde las condiciones formales de los establecimientos educacionales, son decodificadas para conformar una base de datos paramétrica, que permita optimizar el desempeño del potencial solar disponible.

1.1.2 Desempeño energético en establecimientos educacionales

El paradigma de la sustentabilidad -devenido a partir de la crisis del petróleo de 1973-, incorpora una nueva dimensión ambiental y energética, que debe necesariamente ser considerada en los establecimientos educacionales; buscando maximizar los estándares de confort, con el mínimo consumo energético posible. Esta dimensión, ha sido liderada en el sector educacional en países como Inglaterra, Francia y Estados Unidos; destacando particularmente, la consideración de acondicionamiento térmico, iluminación y ventilación de los edificios (ACHEE 2014). En el contexto regional, estudios realizados en Argentina han indagado sobre la relación entre tipologías educacionales y variables energéticas; estudiando prototipos edilicios de educación primaria, en función de sus características morfológicas y constructivas, para generar un estudio comparativo que contribuya a la toma de decisiones y adopción de futuras políticas (Hoses, San Juan y Rosenfeld 1999).

En Chile, el desarrollo de políticas de desempeño ambiental y energético vinculadas a establecimientos educacionales se encuentra todavía en un estado embrionario, supervisado por normativas parciales sobre iluminación, temperatura y ventilación -como la Ordenanza General de

Urbanismo y Construcción («Decreto N° 47» 2016), exigencias sobre infraestructura («Decreto N° 548» 2012) y condiciones sanitarias y ambientales («Decreto N° 594» 2015)-; pero sin normativas específicas sobre desempeño energético. Pese a ello, desde hace más de una década se han estado implementando diversos programas e iniciativas a nivel nacional, que han establecido constantes avances en la incorporación de criterios de sustentabilidad en establecimientos educacionales. Algunas de estas iniciativas se centraron en la incorporación de la sustentabilidad en la enseñanza curricular, como el proyecto BID «Aprendizaje en las Escuelas del Siglo XXI», que realiza estudios y proyectos piloto en infraestructura escolar y aprendizaje, o el Sistema Nacional de Certificación Ambiental de Establecimientos Educacionales [SNCAE], que incorpora estándares de sustentabilidad en el área curricular. Otras iniciativas, desarrollan recomendaciones de diseño para los espacios educativos -Guía de Diseño de Espacios Educativos (MINEDUC y UNESCO 1999), Nuevos Espacios Educativos (MINEDUC 2014)-, e incluso con perfiles específicos sobre eficiencia energética, como la Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educacionales [GEEEduc] (ACHEE 2014), que estudia la incidencia de distintos parámetros en el desempeño energético de aulas tipo, proponiendo recomendaciones de diseño pasivo con consideraciones energéticas, lumínicas y acústicas, para aulas integrales ubicadas en distintas zonas climáticas del país. Por otra parte, otro instrumento de fiscalización establece Términos de Referencia Estandarizados [TDRe] (CITEC-UBB y DECON-UC 2015) de desempeño en eficiencia energética y confort ambiental, para licitaciones de obras nuevas estatales, entre las que se considera a los edificios educacionales.

Todas estas iniciativas contribuyen al desarrollo del desempeño ambiental y energético de los establecimientos educacionales. Pero según distintos documentos nacionales e internacionales citados en la GEEEduc, se ha podido comprobar que la componente solar activa, sólo ha sido considerada hasta ahora, para la producción de agua caliente sanitaria [ACS], desconociendo la alternativa de generación eléctrica como potencial oportunidad. Esta alternativa de producción solar, podría satisfacer los requerimientos energéticos existentes, incluso con remanentes para mejorar las condiciones actuales de confort de los establecimientos públicos -en su mayoría carentes de sistemas de climatización-, o contribuir a mejorar las condiciones precarias de los sistemas eléctricos, de establecimientos conectados a redes privadas vecinas o abastecidos por generadores eléctricos en zonas urbanas (MINEDUC [sin fecha]), entre otros.

1.2 Energía solar y sistemas fotovoltaicos

1.2.1 Recurso solar en el contexto nacional y local

Por su extensión geográfica, Chile presenta un recurso solar difuso y discontinuo, presentando zonas con enorme potencial en el norte del país, como el desierto de Atacama -considerada una de las regiones con mayor radiación solar en el mundo (Woodhouse y Meisen 2011)-; hasta zonas con escaso recurso solar en el sur del país (Figura 3). Aún en latitudes medias, la comparación del contexto chileno con algunas de las ciudades europeas de mayor desarrollo de tecnología solar, evidencia registros sugerentes. La ciudad de Friburgo -conocida como la ciudad solar- es el lugar con mayor cantidad de aplicaciones de energía solar de Alemania con una radiación media anual de 1215 kWh/m², mientras que en Cádiz, España la media anual alcanza los 1978 kWh/m². En el contexto nacional, la ciudad de Puerto Montt registra una radiación media anual de 1307 kWh/m², superando el registro de Friburgo; mientras que Concepción alcanza los 1690 kWh/m² al año (SYNERGY 2016). Estas comparaciones, demuestran que aún con recursos solares limitados, la tecnología solar puede desarrollarse para contribuir a la diversificación energética. Iniciativas como el Mapa Energético-Solar de Concepción (García et al. 2014), evidencian que el recurso solar disponible en la ciudad, podría abastecer el consumo mediante la transferencia entre sectores; constituyendo una perspectiva favorable para el desarrollo de iniciativas de tecnología solar. La energía solar en Chile, constituye cerca del 1% de la matriz eléctrica nacional; con una capacidad instalada fotovoltaica del 3% en el Sistema Interconectado Central [SIC] y del 4% en el Sistema Interconectado del Norte Grande [SING] (MINERGIA 2014), equivalentes a 220 MW y con 570 MW en construcción (Jiménez-Estévez et al. 2015).



Figura 3. Radiación solar global horizontal en Chile.
solargis.info

Con el objetivo de conocer los valores detallados de radiación solar para la ciudad de Concepción, se consultan de bases de datos de registros solarimétricos y software de análisis energético.

LOCALIDAD: **CONCEPCION**
 LATITUD: 36,83 [GRADOS] SUR

Az	INCL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
180 al Norte	27	200,0	170,4	159,5	119,6	81,3	54,7	72,6	104,7	131,3	165,8	181,1	190,6	1631,5
	37	187,4	164,1	158,5	122,9	85,2	57,7	76,6	108,4	131,9	161,2	171,0	177,5	1602,4
	47	171,0	154,2	154,2	123,4	87,3	59,4	78,9	109,7	129,6	153,1	157,7	160,8	1539,1
	57	151,2	141,3	146,3	121,2	87,4	59,8	79,4	108,6	124,5	142,1	141,0	141,1	1443,9
	90	91,1	87,7	105,0	98,1	75,6	52,8	69,8	90,3	93,8	92,8	85,6	87,2	1029,9
150	27	195,8	163,2	151,0	112,0	75,9	52,1	68,3	97,5	123,8	160,2	175,4	188,0	1563,2
	37	184,9	157,1	147,7	113,2	78,3	54,3	71,0	99,2	122,2	154,8	167,1	177,0	1526,9
	47	179,3	154,7	140,0	111,9	79,1	55,3	72,3	98,8	118,2	148,6	162,6	170,6	1491,4
	57	163,3	141,0	135,7	108,1	78,1	55,2	71,9	96,2	114,0	138,8	148,3	155,5	1406,1
	90	120,9	108,0	105,6	81,5	64,8	47,5	61,2	74,5	87,4	106,9	110,9	113,2	1082,5
120	27	194,1	162,5	140,0	98,8	65,3	45,3	58,7	84,1	115,9	153,9	175,0	186,3	1479,9
	37	197,9	157,0	144,9	99,7	67,7	41,8	57,8	88,4	115,2	153,5	173,8	192,2	1489,9
	47	191,1	163,1	137,5	105,4	64,1	42,7	56,1	90,3	114,0	153,0	172,4	181,4	1471,0
	57	177,4	149,4	143,0	99,5	64,2	43,5	57,4	82,9	118,9	146,3	158,1	182,7	1423,3
	90	159,3	136,7	132,1	81,9	52,1	34,5	46,1	67,8	104,8	133,3	142,9	149,1	1240,5
90	27	193,8	154,3	133,4	90,6	57,3	40,0	51,4	77,0	106,5	146,7	175,1	185,5	1411,5
	37	188,6	157,8	134,4	89,8	58,1	37,3	49,3	79,0	108,7	148,3	170,5	180,2	1401,9
	47	195,5	153,4	133,4	93,4	56,8	39,7	51,2	77,5	104,7	151,2	168,9	194,3	1419,9
	57	193,8	151,0	136,1	87,5	61,7	34,5	51,8	76,5	107,9	140,8	175,1	182,2	1399,1
	90	161,6	140,0	113,4	78,0	55,5	37,6	49,8	69,2	84,0	137,5	144,9	151,2	1222,3
0 al Sur	27	183,5	134,2	98,6	53,8	32,3	24,5	29,3	45,0	75,8	123,9	160,3	183,4	1144,6
	37	166,1	117,4	80,3	41,9	31,3	23,7	28,4	38,8	61,0	107,2	144,5	168,1	1008,7
	47	72,6	62,4	55,1	40,4	30,1	22,7	27,2	37,3	49,1	63,7	70,1	76,4	607,0
	57	70,1	61,6	54,8	38,7	28,6	21,5	25,8	35,6	46,9	64,5	67,4	73,5	589,1
	90	86,0	53,8	44,2	31,7	22,7	16,7	20,4	28,7	38,3	51,2	73,7	90,9	558,2

Figura 4. Radiación solar global mensual y anual en Concepción. Registro solarimétrico

La Figura 4, muestra parte de la base de datos de la publicación «Irradiancia Solar en Territorios de la república de Chile - Registro solarimétrico» (CDT, PNUD y UTFSM 2008), que ofrece datos originados en el Laboratorio de Energía y Evaluación Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María. Con valores de radiación mensual y anual para distintas ciudades de Chile, pero sólo para ángulos característicos de acimut -0 al sur, 90, 120, 150, 180 al norte-, e inclinación- 27, 37, 47, 57 y 90-. En el registro, puede observarse que la máxima radiación anual para la ciudad de Concepción, se produce para el acimut norte e inclinación de 27 grados, con 1631,5 kWh/m²-año; pero dado que sólo se conocen valores para inclinaciones características, no es posible determinar si existen valores de radiación superior, para posiciones que no hayan sido consideradas.

Capítulo 1. Marco teórico para el estudio de potencial solar en relación a condiciones formales

AZ / IN	0	5	10	15	20	25	30	35	37	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
-170	1533	1482	1424	1357	1284	1205	1123	1043	1010	963	885	810	738	670	608	552	508	479	459	442
-160	1533	1484	1428	1363	1292	1217	1138	1058	1026	980	903	829	759	694	634	584	547	517	492	471
-150	1533	1488	1434	1374	1307	1235	1161	1085	1055	1010	936	866	799	739	686	641	602	569	540	513
-140	1533	1492	1444	1388	1326	1261	1192	1122	1095	1053	985	920	860	804	753	708	666	629	595	564
-130	1533	1498	1455	1406	1351	1292	1230	1168	1143	1105	1044	985	928	875	826	779	736	695	657	621
-120	1533	1505	1469	1426	1379	1327	1273	1218	1196	1162	1107	1053	1000	949	900	852	807	763	721	680
-110	1533	1512	1484	1449	1409	1366	1319	1271	1251	1222	1172	1121	1071	1022	973	924	877	830	784	739
-100	1533	1520	1500	1473	1441	1405	1366	1324	1307	1281	1235	1188	1141	1092	1043	993	943	894	844	795
-90	1533	1529	1516	1498	1474	1445	1413	1377	1362	1338	1296	1252	1206	1158	1108	1057	1005	952	899	846
-80	1533	1537	1533	1522	1506	1484	1458	1427	1413	1392	1353	1311	1266	1218	1167	1115	1060	1004	947	890
-70	1533	1545	1549	1546	1537	1521	1500	1474	1462	1442	1406	1365	1321	1272	1220	1165	1108	1049	988	927
-60	1533	1553	1564	1568	1565	1555	1539	1516	1506	1488	1453	1414	1369	1319	1266	1208	1148	1085	1020	954
-50	1533	1560	1578	1588	1591	1586	1574	1554	1544	1528	1495	1456	1410	1360	1304	1244	1180	1113	1044	974
-40	1533	1566	1590	1606	1613	1612	1604	1587	1578	1562	1530	1491	1445	1393	1335	1273	1205	1134	1061	985
-30	1533	1571	1600	1620	1631	1634	1628	1613	1605	1590	1559	1520	1474	1420	1360	1294	1223	1148	1070	989
-20	1533	1575	1607	1631	1645	1650	1647	1634	1626	1612	1581	1542	1494	1439	1378	1309	1235	1156	1073	987
-10	1533	1577	1612	1638	1654	1661	1658	1646	1639	1625	1595	1555	1508	1452	1388	1318	1241	1159	1073	983
0	1533	1578	1614	1640	1657	1665	1663	1652	1644	1631	1600	1561	1513	1457	1394	1323	1245	1162	1074	982
10	1533	1577	1613	1639	1656	1663	1661	1649	1642	1629	1598	1560	1512	1456	1393	1323	1246	1164	1077	987
20	1533	1576	1609	1634	1649	1655	1652	1640	1632	1618	1588	1550	1503	1448	1386	1318	1243	1164	1081	994
30	1533	1572	1603	1624	1637	1641	1636	1623	1615	1601	1570	1532	1485	1432	1372	1306	1235	1159	1080	999
40	1533	1568	1594	1611	1620	1621	1614	1598	1590	1575	1544	1506	1460	1408	1351	1287	1220	1148	1073	997
50	1533	1562	1582	1595	1599	1596	1586	1568	1559	1543	1511	1472	1428	1377	1322	1261	1197	1129	1059	988
60	1533	1555	1569	1576	1575	1567	1553	1532	1522	1505	1472	1433	1388	1339	1285	1228	1167	1103	1037	970
70	1533	1548	1555	1554	1547	1534	1515	1491	1480	1461	1426	1386	1342	1293	1241	1186	1128	1068	1006	944
80	1533	1540	1539	1531	1517	1498	1474	1445	1432	1412	1374	1333	1288	1240	1190	1136	1081	1024	966	908
90	1533	1532	1522	1507	1486	1460	1430	1396	1381	1358	1318	1274	1229	1180	1130	1079	1026	972	918	864
100	1533	1523	1506	1482	1453	1420	1383	1344	1327	1301	1257	1211	1163	1114	1065	1014	964	913	862	812
110	1533	1515	1489	1457	1421	1380	1336	1290	1271	1242	1193	1143	1093	1043	994	944	896	848	801	755
120	1533	1507	1474	1434	1389	1341	1289	1236	1214	1182	1127	1073	1021	969	919	871	824	779	736	694
130	1533	1500	1460	1413	1360	1304	1245	1184	1159	1123	1062	1004	947	894	843	796	751	710	670	633
140	1533	1494	1447	1394	1335	1271	1205	1136	1109	1068	1002	937	877	821	769	722	680	642	607	575
150	1533	1489	1437	1378	1313	1244	1171	1096	1067	1022	950	880	814	754	700	654	614	579	548	521
160	1533	1485	1430	1366	1297	1222	1144	1066	1035	989	913	840	770	704	644	593	554	523	498	476
170	1533	1483	1425	1359	1286	1208	1127	1047	1015	968	890	816	744	675	613	557	512	483	461	444
180	1533	1482	1423	1356	1282	1203	1120	1039	1007	959	881	806	733	664	600	544	497	466	447	432

Figura 5. Radiación solar global anual en Concepción. TRNSYS - Modificado de Con-Fin

La Figura 5, muestra otro registro de radiación solar, obtenido a partir del software TRNSYS -de simulación de régimen transitorio para sistemas de energía solar-, que utiliza la base de datos de Meteororm del Aeropuerto Carriel Sur de Concepción [WMO Index number 85682]. Considerando ángulos de acimut cada 10 grados e inclinación cada 5 grados, puede apreciarse que la máxima radiación anual es de 1665 kWh/m²-año, registrada para el acimut norte [0 grados] y una inclinación de 25 grados; consecuentemente con el registro anterior.

Esta información presentada sobre registros de radiación solar para la ciudad de Concepción, será utilizada para realizar una evaluación comparativa, que permita definir la posición óptima de sistemas fotovoltaicos, durante la sección 3.1 - Simulación energética con implementación de sistemas fotovoltaicos.

1.2.2 Funcionamiento y clasificación de sistemas fotovoltaicos

En 1830 el físico francés Edmund Becquerel, descubría el efecto fotovoltaico y la capacidad de generar energía eléctrica a partir de la luz solar. Casi 50 años después el inventor americano Charles Fritts producía las primeras células fotovoltaicas de selenio, con un rendimiento menor al 1%. No fue hasta 1954, cuando investigadores de los Laboratorios *Bell Telephone*, en búsqueda de una fuente de energía para los sistemas telefónicos de áreas rurales, realizaron un descubrimiento casual, comprobando que se generaba una importante corriente eléctrica al exponer a la luz células de silicio modificado, en lugar de las tradicionales células de selenio que se habían estado utilizando; alcanzando un rendimiento del 6% y de hasta un 15% en laboratorio (Butti y Perlin 1985). Luego de más de 60 años de desarrollo de distintas tecnologías de células fotovoltaicas, los rendimientos generales son aún limitados.

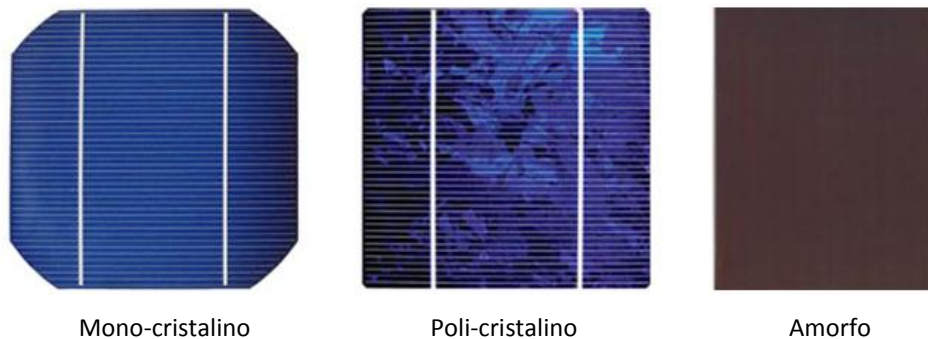


Figura 6. Tecnología de células fotovoltaicas

La cantidad de energía producida por una célula, depende del tipo de material, la intensidad de energía solar y el ángulo de incidencia. La Figura 6, muestra las tecnologías de células fotovoltaicas más comúnmente utilizadas en la actualidad. Las células de silicio mono-cristalinas son obtenidas del silicio puro y presentan la mayor eficiencia, con un rendimiento del 15-18%. La tecnología de silicio poli-cristalino se fabrica a partir de restos de silicio mono-cristalino y aunque la eficiencia de 13-16% es algo inferior que en las anteriores, el menor costo ha contribuido a incrementar su uso a nivel mundial. Por último las células de silicio amorfo, presentan un menor rendimiento de 6-8% pero bajo costo, por lo que son adecuadas para fabricación masiva, pero en aplicaciones limitadas de pequeña potencia (Tripathy, Sadhu y Panda 2016). Se espera que para el periodo 2020-2030, las células fotovoltaicas de silicio amorfo alcancen rendimientos del 15%, las poli-cristalinas del 21% y las mono-cristalinas del 26% (IEA 2011). Aunque el aporte de la tecnología fotovoltaica es

todavía exiguo, constituyendo menos del 1% de la producción energética mundial (Wiginton, Nguyen y Pearce 2010), las expectativas sobre su desarrollo aparecen como una importante tendencia, en la diversificación de la matriz energética mundial (Wiginton, Nguyen y Pearce 2010; Pearce 2002; Neuhoff 2005).

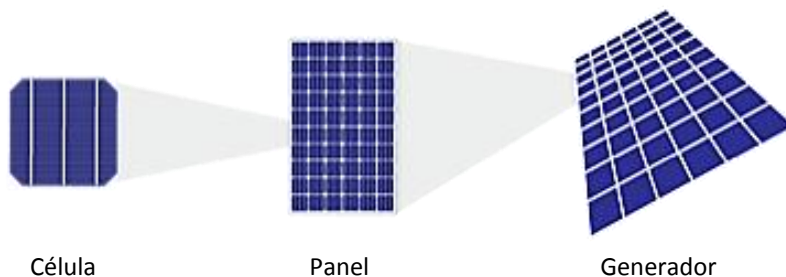


Figura 7. Concepto de generador fotovoltaico

La Figura 7, muestra el concepto de un sistema generador fotovoltaico. Donde la unión de células fotovoltaicas conectadas en serie y en paralelo, forman un panel fotovoltaico, que se agrupa con otros para producir mayor generación eléctrica, formando un generador fotovoltaico.

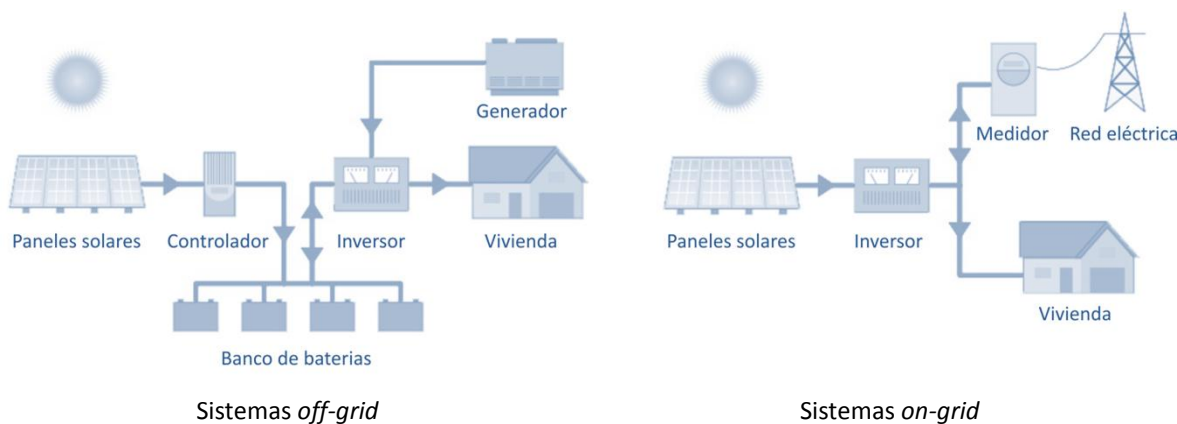


Figura 8. Clasificación de sistemas fotovoltaicos por tipo de conexión

La clasificación por tipo de conexión, permite diferenciar dos grandes grupos dependiendo de la dependencia de la red eléctrica; que pueden verse en la Figura 8. Los sistemas *off-grid* suelen utilizarse en lugares con difícil accesibilidad a la red eléctrica, ya que funcionan aislados de la misma. El almacenamiento de energía se realiza en un banco de baterías, que incrementa significativamente el costo de inversión y generalmente cuentan con generador de respaldo para los momentos en que no hay producción solar. Los sistemas *on-grid* funcionan conectados a la red eléctrica, utilizada como complemento a la generación fotovoltaica. La energía producida es

utilizada para consumo directo, pudiendo vender los excedentes -que son contabilizados en un medidor bidireccional-, a la compañía distribuidora. Existen también sistemas mixtos, conectados a la red con respaldo de banco de baterías, que pueden funcionar como autónomos cuando existen fallas en la red. En todos los casos, las células fotovoltaicas producen energía en corriente continua, por lo que cualquiera sea el sistema, deberá contar con un inversor para convertir la energía a corriente alterna, con la que funcionan los artefactos de uso doméstico.

1.2.3 Tecnología fotovoltaica en arquitectura y educación

El desarrollo de la tecnología fotovoltaica, ha hecho posible considerar la implementación de los sistemas a distintos componentes arquitectónicos, como cubiertas inclinadas, cubiertas planas, fachadas o sistemas de protección solar; disponiendo los paneles sobre los sistemas de pared y cubierta tradicional existentes, o formando parte de los mismos (Jelle y Breivik 2012).



BAPV



BIPV

Figura 9. Implementación arquitectónica de sistemas fotovoltaicos

La Figura 9, muestra los distintos tipos de implementación arquitectónica de sistemas fotovoltaicos. Cuando los sistemas fotovoltaicos reemplazan una parte de los materiales convencionales de construcción, integrándose a la envolvente en la cubierta o fachada del edificio, la implementación se conoce como BIPV [*Building Integrated Photovoltaics*]. Los sistemas BIPV son considerados parte funcional del edificio, integrados arquitectónicamente en el diseño y sirven simultáneamente como componente de la envolvente y generador de energía eléctrica. Por otra parte, cuando los sistemas fotovoltaicos son agregados como complemento a los edificios y por lo tanto no están relacionados directamente con aspectos funcionales, la implementación se conoce como BAPV [*Building Attached Photovoltaics*] (Peng, Huang y Wu 2011). La implementación en cubierta debe considerar que en la actualidad, la cubierta puede ser diseñada para varias

Capítulo 1. Marco teórico para el estudio de potencial solar en relación a condiciones formales

funciones simultáneas, incluyendo la integración de sistemas fotovoltaicos para generación eléctrica (Sui y Munemoto 2007), siendo la generación de energía fotovoltaica proporcional área de captación y dependiente de la inclinación y orientación [acimut] de la misma (IEA 2012).



ALEMANIA, Postdam
Universidad de Postdam



FRANCIA, Saint-Ouen
Zero Energy School



EMIRATOS ARABES, Abu Dhabi
Adec School Building



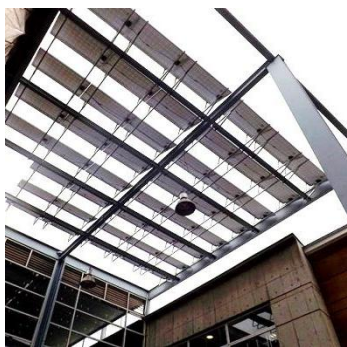
INGLATERRA, Westcliff-on-Sea
Westborough Primary School



EEUU, Los Ángeles
Green Dot Animo High School



ESPAÑA, Barcelona
Centro de gestión de la energía



CHILE, Santiago de Chile
Universidad Católica - San Joaquín



CHILE, Santiago de Chile
Colegio Amanda Labarca



CHILE, Santiago de Chile
Colegio Maria Luisa Bombal

Figura 10. Tecnología fotovoltaica en establecimientos educacionales

La implementación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos educacionales, tiene distintas manifestaciones y con distintos tipos de integración, como puede verse en los ejemplos de la Figura 10, que recoge experiencias de edificios educativos de distintas partes del mundo.

En el contexto chileno, existen distintas experiencias de incorporación de sistemas fotovoltaicos. La Universidad Católica, ha instalado un sistema fotovoltaico de 9 kWp que produce casi 16.500 kWh-año¹, definiendo un espacio pergolado sobre el casino de una de las facultades del campus San Joaquín. La comuna de Vitacura en Santiago de Chile, impulsa el desarrollo de energías renovables mediante la iniciativa «Techo 30+», que persigue que el 30% de la energía consumida en la comuna, provenga de energías renovables al año 2030 (Municipalidad de Vitacura 2014). En su primera fase, la iniciativa detecta los 30 techos de mayor potencial para producir energía solar, dentro de los que se encuentran el Colegio Amanda Labarca y el Colegio María Luisa Bombal, que han implementado sistemas en fachada de 1 kWp con una producción de 2.025 kWh-año¹, como acción inicial de sensibilización a profesores, alumnos y apoderados.

Otras iniciativas, se han incorporado al sistema de incentivo para los medios de generación en base a energías renovables [*Net Billing*] («Ley N° 20.571» 2014), siendo la primera experiencia la del Colegio Suizo de Santiago de Chile, con una instalación BAPV de 25 kWp, que permite producir un 20% del actual consumo del colegio (Cámara Chileno-Alemana 2015).

Por otra parte, también el Programa Techos Solares Públicos [PTSP] (MINERGIA [sin fecha]), cuenta con más de 10 establecimientos educacionales adheridos en distintas regiones del país; donde la Escuela Básica Hacienda San Pedro en Copiapó, ha sido la primera en integrarse al programa (MINERGIA y GIZ 2015), con una capacidad instalada de 12 kWp.

Aunque la incorporación de tecnologías fotovoltaicas en establecimientos educacionales sigue siendo en el contexto nacional todavía muy limitada, todas estas experiencias incipientes, constituyen los primeros pasos de sensibilización, para el desarrollo de tecnologías solares asociadas a programas educativos.

¹ <http://www.tritec-energy.com/es/instalaciones-de-referencia>

1.3 Marco Regulatorio Energético Nacional

El marco regulatorio energético nacional, posee distintos instrumentos relacionados al desarrollo de las ERNC. A nivel país, la Ley 20/25 («Ley No 20.698» 2013) propicia la ampliación de la matriz energética mediante fuentes renovables no convencionales, con el objetivo de incrementar las ERNC hasta alcanzar el 20% de la matriz energética, para el año 2025. Estableciendo objetivos escalonados para los años previos al año meta, mediante un sistema de licitaciones anuales de energía renovable, que contribuye a que se cumplan los objetivos previstos. En materia de energía solar, la Ley 20.365 («Ley N° 20.365» 2009) establece un sistema de franquicias para los sistemas solares térmicos [SST]. Incentivando el mercado solar al permitir que las empresas constructoras descuenten el costo de instalación y mantención de 5 años, de los SST instalados en viviendas nuevas; lo que beneficia directamente al usuario con ahorros significativos de ACS.

Particularmente para el desarrollo de esta investigación, se analiza la ley 20.571 de *Net Billing* («Ley N° 20.571» 2012, «Reglamento de Ley N° 20.571» 2014), que propone incentivos para los medios de generación en base a ERNC, dentro de los que se enmarca la energía fotovoltaica.

1.3.1 Funcionamiento y particularidades de la Ley 20.571

La Ley 20.571 de *Net Billing*, otorga el derecho a los clientes regulados de las empresas distribuidoras de energía, a generar su propia energía eléctrica mediante medios renovables no convencionales, pudiendo vender los excedentes que no son utilizados para auto-consumo a la empresa distribuidora de servicios eléctricos (ACESOL [sin fecha]); como muestra la Figura 11.

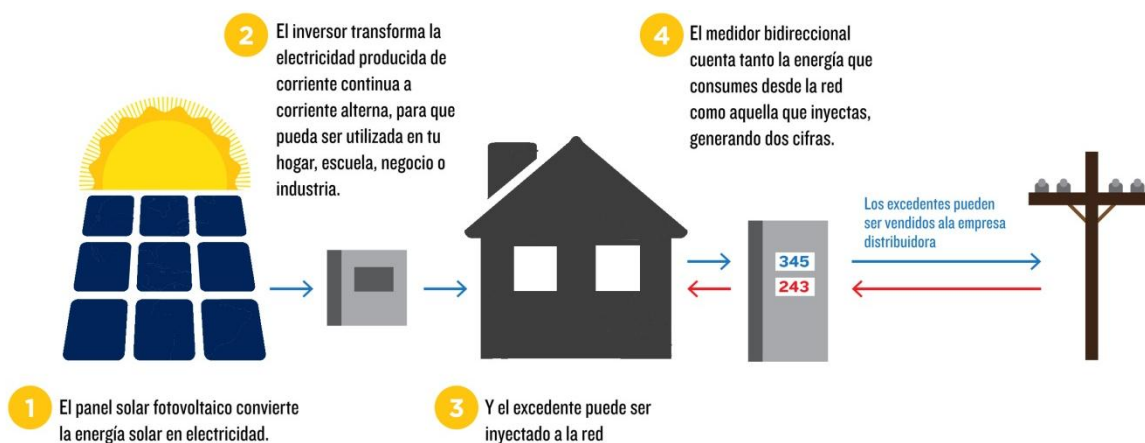


Figura 11. Esquema de funcionamiento de la Ley 20.571. Modificado de CDT

Las inyecciones de energía eléctrica, se descuentan de las facturaciones subsiguientes y de existir remanentes, son pagados al cliente por parte de la empresa distribuidora. La energía inyectada, se valoriza al precio nudo que las empresas distribuidoras traspasan mensualmente a sus clientes regulados («Reglamento de Ley N° 20.571» 2014). En base a estos requisitos, un análisis de precios de valorización de energía eléctrica para la ciudad de Concepción (CGE Distribución 2016), permite descifrar que para tarifas residenciales [BT1] -donde sólo se considera el cargo por energía-, la valorización de venta de energía para un usuario final, es de aproximadamente el 56% de la valorización de compra, a valores de junio de 2016. Mientras que para tarifas asociadas a industria y comercio [BT2 y BT3] -donde se consideran cargos por energía y potencia-, la relación final de valorización de compra y venta de energía es variable y no puede establecerse una condición fija.

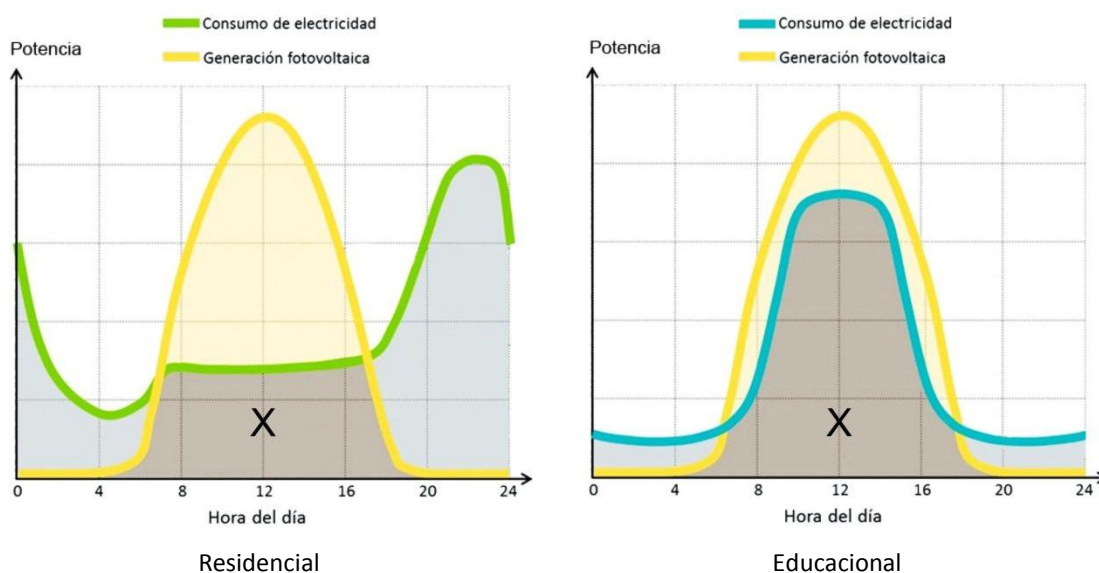


Figura 12. Consumo y generación para distintos programas. Modificado de arquitecturayenergia.cl

Por otra parte, si bien la Ley promociona el incentivo a generadoras residenciales, un análisis de perfiles de consumo, permite comprobar que otros programas presentan mejores condiciones para el aprovechamiento de energía solar; como puede observarse en la Figura 12. Mientras que en el perfil residencial las curvas de consumo y generación de electricidad aparecen desacopladas, dado que los pic de consumo se generan sobre la noche, cuando no hay energía solar disponible; en programas como los educacionales, aparecen totalmente acopladas, con consumos durante las horas de plena disponibilidad solar. Esta condición, repercute directamente en el tiempo de auto-consumo -representado por la letra X- y en consecuencia, en el tiempo de retorno de la inversión. Demostrando la idoneidad de los programas educacionales, para incorporarse a la Ley.

Características de establecimientos educacionales

en la comuna de Concepción

2.1 Catastro de establecimientos educacionales

La comuna de Concepción, es una de las diez que componen el área metropolitana del Gran Concepción. Está localizada en la latitud 36°49'37''S y longitud 73°02'59''O, dentro de la zona centro-sur de Chile y cuenta con una población de 216.061 habitantes². Posee un clima templado húmedo -altamente influenciado por la proximidad al océano, que modera las oscilaciones térmicas diarias y anuales-, y una radiación solar global horizontal de 1642,5 kWh/m²-año³.

Esta sección, aborda la revisión del parque educacional existente en la comuna de Concepción, con el objetivo de establecer un catastro, que permita reconocer las características formales y energéticas más representativas de los establecimientos educacionales. Antecedentes del proyecto CON*FIN «Evaluación del Potencial Solar en Áreas Urbanas», para el que se catastraron distintos programas dentro de la comuna de Concepción -entre ellos los educacionales-, se complementan con registros de autoridades locales y mapas digitales en línea, para realizar un catastro de la infraestructura educacional existente. Para el catastro, se utilizaron datos de la Junta Nacional de Jardines Infantiles [JUNJI] y la Fundación INTEGRA, para salas cuna y jardines infantiles, de la Dirección de Administración de Educación Municipal de Concepción [DAEM], para escuelas, liceos y colegios, así como también información del Ministerio de Educación y la Superintendencia de Educación del Gobierno de Chile; además de mapas interactivos de acceso público en línea [*Google Maps*, Mapas Emol, Sistema de Visualización Geográfica de la Dirección de Obras Municipales de Concepción], para completar la información.

Por intermedio de estos recursos, se identificaron 83 establecimientos educacionales, correspondientes a un 82,7% del área total de cubierta de educación; según cartografía del proyecto CON*FIN. Asignando la diferencia, según la distribución porcentual de la muestra relevada, pero sin considerar la categoría Universidades, ya que por su extensión se consideraron plenamente identificadas. La caracterización realizada considera seis categorías según nivel formativo: jardines infantiles y sala cuna, escuelas, liceos, colegios, universidades e institutos y otros. Siendo las escuelas de alcance prioritario de los niveles parvulario y básico, los liceos de nivel medio y los colegios de parvulario, básico y medio.

² Instituto Nacional de Estadística de Chile - Censo 2002

³ Ministerio de Energía - Energías renovables en Chile, 2014

La superficie total de cubierta de establecimientos educacionales determinada es de 403.296 m², lo que significa 1,86 m² de superficie educativa por persona, en relación a la población. Según registros del proyecto CON*FIN, la comuna de Concepción cuenta con 3.314.477 m² de superficie de cubierta, lo que permite estimar que los establecimientos educacionales representan el 12,2% del total; ocupando el tercer lugar después de los programas residenciales (56,2%) y los comerciales (14,8%). Esto supone que la infraestructura educacional, sea también la tercera en potencial solar energético a nivel urbano; estimando, a partir de los mismos registros, una participación del 14,6% en el potencial total de la comuna.

Tabla 1. Catastro de establecimientos educacionales en la comuna de Concepción

Nivel formativo	Cantidad	Superficie de cubierta		Superficie de cubierta promedio*
	u	m ²	%	m ²
Jardines infantiles	9	6.367	1,6	500
Institutos y otros	6	10.402	2,6	1.224
Escuelas	10	19.313	4,8	1.364
Liceos	17	64.628	16,0	2.852
Colegios	31	136.902	33,9	3.118
Universidades	10	165.684	41,1	16.568
Total	83	403.296	100,0	

* Calculado en base a la superficie de cubierta real identificada

La Tabla 1 presenta un resumen por nivel formativo, de los establecimientos educacionales en la comuna de Concepción. Puede apreciarse que las universidades cuentan con la mayor representatividad de superficie de cubierta, aun con un bajo recuento, por tratarse de grandes establecimientos. Mientras que los jardines infantiles y salas cuna, normalmente emplazados en pequeños establecimientos -muchas veces en reformas de viviendas existentes-, resultan difíciles de identificar; por lo que sólo logran reconocerse los más extensos, lo que aumenta el promedio de superficie de cubierta. Un detalle del catastro de establecimientos educacionales identificados en la comuna de Concepción, puede verse en el Anexo A (pág.125). En los resultados puede apreciarse también, que existe una relación proporcional entre el nivel formativo y el tamaño de los establecimientos, que puede asociarse al área de influencia que cubre cada servicio. Mientras que los primeros niveles formativos, sirven generalmente a usuarios del entorno inmediato, requiriendo menores superficies e infraestructuras -siendo muchas de ellas compartidas-, los niveles superiores, sirven además a usuarios dentro de un rango de influencia regional; presentando superficies mayores e infraestructuras más completas y exclusivas.

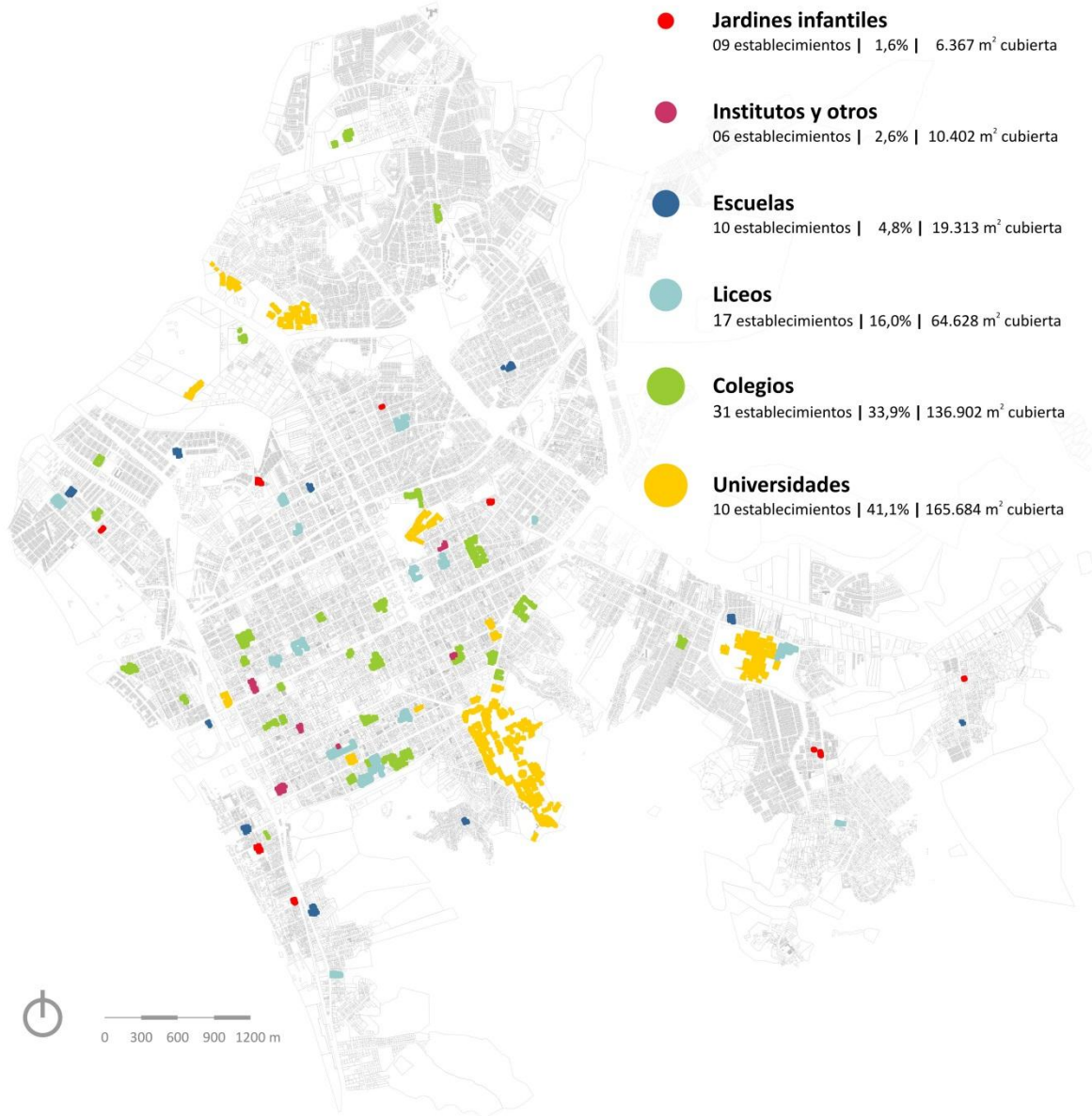


Figura 13. Establecimientos educacionales en la comuna de Concepción

En la Figura 13 puede verse el relevamiento de establecimientos educacionales en la comuna de Concepción y la dispersión urbana que presentan; como resultado de ser un servicio social, vinculado a la densidad y crecimiento de la población. Las Universidades presentan superficies extensas pero concentradas en manchas dentro del territorio, asociadas en su mayoría a la modalidad de Campus Universitario. Con superficies de cubierta entre 3.000 y 75.000 m² aproximadamente y un promedio de 16.568 m²; siendo las más significativas formadas por agrupaciones de 10 o más edificios. Las escuelas, liceos y colegios, aparecen de forma dispersa en la trama urbana ocupando superficies generalmente menores a 1 hectárea, compuestas por

grupos de 1 a 5 edificios como máximo y con una superficie de cubierta de 2.736 m² en promedio general. Los jardines infantiles, presentan también un patrón disperso con una representación territorial mínima y agrupaciones de 1 a 2 edificios, con una superficie promedio de 500 m².

2.2 Caracterización formal por tipo de establecimiento

La caracterización formal por tipo de establecimiento, considera los niveles formativos con mayor representatividad de superficie de cubierta, de manera de contemplar una muestra que considere la mayor cantidad de casos, dentro de la distribución urbana. Descartando los jardines y salas cuna y los institutos, por no considerarse representativos dentro de la muestra total. La caracterización queda integrada por un grupo de nivel básico-medio, de escuelas, colegios y liceos -asociados por sus características similares- y otro de nivel superior, conformado por las universidades.

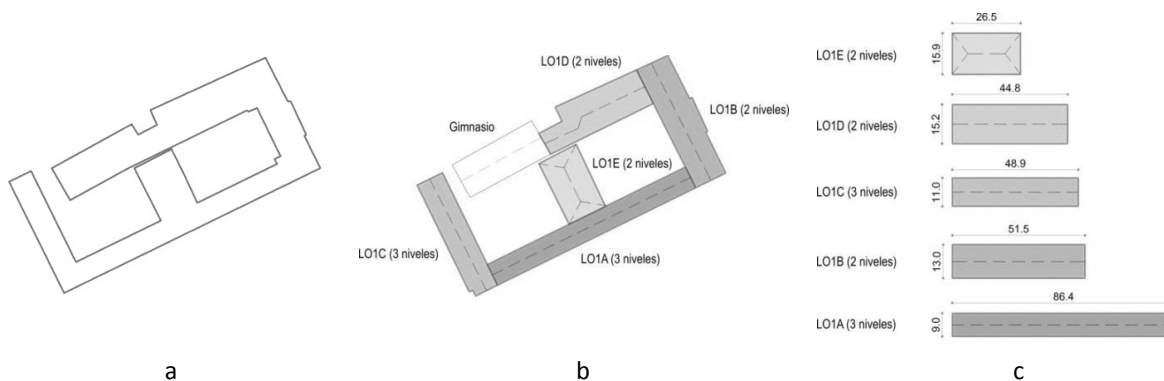


Figura 14. Metodología de caracterización formal de establecimientos educacionales

La Figura 14 presenta la metodología de caracterización formal utilizada, con el objetivo de reconocer las particularidades formales más representativas de los establecimientos educacionales. Cada establecimiento, definido según antecedentes del proyecto CON*FIN, por un polígono mudo (Figura 14, ref. a), se diferencia en bloques según cambios de dirección en planta, altura de los volúmenes y programa (Figura 14, ref. b). Esta interpretación, permite diferenciar los bloques de infraestructura -gimnasios, circulaciones verticales, accesos, depósitos, entre otros-, de los bloques con predominancia de aulas; que son rectificadas y asimilados a rectángulos de dimensiones representativas (Figura 14, ref. c), a partir de los cuales se realiza un inventario de las condiciones formales. Para el reconocimiento y diferenciación de los bloques, se utilizaron imágenes satelitales geo-referenciadas con corrección ortométrica escala 1:10.000 -Laboratorio de Estudios Urbanos de la Universidad del Bío-Bío-, complementadas con visitas a terreno y

herramientas de acceso libre [*Google Maps, Google Street View y Google Earth* -incluyendo herramienta de revisión de historial de imágenes], para tener la mayor aproximación posible a la realidad. En base a todas estas herramientas, se diferenciaron los bloques con predominancia de aulas y se desagregaron para su interpretación en términos formales. El detalle completo de las herramientas y metodología aplicada a uno de los ejemplos, puede verse en el Anexo B (pág.127).

2.2.1 Nivel básico-medio: escuelas, liceos y colegios

Con el objetivo de definir las características formales más representativas de los establecimientos de nivel básico-medio, se analizan 15 establecimientos -5 escuelas, 5 liceos y 5 colegios- todos de dependencia municipal, cuidando que la selección comprenda distintos sectores de la Comuna.

Tabla 2. Establecimientos seleccionados para la caracterización formal de nivel básico-medio

Código	Nombre del establecimiento	Nivel educativo	Superficie de	Superficie de cubierta	
			cubierta	bloques de aulas	%
			m ²	m ²	%
E01	Escuela Diego Portales	P,B	2.211	1.515	69
E02	Escuela Rene Louvel Bert	P,B	1.742	1.728	99
E03	Escuela Luis Alfredo Muñoz Burboa	P,B	699	665	95
E04	Escuela Oscar Castro Zuñiga	P,B	885	626	71
E05	Escuela Esther Hunneus De Claro	P,B	1.772	1.606	91
L01	Liceo de niñas	M	3.596	3.087	86
L02	Liceo Andalien	M	2.505	1.649	66
L03	Liceo Enrique Molina Garmendia	B,M	5.658	3.862	68
L04	Liceo José Manuel Balmaceda	B,M (a)	2.167	1.036	48
L05	Liceo Lorenzo Arenas Olivo	M	3.329	2.256	68
C01	Colegio Lucila Godoy Alcayaga	P,B,M	1.840	1.426	78
C02	Colegio República de Brasil	P,B,M	3.408	1.987	58
C03	Colegio Marina de Chile	P,B,M	1.738	921	53
C04	Colegio Gran Bretaña	P,B,M	1.406	955	68
C05	Colegio España	P,B,M	2.022	1.920	95
Total			34.978	25.239	72

Referencias de nivel educativo: P - Parvulario, B - Básico, M - Medio, (a) Adultos

En la Tabla 2 pueden observarse los establecimientos de nivel básico-medio analizados, incluyendo la superficie de cubierta y la superficie de cubierta de bloques de aulas, identificada a partir de la caracterización. Mediante la información recopilada, pudo comprobarse que el promedio de superficie de cubierta de bloques de aulas, es del 84% en escuelas y 69% en liceos y colegios; con un promedio general del 72%, en todo el nivel básico-medio.

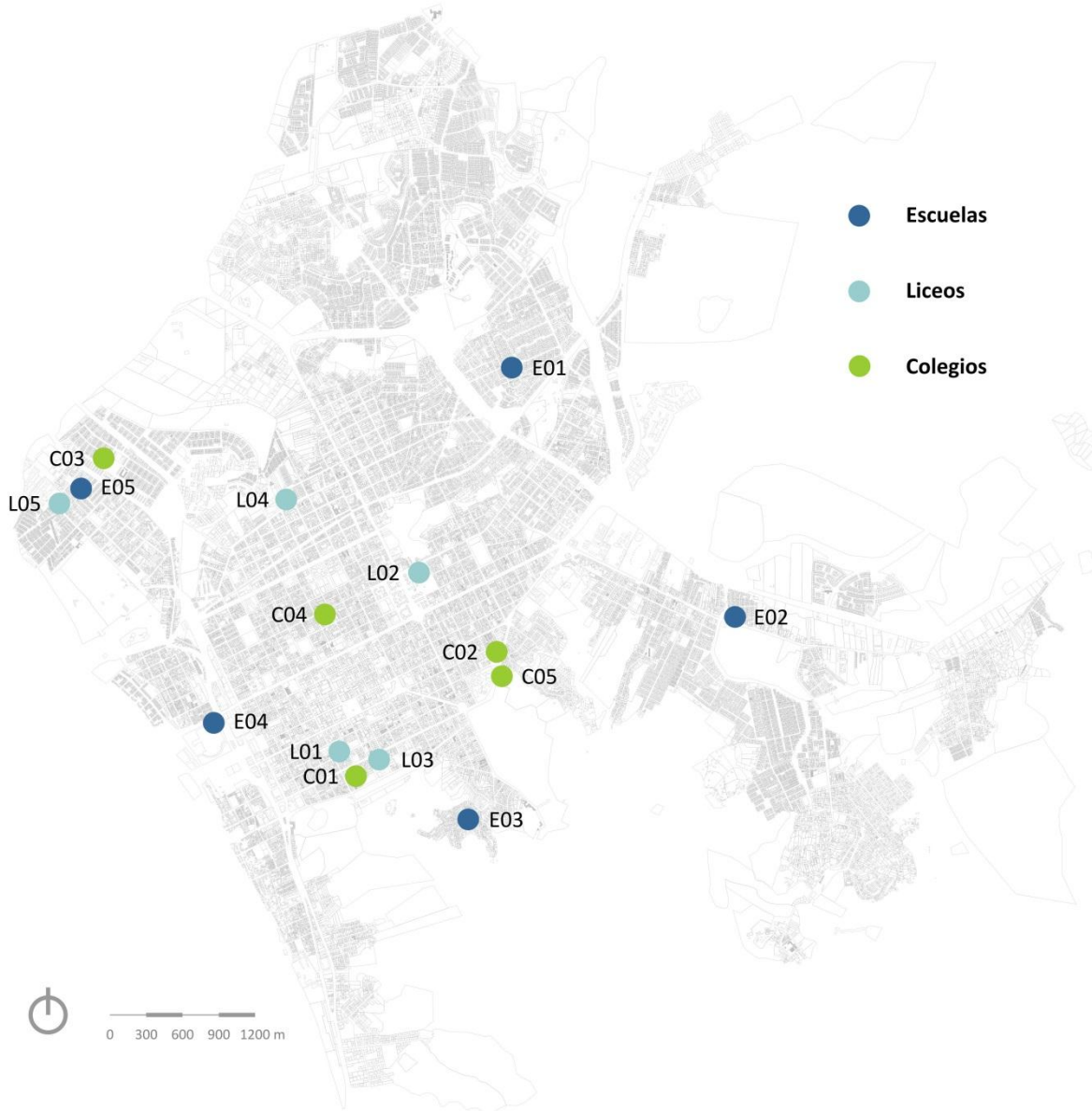


Figura 15. Establecimientos seleccionados de nivel básico-medio en la comuna de Concepción

En la Figura 15 puede observarse la muestra seleccionada de establecimientos de nivel básico-medio en la comuna de Concepción, con ejemplos dispersos dentro del territorio. Mientras que la Figura 16, más adelante, muestra las plantas de polígonos de los establecimientos seleccionados. Puede apreciarse visualmente, que las escuelas presentan en general superficies levemente menores, que las de los liceos y colegios; consecuentemente con la información de superficies promedio por nivel formativo. La superficie de ocupación es normalmente inferior a la superficie de la manzana, aproximadamente entre un sexto y un medio de la misma; teniendo en cuenta como referencia las manzanas de la zona céntrica de la comuna, de aproximadamente 1 hectárea.

Capítulo 2. Características de establecimientos educacionales en la comuna de Concepción

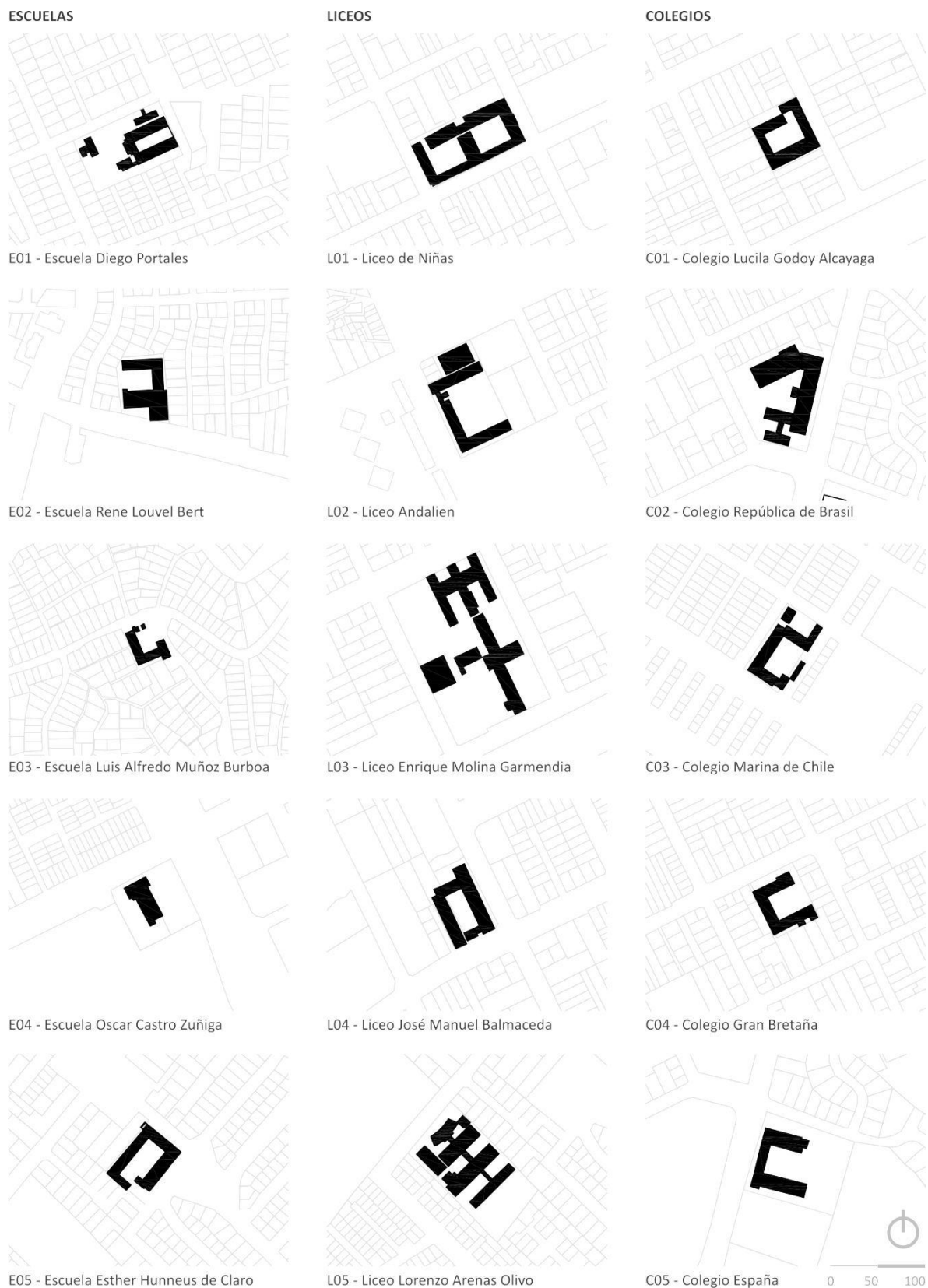


Figura 16. Planta de polígonos de ejemplos seleccionados de nivel básico-medio

La Figura 16, también permite apreciar que prácticamente todos los establecimientos presentan una rotación con respecto al norte, que responde en la mayoría de los casos, a la rotación de 26º de la trama urbana principal de la comuna de Concepción -alineándose prácticamente con el eje NNO-SSE-; salvo excepciones, en algunos sectores donde la trama aparece con una disposición más orgánica, relacionada a los accidentes geográficos.

Los establecimientos están compuestos por la combinación de varios bloques, reconociendo al lote como un límite marcado de crecimiento; que es ocupado normalmente de forma perimetral. Estos patrones morfológicos, podrían tener un correlato con la forma de crecimiento, que podría interpretarse como una secuencia a medida que se alcanzan los límites del lote. Cuando una configuración lineal sencilla alcanza su límite de crecimiento por las dimensiones del lote, la geometría se quiebra generando una configuración en L, luego una en C, para terminar finalmente generando una agrupación cerrada en torno a un patio.

Tabla 3. Resultados de caracterización formal de bloques de aulas de nivel básico-medio

Nivel educativo	Valor	Largo m	Ancho m	Superficie m ²	Proporción L/A -	Nº plantas u
Escuelas	Mínimo	9,7	4,8	46,6	1,6	1
	Promedio	29,7	10,5	323,2	3,0	1,5
	Máximo	59,9	18,6	626,3	6,1	3
Liceos	Mínimo	12,2	8,9	108,6	1,4	1
	Promedio	47,1	12,3	566,2	4,1	2,5
	Máximo	86,4	16,7	777,6	9,6	4
Colegios	Mínimo	13,7	9,2	126,0	1,5	1
	Promedio	34,6	11,8	424,0	2,9	2,2
	Máximo	66,4	16,9	1.102,2	6,2	3
Global	Mínimo	9,7	4,8	46,6	1,4	1
	Promedio*	37,6	11,5	442,8	3,4	2,1
	Máximo	86,4	18,6	1.102,2	9,6	4

* Promedio general de los 57 bloques evaluados en nivel básico-medio

En la Tabla 3 pueden verse los resultados de la caracterización formal, de los bloques de nivel básico-medio con predominancia de aulas, en los ejemplos seleccionados. En los 15 casos analizados, se identifica un total de 57 bloques destinados mayoritariamente a aulas, registrando los valores mínimos, máximos y promedios de los parámetros largo, ancho, superficie, proporción y número de plantas; según nivel formativo. Incluyendo un registro global, que contiene el promedio simple de los 57 bloques de escuelas, colegios y liceos considerados.

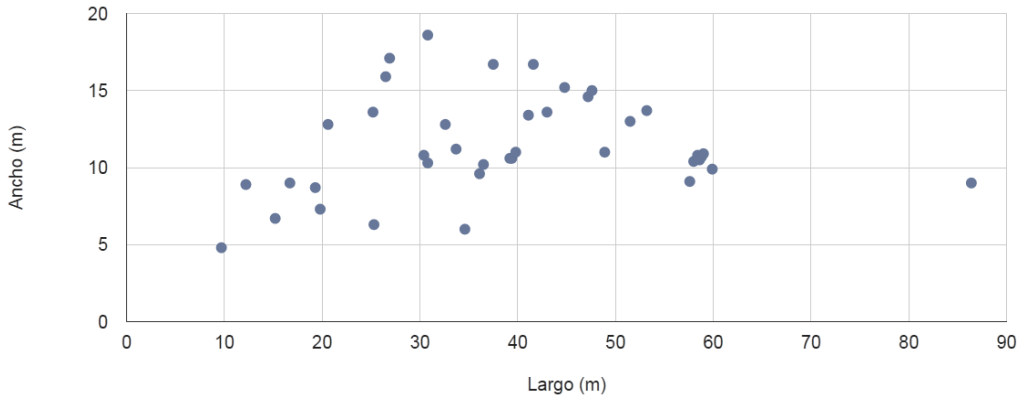


Gráfico 1. Dispersión de bloques de aulas de nivel básico-medio

El Gráfico 1 muestra la dispersión de largo y ancho de los 57 bloques con predominancia de aulas de nivel básico-medio, donde puede apreciarse una gran variedad de resultados y sin un patrón de concentración aparente; lo que conduce a realizar un análisis de cada dimensión por separado.

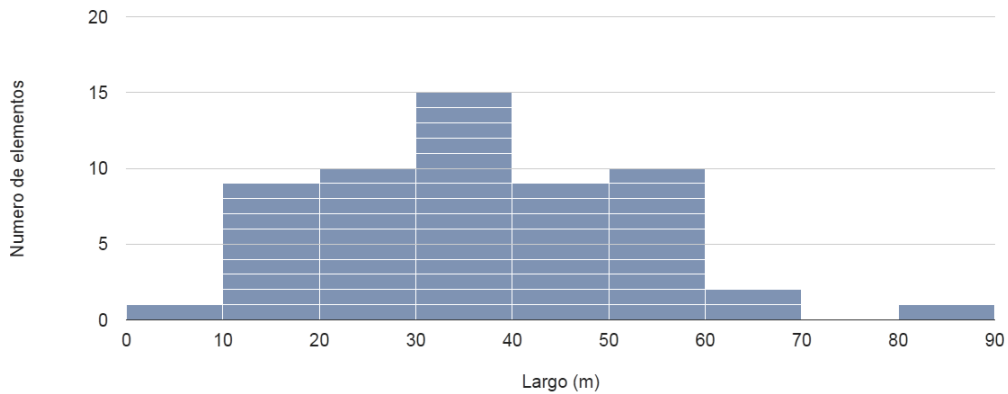


Gráfico 2. Histograma de largo de bloques de aulas de nivel básico-medio

A partir del histograma de largo de los bloques de aulas de nivel básico-medio (Gráfico 2), puede comprobarse que los largos más frecuentes entre los bloques analizados, corresponden a distancias entre 30 y 40 metros, con un total de 15 elementos. A su vez, existe una gran cantidad de elementos de largo muy variable entre los 10 y 60 metros, que bien podrían definirse como fronteras inferior y superior respectivamente, por contener la mayoría de los casos analizados.

El histograma de ancho de bloques de aulas, más adelante (Gráfico 3), muestra mayores frecuencias en edificios de entre 10 y 11 metros de ancho. Pero con una clara tendencia de 9 a 11 metros, que guarda una asociación directa con bloques de crujía simple; considerando las dimensiones características de las aulas de 6 metros de ancho (por 9 de largo), más circulaciones.

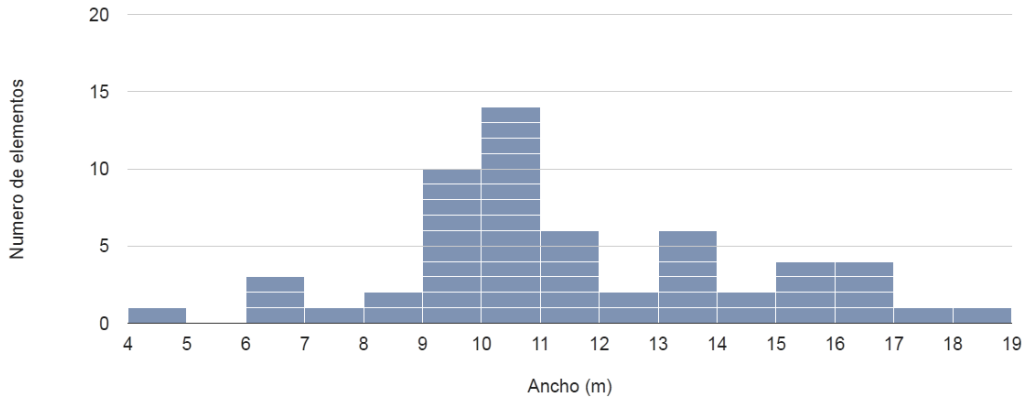


Gráfico 3. Histograma de ancho de bloques de aulas de nivel básico-medio

Las mismas consideraciones aplican para edificios de doble crujía, donde debe tenerse en cuenta un ancho de 12 metros -6 metros por aula- más circulaciones; lo que explica la concentración menor, en anchos de 15 a 17 metros, donde se registra un recuento de 8 bloques.

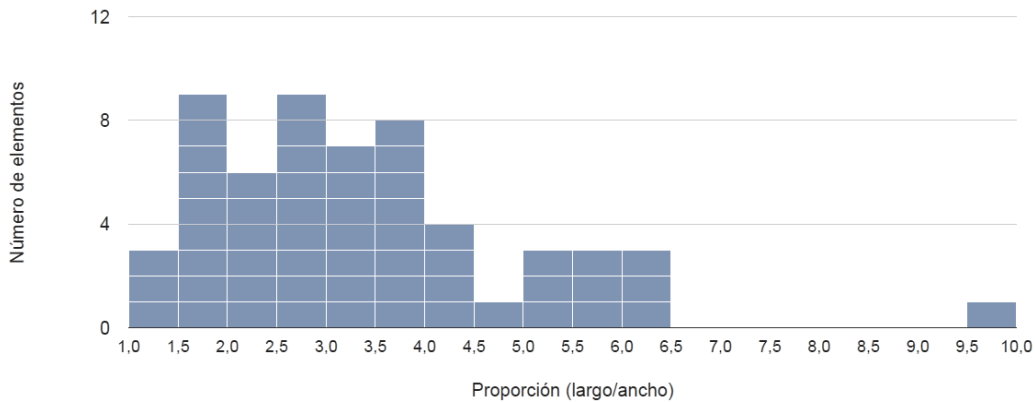


Gráfico 4. Histograma de proporción de bloques de aulas de nivel básico-medio

En cuanto a la proporción de los bloques de aulas de nivel básico-medio, el histograma del Gráfico 4, muestra que existe un patrón de concentración aparente, con recurrencias entre las proporciones de 1,5 a 4,0. Según la caracterización realizada (Tabla 3, pág. 40), el promedio general global de proporción se establece en una razón de 1 a 3,4 veces.

El recuento de bloques por número de niveles, que puede verse más adelante (Gráfico 5), indica que la mayoría de los bloques de aulas de nivel básico-medio, se encuentra homogéneamente distribuido en edificios de 1, 2 y 3 plantas; mientras que los edificios de 4 plantas aparecen con un recuento muy poco representativo, que podría considerarse despreciable.

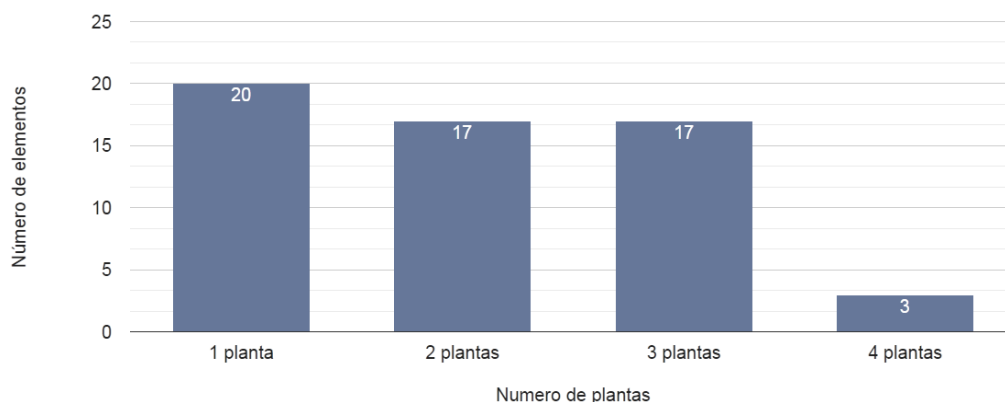


Gráfico 5. Recuento por número de plantas de bloques de aulas de nivel básico-medio

El Gráfico 6 muestra el recuento por tipo de cubierta de bloques de nivel básico-medio, donde puede apreciarse una amplia mayoría de edificios con cubierta a dos aguas, pudiendo descartar las restantes configuraciones por su baja representatividad.

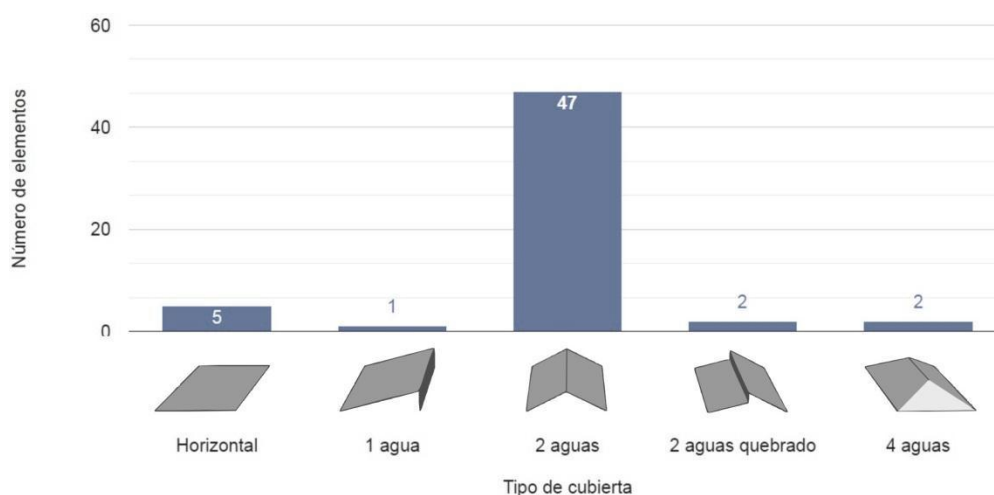


Gráfico 6. Recuento por tipo de cubierta de bloques de aulas de nivel básico-medio

Finalmente, en cuanto a la configuración espacial de los establecimientos, la planta de polígonos (Figura 16, pág. 39), permite apreciar que de manera simplificada y salvo excepciones, todos los ejemplos analizados pueden asimilarse a formas simples o combinaciones de las mismas. Destacando cuatro configuraciones espaciales básicas, reconocidas como las más representativas: la estructura lineal -conformada por un bloque aislado o bloques en paralelo-, la configuración tipo L -conformada por bloques en dos de los lados de un cuadrilátero-, la configuración tipo C -que reconstruye tres de los lados de un cuadrilátero- y la configuración tipo patio -consolidando los cuatros lados de un cuadrilátero; con variaciones como la configuración doble patio, por ejemplo.

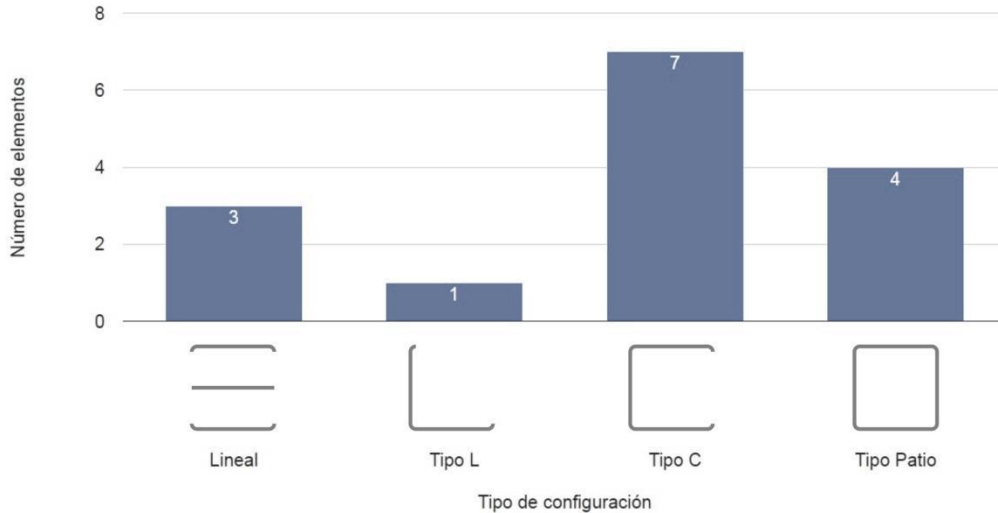


Gráfico 7. Recuento por configuración espacial de establecimientos de nivel básico-medio

El Gráfico 7 muestra el recuento por configuración espacial de los 15 establecimientos analizados, donde puede apreciarse que la configuración tipo C, es la más común entre las muestreadas, identificada en 7 establecimientos. Asimismo, la configuración tipo patio aparece como la segunda más repetida; lo que podría indicar una tendencia hacia las configuraciones de formas más cerradas o introvertidas, sobre formas más abiertas, como la lineal o tipo L. Con respecto a la relación de los establecimientos con la calle, el análisis permite apreciar que para la configuración tipo C, no existe una orientación recurrente de la forma o un criterio de relación notable; aunque en todos los casos, puede destacarse que el lado abierto nunca queda orientado hacia la calle.

En resumen, en base a la caracterización formal realizada, puede concluirse que los establecimientos de nivel básico-medio, presentan bloques con largos más representativos entre 30 y 40 metros, anchos entre 9 y 11 metros asociados a crujías simples y 15 a 17 metros para crujías dobles, proporción de lados de 1 a 3,4, edificios con igual distribución de 1, 2 y 3 plantas, cubiertas características a 2 aguas y configuración espacial predominante en forma de C; pero que en todos los casos es asimilable a formas simples -sean lineales, tipo L o tipo patio-.

2.2.2 Nivel superior: universidades

La caracterización formal de establecimientos de nivel superior, se realiza con la misma metodología que en el caso anterior. Considerando la escala de los establecimientos universitarios y la disponibilidad de acceso a la información -relacionada a las facilidades necesarias para llevar a

cabo el análisis-, se considera un ejemplo; seleccionando la Universidad del Bío-Bío [UBB] sede Concepción. La configuración de la UBB, responde a la modalidad de Campus Universitario, agrupando un conjunto de instalaciones, con una superficie total de 32.543 m² de cubierta.



Figura 17. Planta de polígonos de la Universidad del Bío-Bío sede Concepción

En la planta de polígonos de la Figura 17, puede apreciarse visualmente que la agrupación resulta mucho más compleja de interpretar que en el caso de los establecimientos de nivel básico-medio. Los Campus Universitarios, están conformados por un elevado número de edificios -normalmente mayor a 20-, a lo que debe sumarse el hecho de que existen grandes superficies de servicios administrativos, académicos, laboratorios y otras prestaciones, que complejizan la interpretación. A su vez las instalaciones incluyen normalmente infraestructuras de servicios exclusivos -como biblioteca y casino-, que por el número de usuarios, se materializan en edificios individuales aislados. Debe tenerse en cuenta que muchos de los edificios integran en el mismo espacio sectores de aulas, administrativos, académicos y de servicio; lo que dificulta la individualización de áreas prioritarias de enseñanza. Por otra parte, en muchos casos los servicios aparecen duplicados en los edificios de las distintas carreras, como ocurre normalmente con las cafeterías, por ejemplo.

Mediante la caracterización, se identifican un total de 67 edificios, de los cuales 18 se reconocen constituidos mayoritariamente por aulas, a partir de visitas a terreno y consultas a informantes calificados; con una superficie de 11.743 m² de cubierta, equivalentes al 36% de la superficie total.

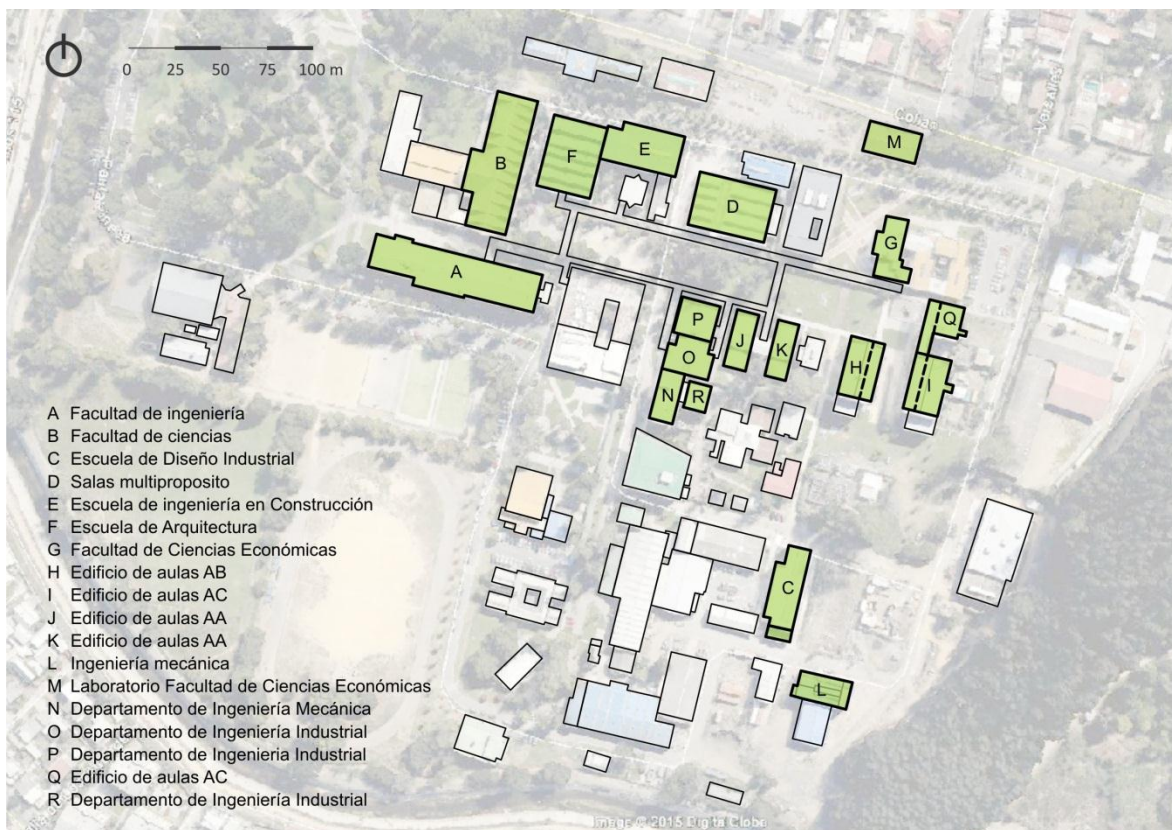


Figura 18. Edificios UBB seleccionados para la caracterización formal de nivel superior

La Figura 18 muestra los edificios seleccionados para la caracterización formal de nivel superior, correspondientes a edificios de distintas carreras universitarias -que pueden individualizarse en las referencias- y a 4 salas de aulas, de uso compartido entre las distintas carreras.

Tabla 4. Resultados de caracterización formal de bloques de aulas de nivel superior

Nivel educativo	Valor	Largo	Ancho	Superficie	Proporción L/A	Nº plantas
		m	m	m ²	-	U
Universidad	Mínimo	14,3	10,5	174,5	1,1	1
	Promedio*	38,0	16,8	656,9	2,3	2,1
	Máximo	92,0	29,4	1.904,4	4,8	3

* Promedio general de los 18 bloques evaluados en nivel superior

El resumen de resultados obtenidos de la Tabla 4, permite apreciar que los largos, anchos, superficies y proporciones de los 18 edificios analizados, presentan grandes variaciones entre los valores mínimos y máximos, como reflejo de la diversidad de edificios existentes dentro del Campus. Mientras que el número de plantas, oscila entre 1 y 3 para los edificios considerados.

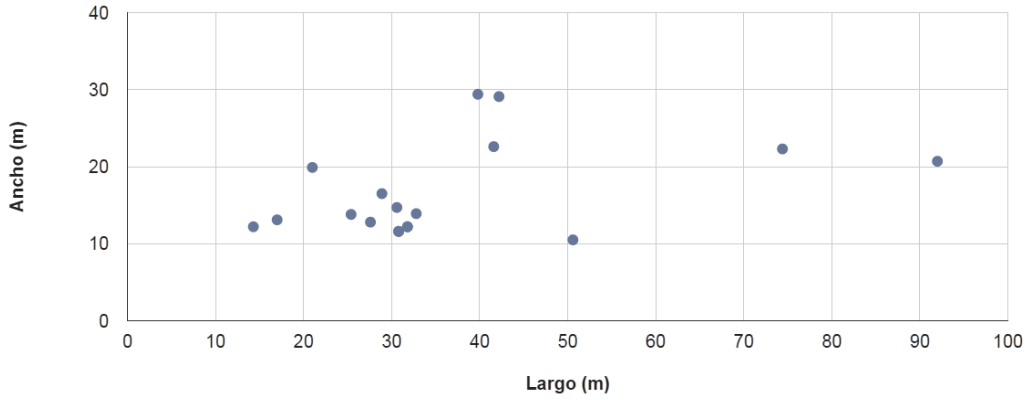


Gráfico 8. Dispersión de bloques de aulas de nivel superior

El Gráfico 8 muestra la dispersión de bloques con predominancia de aulas de nivel superior, donde puede apreciarse una concentración en bloques de largo de entre 25 y 35 metros y anchos de entre 11 y 18 metros, aproximadamente. Esto indicaría que en comparación al primer grupo analizado de nivel básico-medio, los largos presentan una tendencia similar -30 a 40 metros en los primeros-, pero los anchos tienen una oscilación mayor -9 a 13 metros en los primeros-, posiblemente asociado a la complejidad tipológica de los edificios universitarios, donde no siempre existe una tendencia lineal de salones corridos contiguos, como el primer caso.

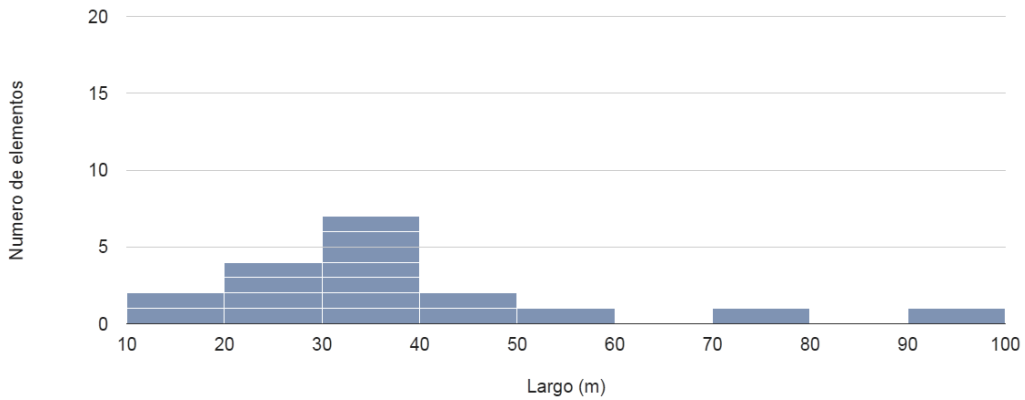


Gráfico 9. Histograma de largo de bloques de aulas de nivel superior

Un recuento del largo de bloques con predominancia de aulas de nivel superior (Gráfico 9), permite apreciar que los largos más frecuentes se encuentran entre los 30 y 40 metros; lo que coincide con el análisis realizado para el nivel básico-medio. De acuerdo a la repetición de los bloques, la mayor cantidad de elementos se sitúa con un largo de 20 a 40 metros, que podrían definirse como frontera inferior y superior respectivamente.

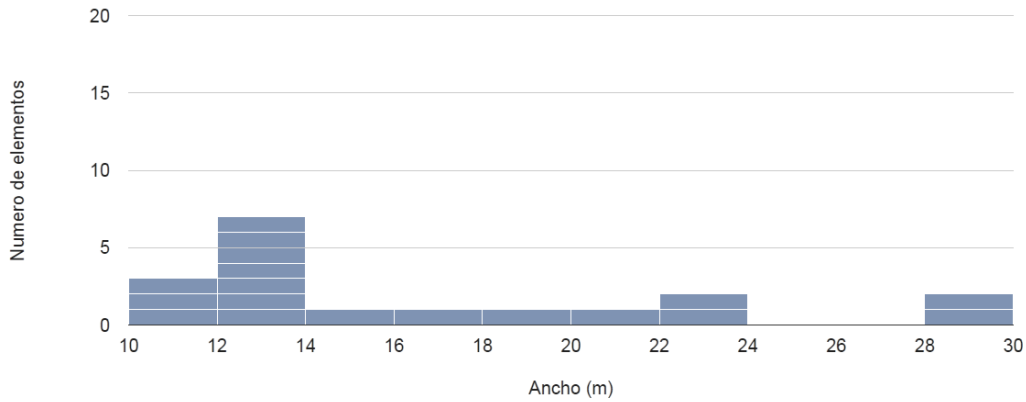


Gráfico 10. Histograma de ancho de bloques de aulas de nivel superior

El histograma de ancho de bloques con predominancia de aulas de nivel superior (Gráfico 10), presenta una repetición de elementos más frecuente de 12 a 14 metros; a diferencia del nivel básico-medio, donde los anchos se situaban de 9 a 11 metros. Esta diferencia, posiblemente esté asociada a tipologías de salones con mayor capacidad locativa que en el primer caso.

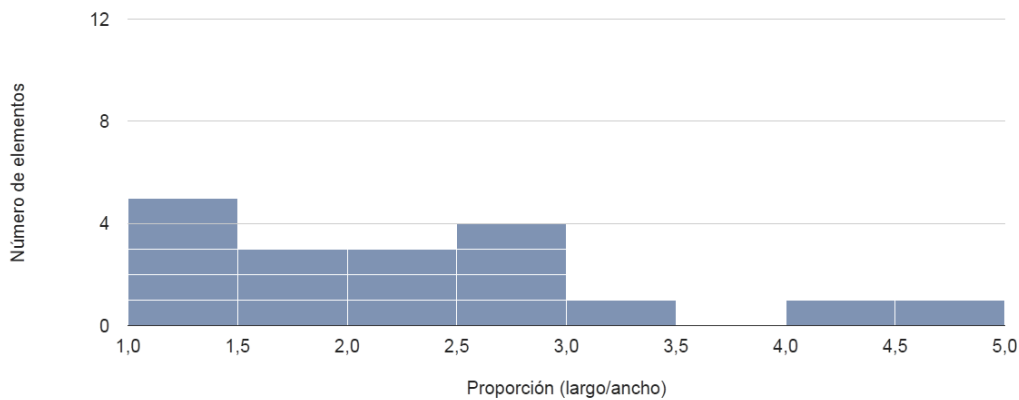


Gráfico 11. Histograma de proporción de bloques de aulas de nivel superior

El Gráfico 11 muestra el histograma de proporción, con una recurrencia más frecuente en las proporciones de 1,0 a 3,0; mostrando una tendencia a geometrías más cuadradas que en el caso de establecimientos de educación básica-media. Consecuentemente, el promedio general de proporción presenta una razón de 1 a 2,3 en nivel superior, contra 1 a 3,3 en nivel básico-medio.

Por último, el recuento por número de plantas, más adelante (Gráfico 12), muestra una mayor recurrencia de bloques de aulas de 2 plantas, pero sin una clara diferenciación con las restantes configuraciones de edificios de 1 y 3 plantas. No se analizaron los tipos de cubierta, por contar con formas muy variadas; ni la configuración espacial, por tratarse de edificios mayormente aislados.

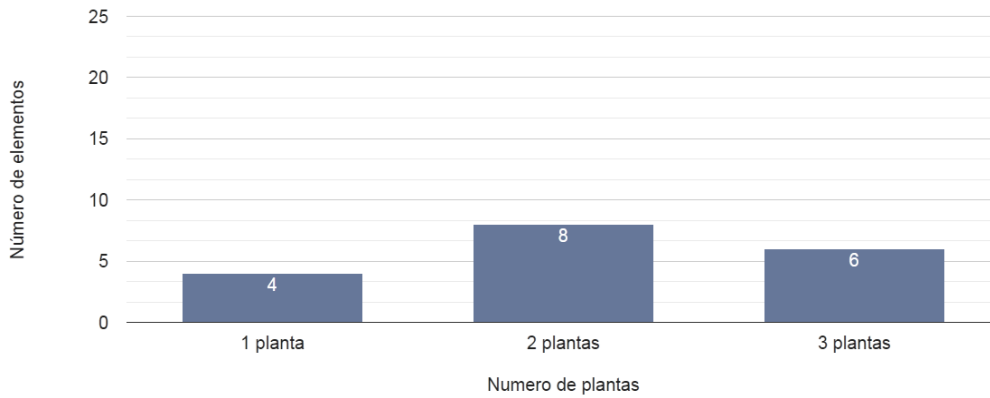


Gráfico 12. Recuento por número de plantas de bloques de aulas de nivel superior

Las características formales más representativas identificadas para el nivel superior, corresponden a bloques de largos entre 30 y 40 metros -al igual que en básico-medio-, pero con anchos de 12 a 14 metros, mayores que en el primer caso -lo que disminuye la proporción, resultando en formas más cuadradas-; con cubiertas con formas variadas y configuración espacial de edificios aislados.

2.3 Caracterización energética por tipo de establecimiento

Esta sección tiene por objetivo analizar las características energéticas de establecimientos de los niveles formativos básico-medio y superior. El análisis se basa en información de facturación de energía eléctrica, que permite identificar las características y patrones de uso, en cada caso.

2.3.1 Nivel básico-medio: escuelas, colegios y liceos

Para el análisis de características energéticas en nivel básico-medio, se utilizaron datos de facturación provistos por DAEM Concepción; correspondientes a 4 establecimientos de dependencia municipal, evaluados en un período anual desde octubre 2014 a setiembre de 2015.

Tabla 5. Consumo de energía eléctrica en establecimientos de nivel básico-medio

Código	Establecimiento	Consumo total anual kWh-año	Superficie construida m ²	Consumo total anual kWh/m ² -año
E02	Escuela Rene Louvel Bert	40.597	3.484	11,7
C04	Colegio Gran Bretaña	42.830	3.125	13,7
C05	Colegio España	65.448	5.841	11,2
L02	Liceo Andalién	37.542	4.948	7,6
Promedio simple de consumo de los cuatro establecimientos evaluados				11,1

El resumen comparativo de consumo de energía eléctrica de establecimientos de nivel básico-medio de la Tabla 5, más atrás, permite apreciar que el promedio de consumo eléctrico total anual es de 11,1 kWh/m²-año; casi un tercio del de una vivienda en Concepción de 31,5 kWh/m²-año, equivalente al 17,98% del consumo energético total de 175,1 kWh/m²-año (CDT 2010).

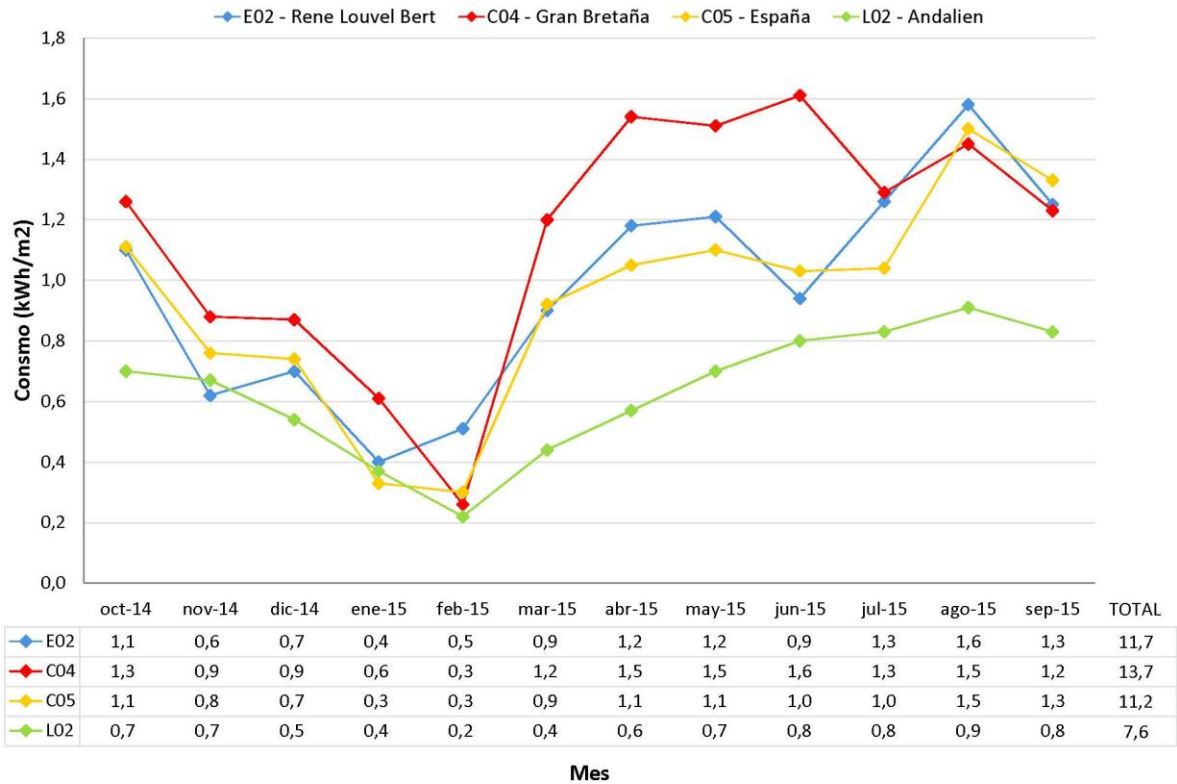


Gráfico 13. Histórico anual de consumo eléctrico en nivel básico-medio

El histórico anual de consumo eléctrico en establecimientos de nivel básico-medio, puede verse en el Gráfico 13. Puede apreciarse que todos los establecimientos evaluados presentan el mismo comportamiento estacional en los patrones de consumo; con máximos en los meses de periodo frío y mínimos en enero-febrero. Mientras que los consumos mínimos están asociados a los periodos de vacaciones, los máximos se explican por el incremento de utilización de iluminación artificial -durante los periodos que presentan menor iluminación natural-, y por el hecho de que, a pesar de que las infraestructuras municipales no cuentan normalmente con sistemas de climatización, visitas a los establecimientos y consultas a informantes calificados, han permitido comprobar la utilización recurrente de sistemas de calefacción domésticos -como estufas de cuarzo y caloventiladores-, que incluso en algunos casos provocan sobrecargas en los sistemas eléctricos.

Con el objetivo de identificar los patrones de uso y establecer la distribución de energía eléctrica según destino final, se realiza un análisis de estimación de carga eléctrica en la Escuela Rene Louvet Bert; a partir de la información obtenida mediante consultas a informantes calificados, del área de mantenimiento del establecimiento.

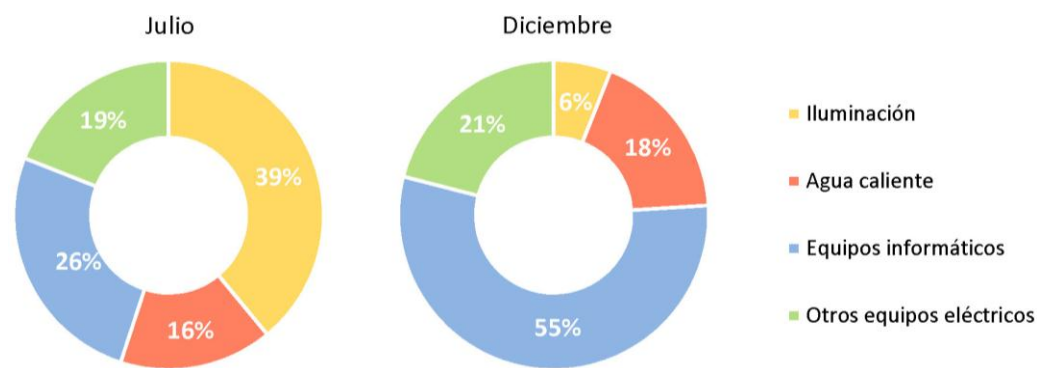


Gráfico 14. Estimación de carga eléctrica por destino final en Escuela Rene Louvet Bert

El Gráfico 14 permite apreciar el consumo de energía eléctrica por destino final en el establecimiento, donde puede apreciarse una importante participación de los equipos informáticos; principal responsable del consumo eléctrico en diciembre -con un 55% del total- y segundo en importancia en julio con un 26%, luego de la iluminación. Estos patrones de uso, podrían mostrar una tendencia asociada a nuevo modelos educativos, donde la componente digital y el uso de tecnologías de la información y comunicación se incrementan progresivamente, con el consecuente aumento de consumo eléctrico; para el cual los establecimientos no suelen estar preparados. Un detalle de la estimación de carga, puede verse en el Anexo C (pág.129).

2.3.2 Nivel superior: universidades

La caracterización energética de establecimientos de nivel superior, se realiza para el mismo caso de estudio que la caracterización formal; la Universidad del Bío-Bío sede Concepción, lo que permite asegurar el acceso a la información necesaria para el análisis. Se consideran datos de facturación para el mismo período anual que en análisis realizado para el nivel básico-medio - octubre 2014 a setiembre 2015-, de manera de poder realizar registros comparativos.

El consumo eléctrico promedio por metro cuadrado, se calcula considerando la superficie total construida de todas las instalaciones y los datos de facturación global del Campus Concepción de la UBB, provistos por el Departamento de Proyectos y Construcciones.

Tabla 6. Consumo de energía eléctrica en establecimiento de nivel superior

Código	Establecimiento	Consumo total anual	Superficie construida	Consumo total anual
		kWh-año	m ²	kWh/m ² -año
U01	Universidad del Bío-Bío	2.392.650	55.622	43,0

En la Tabla 6 puede observarse que el consumo promedio del establecimiento es de 43,0 kWh/m²-año; prácticamente cuatro veces más que en el caso de nivel básico-medio. Esta característica probablemente esté asociada a que las universidades, cuentan con climatización parcial en algunos de los edificios; además de que existen instalaciones puntuales -como laboratorios y maquinarias para ensayos, por ejemplo-, que registran elevados consumos eléctricos.

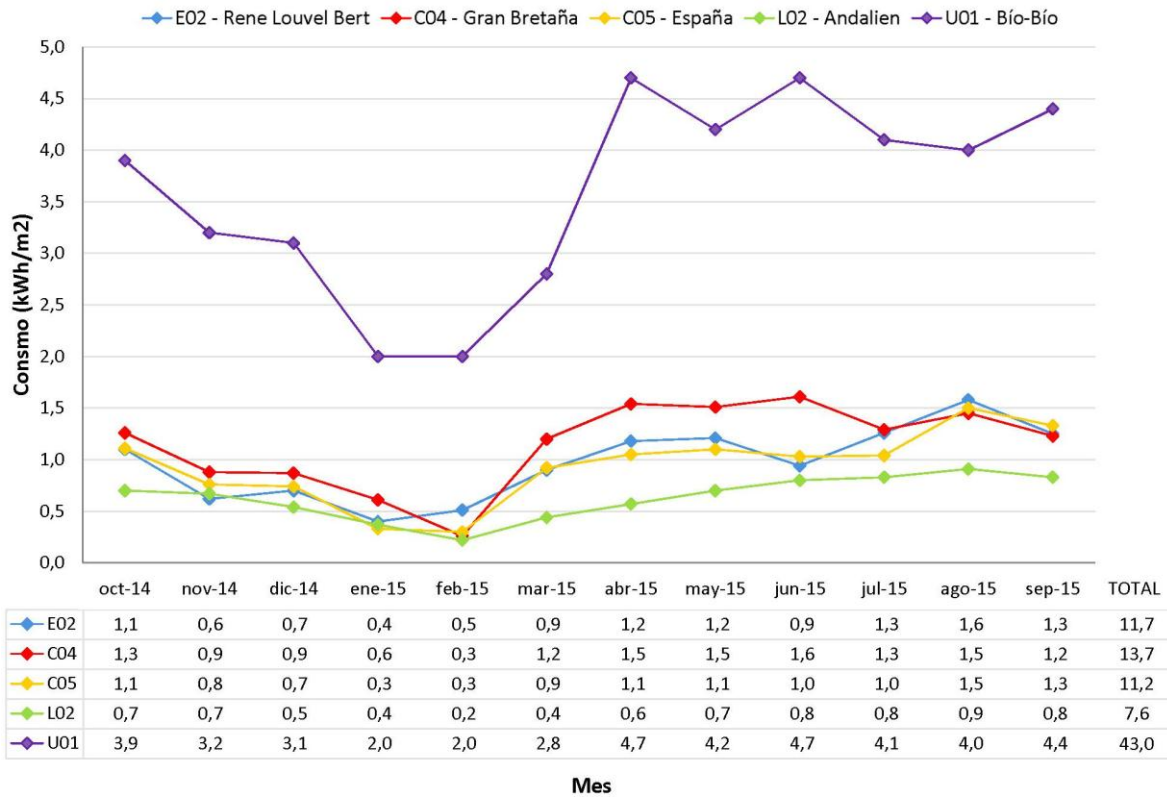


Gráfico 15. Histórico anual de consumo eléctrico en nivel básico-medio y superior

El Gráfico 15 presenta el histórico anual de consumo eléctrico de ambos niveles, lo que permite comparar los registros. Puede apreciarse que, aunque los registros mensuales del establecimiento de nivel superior, son mayores que los de nivel básico-medio, el perfil de consumo sigue la misma tendencia estacional. Registrando consumos mínimos en los períodos de vacaciones -enero y febrero-, y registros mayores durante la estación fría.

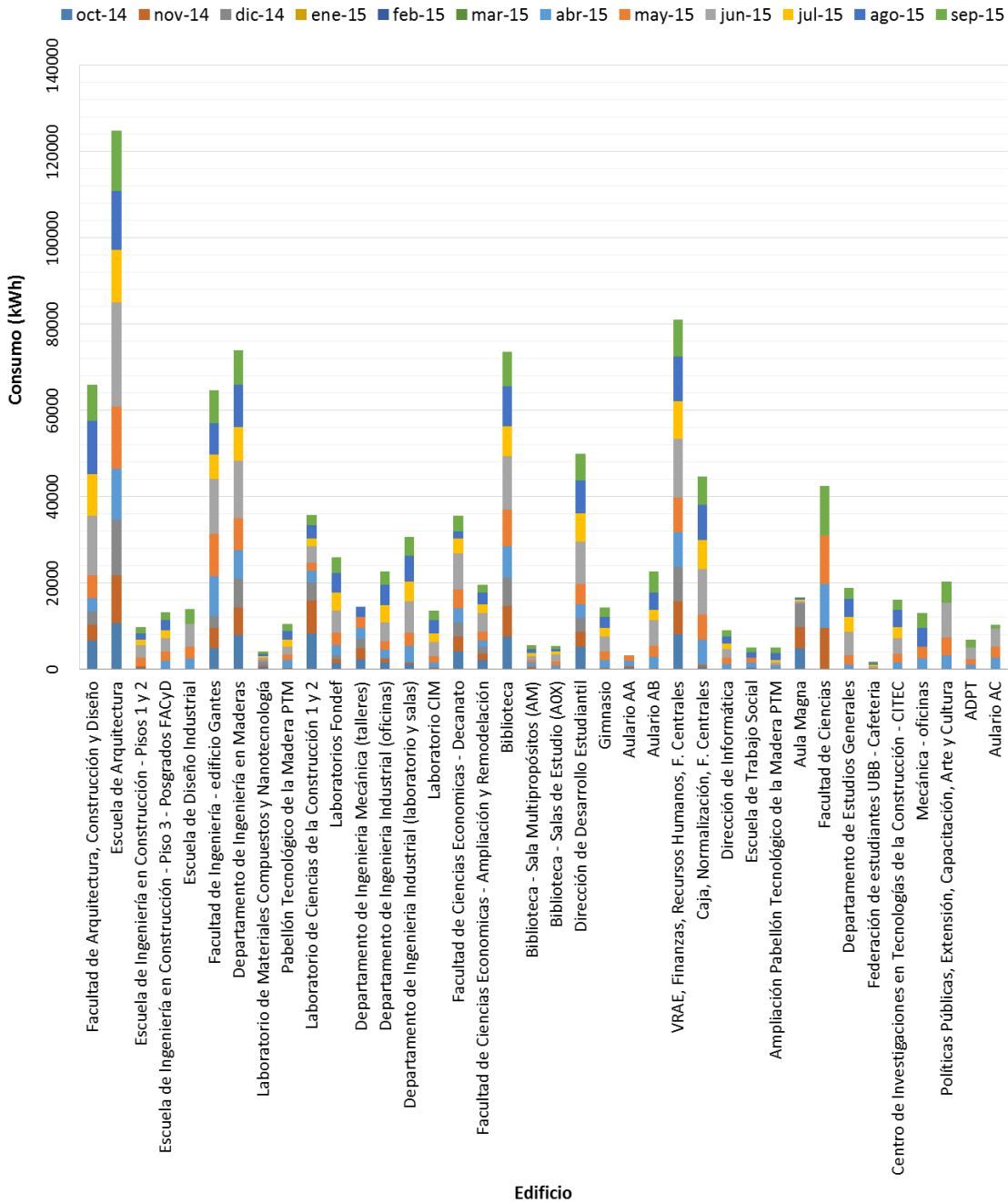


Gráfico 16. Consumo eléctrico por edificio en UBB campus Concepción

El Gráfico 16 muestra el consumo eléctrico por edificio en el Campus Concepción de la UBB, para el mismo periodo de octubre 2014 a setiembre 2015. Aunque las lecturas de medidores presentan lecturas incompletas en algunos casos -debido a interrupciones, fallas y cambio de instrumentos, entre otros-, la información permite tener una primera aproximación al consumo diferenciado por edificio, además de ilustrar la variedad de consumos existentes, en un servicio de nivel superior.

**Factibilidad de incorporación de sistemas fotovoltaicos
en establecimientos educacionales**

3.1 Simulación energética con implementación de sistemas fotovoltaicos

Esta sección tiene por objetivo determinar la posición óptima de paneles fotovoltaicos, para programas educacionales en la ciudad de Concepción; a partir de una evaluación multifactorial que considera el desempeño de generación de energía eléctrica, tiempo de auto-consumo e índices de compra y venta de energía, para soluciones con distinta posición. La selección de casos de estudio representativos -considerados a partir de las características formales identificadas-, permite realizar simulaciones energéticas de generación y consumo de energía eléctrica, otorgando resultados para evaluar el desempeño de los parámetros considerados.

3.1.1 Criterios de selección de casos de estudio

Como criterio de selección de los casos de estudio, se consideran las características formales identificadas en la Sección 2.2 (pág. 36). Priorizando las condiciones del nivel formativo básico-medio, que cuenta con una muestra mucho más completa y detallada -57 bloques con predominancia significativa de aulas, correspondientes a 15 establecimientos en distintas partes de la comuna-, con respecto al nivel superior donde sólo se analizaron 18 bloques correspondientes a 1 establecimiento. Por otra parte, se considera también un criterio relevante para la selección del caso de estudio, el acceso a la información por medio de recaudos gráficos, informantes calificados y accesibilidad al edificio para visitas de campo.

En base a estos criterios, se decide seleccionar un caso de estudio que sea representativo de las condiciones formales del nivel básico-medio, pero garantizando el acceso a la información. Seleccionando un edificio de la Universidad del Bío-Bío sede Concepción, que permite disponer de la información necesaria para la investigación y considerando además que existe en la institución, una expresa motivación por participar en iniciativas sustentables -como la Red Campus Sustentable⁴-, incentivando la incorporación progresiva de tecnologías renovables, entre otros; lo que se transforma en una potencial oportunidad, para el desarrollo de esta investigación. Esta estrategia de selección, permite optimizar recursos, ya que a partir del mismo edificio, pueden generarse dos casos de estudio que, variando las condiciones de simulación, contemplen las características de los dos grupos más representativos de los establecimientos educacionales.

⁴ <http://www.redcampussustentable.cl>

Para la selección del caso de estudio, se considera el promedio general de las dimensiones los 57 bloques de nivel básico-medio evaluados, de 37,6 m de largo y 11,5 m de ancho; teniendo en cuenta además, que dichos valores quedan prácticamente incluidos en las dimensiones más representativas, de largos entre 30 y 40 m y anchos entre 10 y 11 m. Esta consideración, permite suponer que los resultados obtenidos, serán también representativos para la mayoría de los casos.

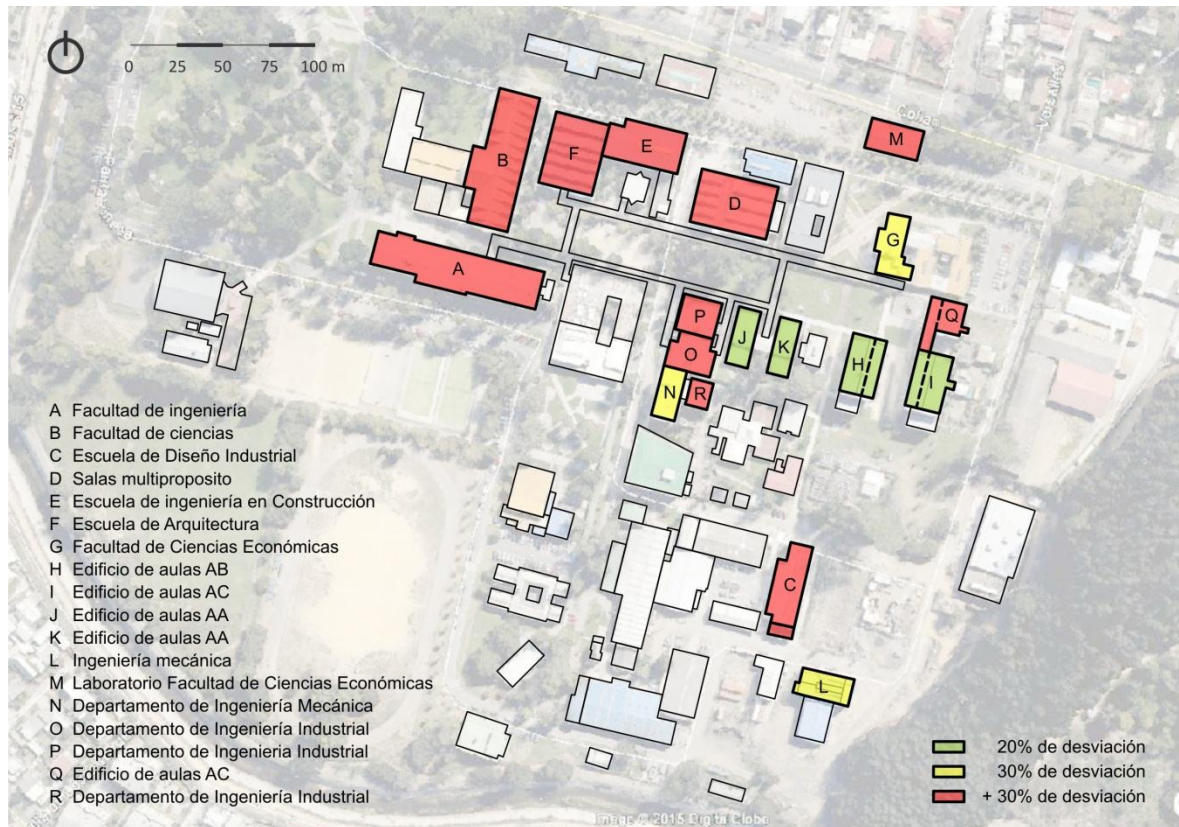


Figura 19. Caracterización de edificios en Universidad del Bío-Bío sede Concepción

La Figura 19 muestra la caracterización de edificios de la UBB sede Concepción; donde los 18 edificios reconocidos con predominancia significativa de aulas, se clasifican de acuerdo a la desviación porcentual del promedio general de dimensiones de bloques del nivel básico-medio. Clasificados en grupos de hasta 20% de desviación del promedio general, que agrupa 4 edificios de aulas; hasta 30% de desviación, que agrupa 3 edificios de distintas carreras y más del 30% de desviación, que reúne al resto de los edificios. Puede observarse que los edificios destinados exclusivamente a aulas, presentan la menor dispersión con respecto al promedio general, además de albergar un programa similar al encontrado en establecimientos de nivel básico-medio y ser edificios de uso compartido por todas las carreras; constituyendo argumentos positivos para la

selección. Finalmente se selecciona el edificio de aulas AB (Figura 20), cuyas dimensiones presentan un 16% de desviación y del que se dispone de mayor información y recaudos gráficos.



Figura 20. Edificio de aulas AB de la Universidad del Bío-Bío sede Concepción

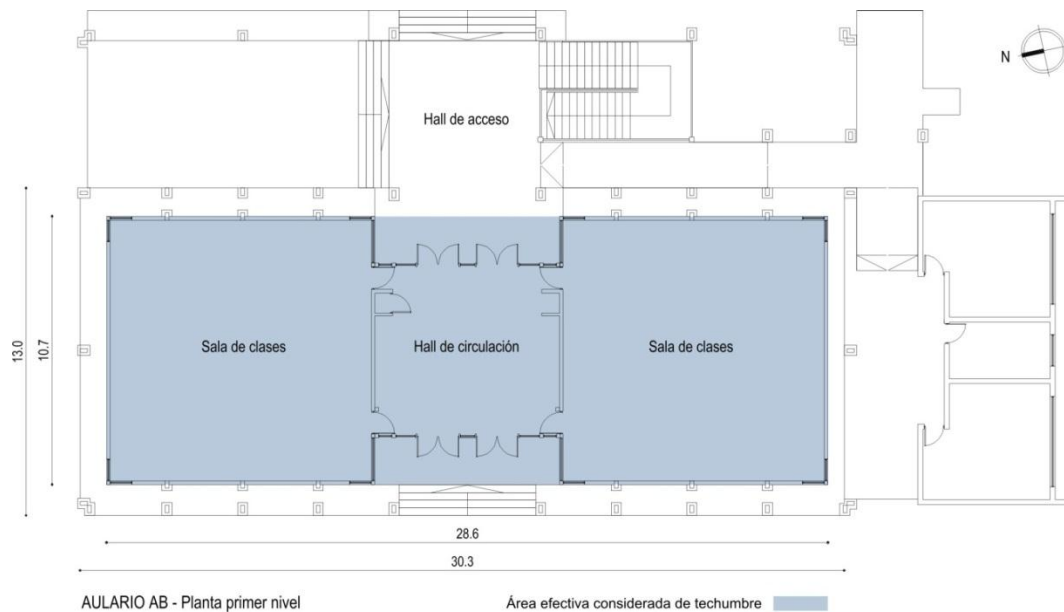


Figura 21. Planta tipo del edificio de aulas AB

La Figura 21 muestra la planta tipo del edificio de aulas AB, donde puede apreciarse la orientación predominante este-oeste del edificio, lo que resulta una oportunidad de exploración para la

incorporación de sistemas solares fotovoltaicos; normalmente asociados a orientaciones predominantes norte-sur. Siendo la superficie de cubierta mayor a la de ocupación -dado que gran parte queda en voladizo sobre la zona de accesos-, sólo se considera como superficie útil de cubierta para la instalación de sistemas fotovoltaicos, el área de ocupación del edificio simplificada a una forma rectangular representativa, que puede verse en la Figura 21, con un total de 306 m².

3.1.2 Consideraciones de simulación energética

La selección estratégica del edificio seleccionado, permite generar dos casos de estudio a partir del mismo modelo; variando las condiciones energéticas de simulación, para considerar los grupos más representativos de establecimientos educacionales. Seleccionando la Escuela René Louvel Bert del nivel básico-medio y el Aulario AB de la UBB del nivel superior (Figura 22). Esta simplificación puede adoptarse, dado que en el caso de estudio de la Escuela René Louvel Bert -al igual que en la mayoría de los establecimientos públicos de nivel básico-medio-, no existen sistemas de climatización; por lo que en el caso base sólo se consideran las cargas eléctricas de equipos e iluminación, sobre las cuáles prácticamente no influye la materialidad del edificio.

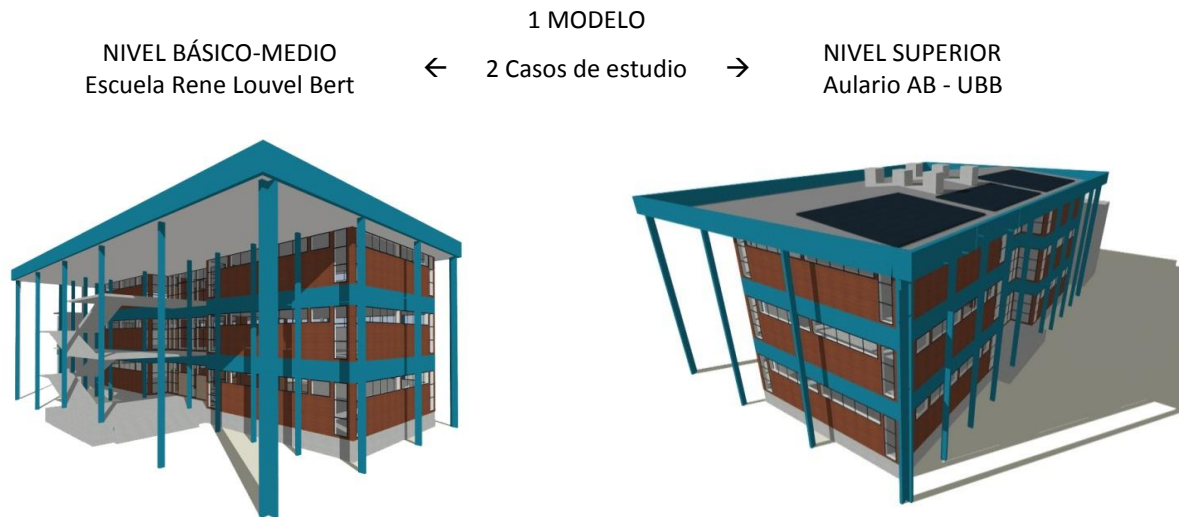


Figura 22. Modelo de simulación del edificio de aulas AB

A partir del edificio seleccionado, se realizan simulaciones energéticas con el software *Design Builder* [v.4.2.0.054] y *EnergyPlus* [v.8.1] como motor de cálculo; utilizando el módulo incorporado de simulación de energía fotovoltaica, para calcular la generación de energía eléctrica de los sistemas fotovoltaicos. Los resultados obtenidos, se comparan con datos de facturación conocidos,

para comprobar la calibración de los modelos de simulación. En el caso de nivel superior, los resultados de simulación arrojan un consumo de 40,3 kWh/m²-año, frente a registros de facturación de 43,0 kWh/m²-año; mientras que en el caso de nivel básico-medio, se obtuvieron consumos de 10,6 kWh/m²-año mediante simulación, frente a 11,7 kWh/m²-año de facturación. Validando la calibración del modelo, mediante la obtención de resultados muy cercanos a los consumos reales. Para la simulación energética se consideraron los siguientes valores, basados en información obtenida de recaudos gráficos, consultas a informantes calificados y visitas a terreno:

- a. Cargas internas: iluminación artificial 3,30 W/m²-100lux; equipos informáticos 103 W/m² (caso de estudio nivel básico-medio - 30 PC de 390 W en 113,4 m² de superficie); densidad 0,7 personas/m².
- b. Iluminación: mínima 300 lux en plano de trabajo; con tubos fluorescentes T5 existentes, *Surface mount*.
- c. Calefacción: 20°C mínima sin *set back*, considerando equipo existente *York Stellar 2000 Split-System Heat Pumps*, COP 1.81. En períodos sin ocupación no existe límite de temperatura.
- d. Ventilación natural: definición de aire exterior según mínimo de aire fresco (por persona)
- e. Infiltraciones: 13.7 ac/h, valor n50 línea base para albañilería de ladrillo (UBB y UC 2014)
- f. Materialidad: Muros exteriores [desde el interior: yeso 10mm, poliestireno expandido 20mm, ladrillo cerámico 120mm, cámara de aire 25mm, *siding* de madera 25mm. U=1,01 W/m²K], Tabiques interiores [placa de yeso 10mm, cámara de aire 100mm, placa de yeso 10mm, *siding* de madera 25mm. U=1,59 W/m²K], Cubierta [hormigón 120mm. U=4,06 W/m²-K], Cielorrasos [yeso 10mm], Piso [desde abajo: hormigón 120mm, baldosa cerámica 8mm. U=1,93 W/m²-K], Vidrios [simples 6mm. U=5,78 W/m²-K].
- g. Paneles fotovoltaicos: fracción de superficie con células solares activas 90%, eficiencia 15%

Tabla 7. Calendarios de simulación para casos de estudio

Ítem	Escuela Rene Louvel Bert				Aulario AB		
	Fecha	Desde	Hasta	%	Fecha	Desde	Hasta
Ocupación	mar-dic	08:30	15:30	80%	mar-ene	08:00	20:00
		15:30	17:00	40%			
		17:00	19:30	15%			
Equipos PC	mar-dic (1 aula 30 PC)	11:00	12:00	100%	No se considera		
		14:00	15:00	100%			
Proyectores	mar-dic	12:00	14:00	25%	mar-ene	11:00	12:00
						14:00	15:00
Iluminación	abr-set	08:30	12:00	80%	dic-ene	8 a 11	17a20
		17:00	19:30	15%	mar-may y set-nov	8 a 12:30	15:30 a 20
					jun-ago	08:00	20:00
Calefacción	No se considera				mar-may y set-nov	7:30 a 12	16:30 a 20
					jun-ago	07:30	20:00

En la Tabla 7 pueden verse las diferencias consideradas en los calendarios de ambos casos de estudio para los casos base simulados; donde no se consideran cargas de calefacción en el caso de nivel básico-medio, ni cargas de equipos de computación en el caso de nivel superior, para simular las condiciones reales de los establecimientos. En la simulación, se considera como parámetro variable la posición de los paneles fotovoltaicos; con el objetivo de evaluar el mejor desempeño de generación de energía, tiempo de auto-consumo e índices de compra y venta de energía. Mediante una primera simulación realizada con paneles fotovoltaicos en posición horizontal para el caso de nivel superior, (Gráfico 17-ref. a), puede observarse que las curvas de consumo y generación de energía son inversas; con excedentes de generación en los meses cálidos y déficit durante los meses fríos. Estas condiciones pueden ser modificadas al cambiar la posición de los paneles fotovoltaicos, como puede verse en el Gráfico 17-ref. b -simulado para acimut norte y 51° de inclinación-, donde puede apreciarse un incremento del tiempo de auto-consumo, y en consecuencia, menos tiempo en que debe comprarse energía desde la red.

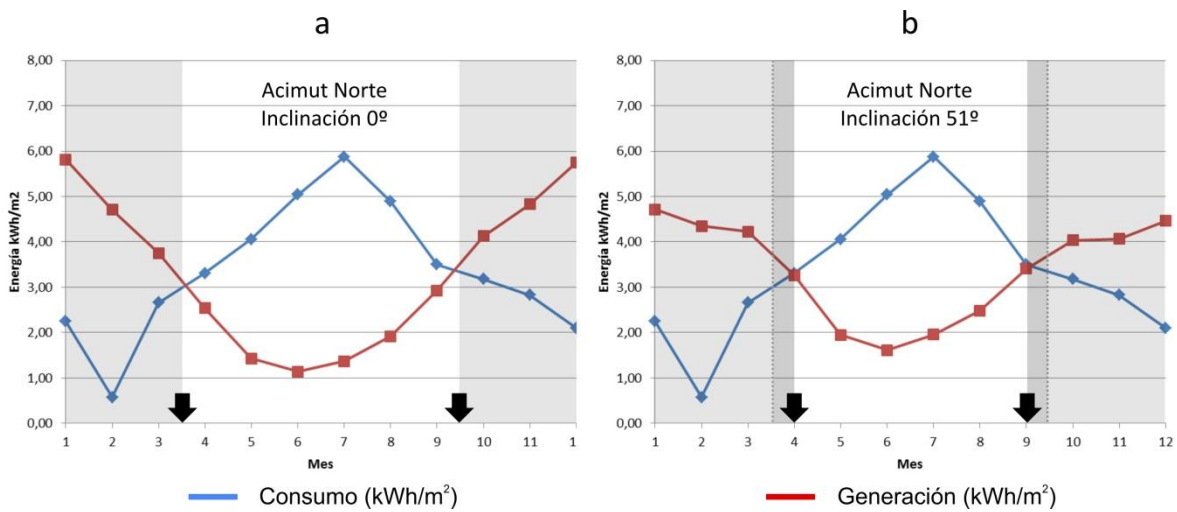


Gráfico 17. Variación de generación energética según posición de paneles fotovoltaicos

Con el objetivo de evaluar el desempeño energético de distintas posiciones de paneles fotovoltaicos, se define analizar tres posiciones características: horizontal, optimizado para radiación anual máxima y optimizado para julio; mes en el que se registra el máximo consumo del año para el caso de estudio. Para determinar la posición de los paneles fotovoltaicos, que registran la máxima radiación para el periodo anual y el mes de julio, se realiza una definición paramétrica en *Grasshopper* [v.0.9.0076] integrando el plugin de análisis ambiental *Ladybug* [v.0.0.62], para análisis de radiación solar y el módulo *Galapagos Evolutionary Solver*, para optimización mediante

algoritmos genéticos. En la definición, se genera una superficie de un metro cuadrado, que puede rotar en un acimut de 0 a 360 grados y una inclinación de 0 a 90 grados; optimizando la posición mediante *Galapagos*, para encontrar la radiación solar máxima -establecida como función objetivo-, evaluada con *Ladybug*, para los periodos seleccionados. Esta definición permite determinar el acimut e inclinación con precisión de un grado, lo que no es posible realizar mediante los registros consultados en la Sección 1.2.1 (pág. 22) -registro solarimétrico y base de datos *Meteonorm*-, que sólo presentan registros para ángulos o períodos específicos.

Tabla 8. Registro comparado de radiación solar en Concepción

Periodo	Acimut Grados	Inclinación Grados	Radiación solar		
			kWh/m ² -año (anual) y kWh/m ² -mes (julio)		
			Registro Solar	Meteonorm	Grasshopper
Anual	0 (norte)	0	1506	1533	1632
		25	-	1665	1771
		27	1632	-	1770
		35	-	1652	1747
		37	1602	-	1738
		45	-	1600	1678
		47	1539	-	1659
		55	-	1513	1567
		57	1434	-	1540
		90	1030	982	907
Julio	0 (norte)	27	72,6	-	75,0
		37	76,6	-	79,0
		47	78,9	-	80,9
		51	-	-	81,1
		57	79,4	-	80,8
		90	69,8	-	65,9

La Tabla 8, muestra un comparativo de los valores de radiación solar de los registros consultados, con los valores obtenidos a partir de la definición paramétrica. Mediante la definición, se ha podido comprobar que la máxima radiación anual se produce para acimut norte y 25 grados de inclinación y la máxima radiación para el mes de julio, para acimut norte y 51 grados de inclinación. Puede apreciarse que si bien los valores obtenidos mediante la definición son algo más elevados que el de los registros, el orden relativo de los resultados es prácticamente el mismo. La comparación también se realizó para acimut este, constatando que en esta orientación la mejor posición es la horizontal, decreciendo en sentido progresivo hasta alcanzar la posición vertical.

3.1.3 Resultados de simulación energética y análisis comparativo multifactorial

Con el objetivo de poder comparar el desempeño de las distintas posiciones características consideradas de los paneles fotovoltaicos -horizontal, optimizado para máxima radiación solar anual (acimut norte y 25 grados de inclinación) y optimizado para máxima radiación solar en julio (acimut norte y 51 grados de inclinación)-, se realizan simulaciones energéticas con incorporación de sistemas fotovoltaicos, para los casos de estudio de nivel básico-medio y superior.

Las simulaciones realizadas permiten comprobar que, en el caso de estudio de nivel superior, la instalación horizontal de 158 m² de paneles fotovoltaicos, equivalentes al 52% de la superficie de planta considerada, permiten cubrir el 100% del consumo total, de iluminación, electricidad y calefacción. Esta superficie determinada, se establece como fija para poder evaluar las diferencias producidas por efecto de la inclinación de los paneles fotovoltaicos; considerados con una eficiencia genérica del 15%; según valores por defecto de *Design Builder*.

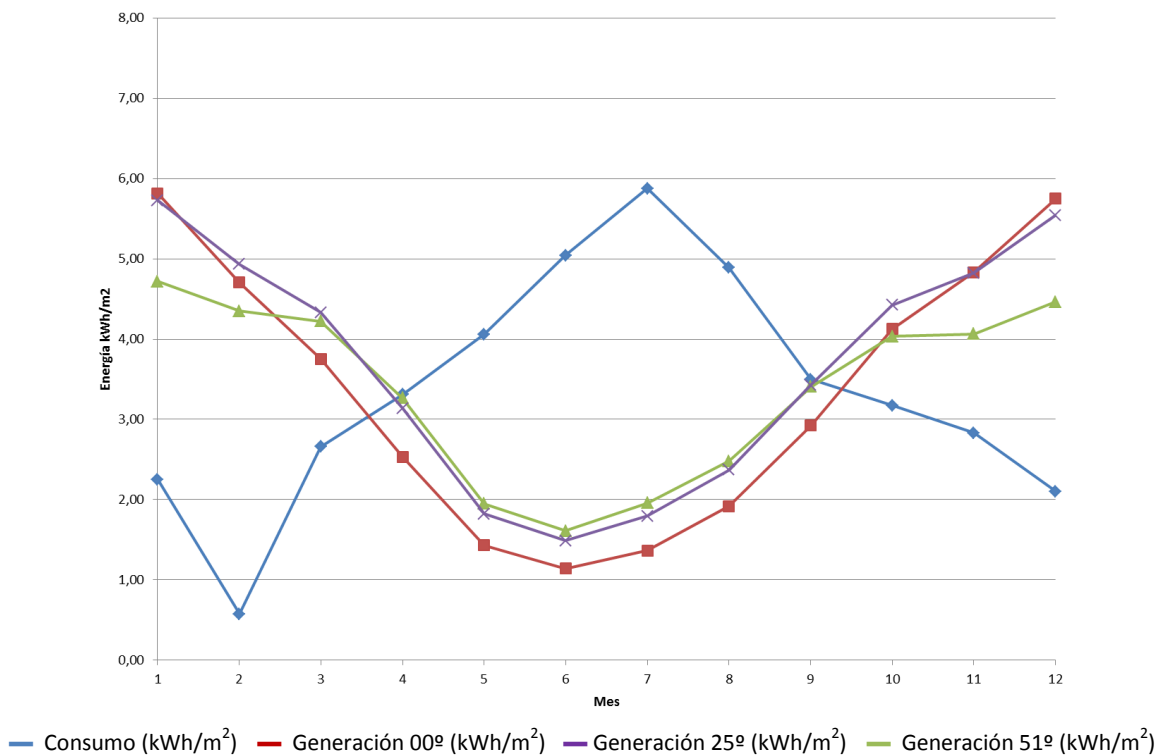


Gráfico 18. Consumo y generación mensual de energía en nivel superior

El Gráfico 18 muestra una comparación entre el consumo y la generación de energía eléctrica, para las 3 posiciones características consideradas, para el caso de estudio del Aulario AB. Puede

apreciarse que las soluciones optimizadas para el periodo anual [25º] y para el mes de julio [51º], aumentan el tiempo en que la generación supera al consumo, con respecto a la posición horizontal. Pero resulta difícil poder evaluar con precisión cuál de las dos soluciones resulta más favorable en el desempeño global. Si bien la solución optimizada para julio es la que logra mayor generación en el periodo frío, también es la de menor generación en el periodo caluroso; indicando la necesidad de considerar una evaluación detallada de las soluciones, según un análisis de resultados horarios, para poder determinar con precisión la mejor solución.

El Gráfico 19, Gráfico 20 y Gráfico 21, a continuación, muestran el comparativo de consumo y generación de energía eléctrica, realizados para las 8760 horas del año, para las posiciones características consideradas. En ellos, puede apreciarse que existe una tendencia análoga a la presentada en el análisis mensual. La solución optimizada para julio (Gráfico 20), muestra un patrón de generación con una tendencia más horizontal y una amplitud menor que la solución horizontal (Gráfico 19); pudiendo interpretarse que, si bien el déficit de energía será menor en invierno, también el excedente será menor en verano. En el caso de la optimización anual (Gráfico 21), puede apreciarse que la tendencia presenta una situación intermedia entre ambos casos.

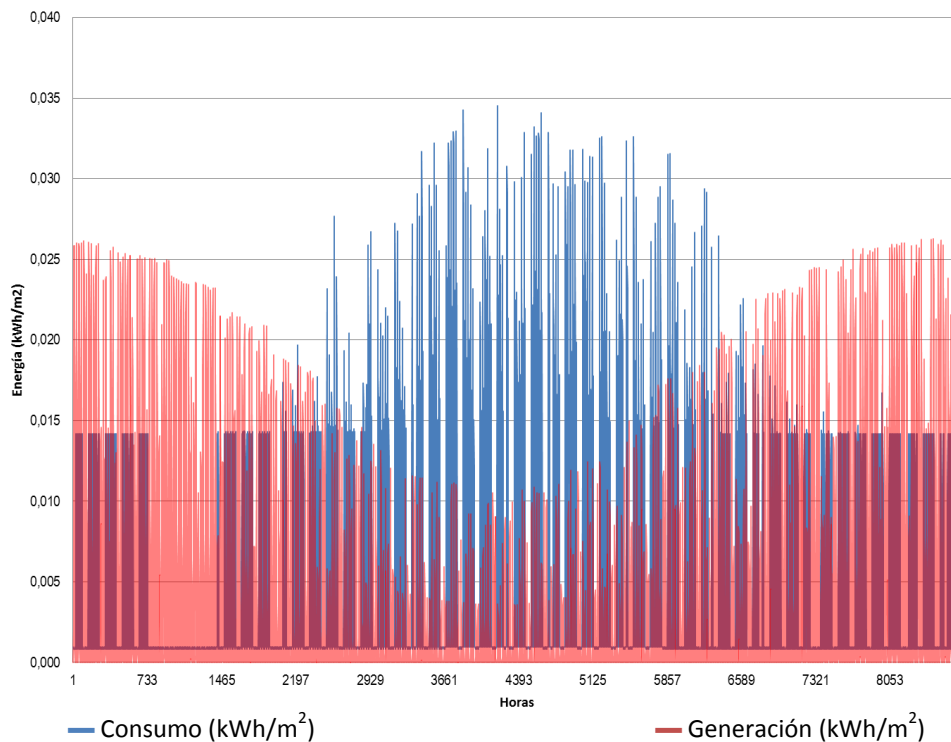


Gráfico 19. Consumo y generación para paneles en posición horizontal [00º] en nivel superior

Capítulo 3. Factibilidad de incorporación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos educacionales

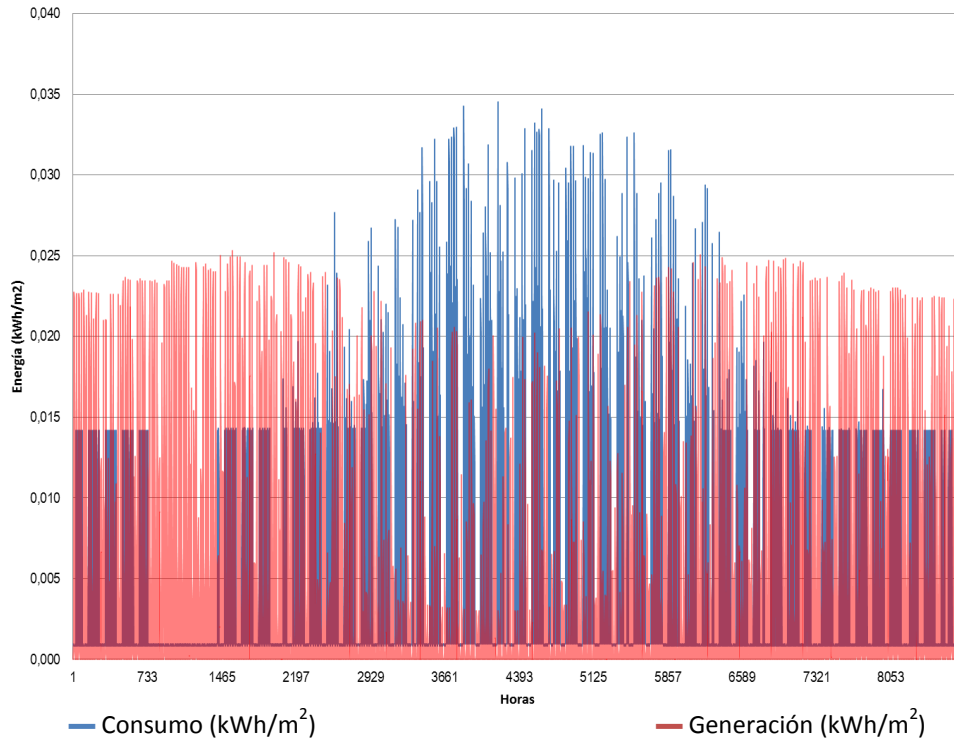


Gráfico 20. Consumo y generación para paneles optimizados para julio [51ª] en nivel superior

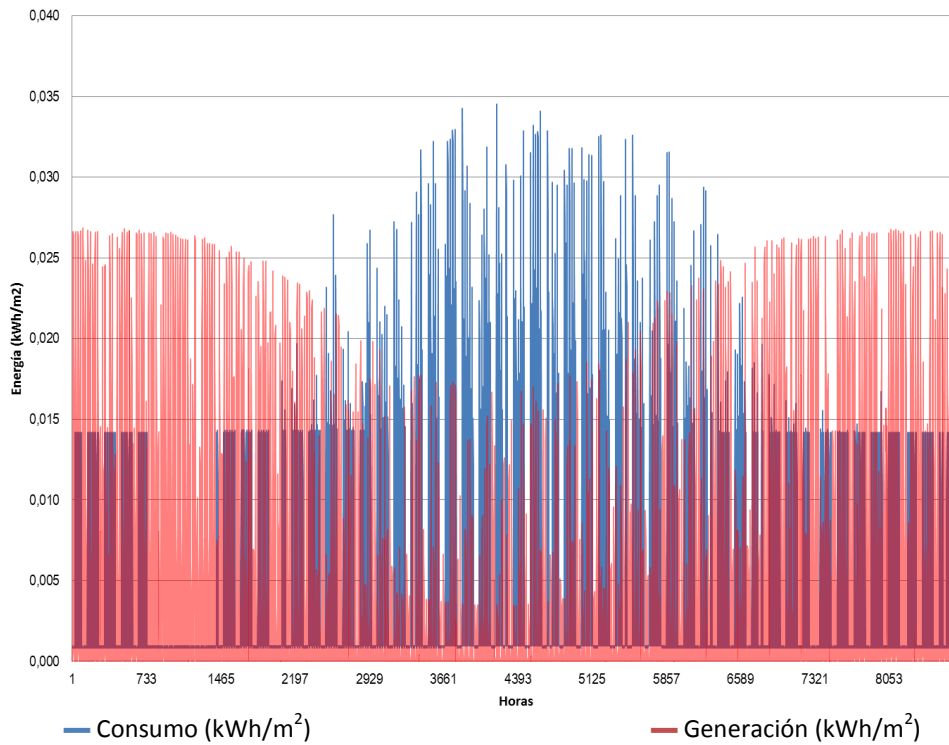


Gráfico 21. Consumo y generación para paneles optimizados anual [25ª] en nivel superior

El procesamiento de los 8760 datos horarios, permite realizar una comparación entre las tres soluciones, considerando tres aspectos integrados en un análisis multifactorial: la generación de energía, el tiempo de auto-consumo y los índices de compra y venta de energía.

Tabla 9. Procesamiento de datos de simulación horaria

Fecha y hora	Consumo kWh/m ²	Generación kWh/m ²	Generación - Consumo kWh/m ²
02/01/2016 16:00	0,003	0,016	0,013
02/01/2016 17:00	0,000	0,012	0,012
02/01/2016 18:00	0,010	0,007	-0,003
02/01/2016 19:00	0,013	0,003	-0,011
Total	0,026	0,038	

Venta total de energía	0,025
Compra total de energía	-0,014
Horas de auto-consumo	2

La Tabla 9 muestra la metodología utilizada para el procesamiento de datos de simulación horaria. Conocidos los valores de consumo y generación de energía eléctrica para cada una de las 8760 horas, se calcula la diferencia entre ambos registros, definida como generación menos consumo. Los valores positivos, indican que para esa hora analizada existe un excedente de generación de energía eléctrica, que puede venderse a la red; mientras que los valores negativos, indican que existe un déficit de energía eléctrica, que debe comprarse desde la red. La sumatoria de todos los valores positivos será la venta total de energía eléctrica y la de todos los valores negativos, será la compra total. Además, el recuento de todos los valores positivos, será la cantidad total de horas de auto-consumo anual. Esta información, se procesa para las tres posiciones consideradas, de manera de poder realizar el análisis comparativo multifactorial.

Tabla 10. Comparativo multifactorial en caso de estudio de nivel superior

Inclinación FV °	Generación de energía		Tiempo de auto-consumo		Venta de energía		Compra de energía	
	kWh/m ² -año	%	Horas	%	kWh/m ² -año	%	kWh/m ² -año	%
00	40,29	0,0	2590	0,0	25,67	0,0	25,65	0,0
25	43,82	8,8	2665	0,9	28,38	10,5	24,83	-3,2
51	40,52	0,6	2573	-0,2	25,55	-0,5	25,31	-1,3

La Tabla 10 muestra los resultados de comparación de generación de energía eléctrica, tiempo de auto-consumo e índices de compra y venta de energía, para el caso de estudio de nivel superior y con valores asimilados a variaciones porcentuales que permite confrontarlos. Puede apreciarse que, para todos los parámetros evaluados, la solución optimizada para el periodo anual, obtiene el mejor desempeño; con 8,8% más de generación de energía, 0,9% más de tiempo de auto-consumo, 10,5% más de venta de energía y 3,2% menos de compra de energía, que la posición horizontal considerada base. Determinando en función de los resultados, que la posición de paneles fotovoltaicos con mejor desempeño para edificios de nivel superior, es la optimizada para el periodo anual, con acimut norte y 25 grados de inclinación. Estos resultados muestran la importancia de un análisis de simulación detallado horario, para comprender cabalmente el comportamiento energético de las edificaciones; dado que si sólo se hubieran considerado las simulaciones mensuales, la interpretación hubiera sido notoriamente diferente.

Para el caso de estudio representativo del nivel básico-medio, se procede con la misma metodología, considerando idénticas posiciones de paneles fotovoltaicos y evaluando los mismos parámetros que en el caso de nivel superior. En este caso, mediante la simulación se ha podido comprobar que la instalación horizontal de 42 m² de paneles fotovoltaicos, equivalentes al 14% de la superficie de planta considerada, permiten cubrir el 100% del consumo eléctrico total anual, incluyendo iluminación y electricidad. Esta superficie de ocupación se establece como parámetro fijo para las simulaciones, de manera de poder determinar el desempeño para las distintas posiciones características evaluadas.

El Gráfico 22, más adelante, muestra el análisis mensual de consumo y generación de energía eléctrica para las tres posiciones consideradas. Puede observarse que los resultados son análogos al primer caso de estudio de nivel superior. Mientras que la posición optimizada para julio [51º] presenta la mayor generación en el periodo frío, es también la de menor generación en el periodo caluroso. Nuevamente, resulta difícil determinar gráficamente, cual solución presenta mejor desempeño; por lo que se realizan simulaciones detalladas hora a hora, para poder evaluar con precisión los resultados.

Capítulo 3. Factibilidad de incorporación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos educacionales

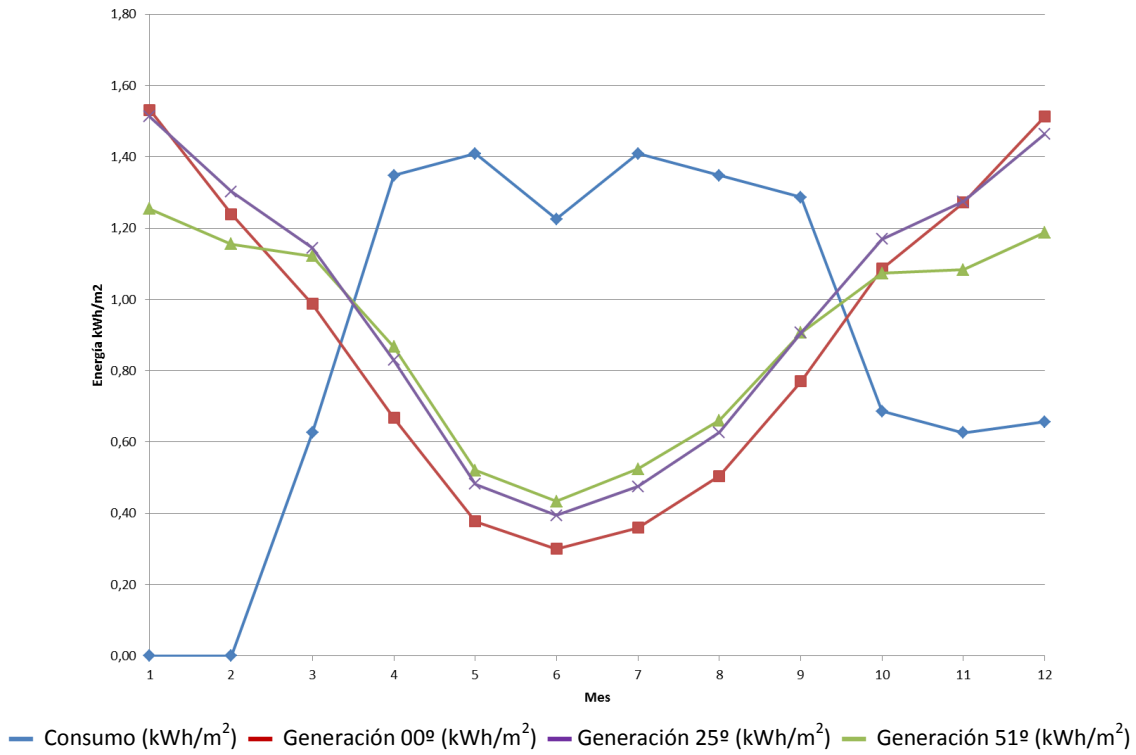


Gráfico 22. Consumo y generación mensual de energía en nivel básico-medio

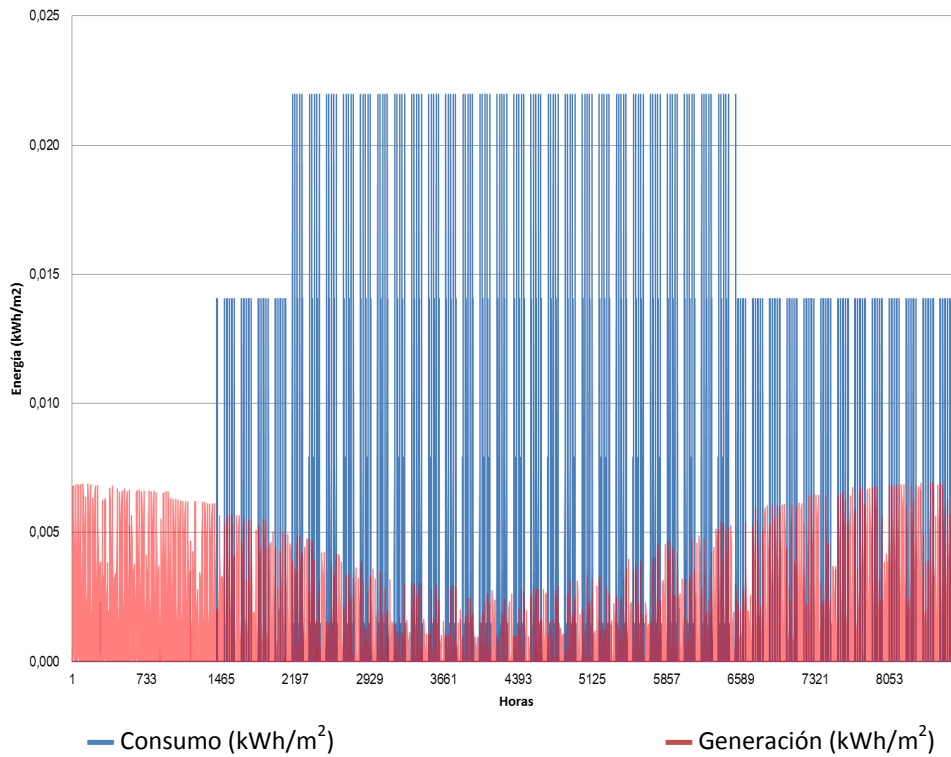


Gráfico 23. Consumo y generación para paneles en posición horizontal [00°] en nivel básico-medio

Capítulo 3. Factibilidad de incorporación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos educacionales

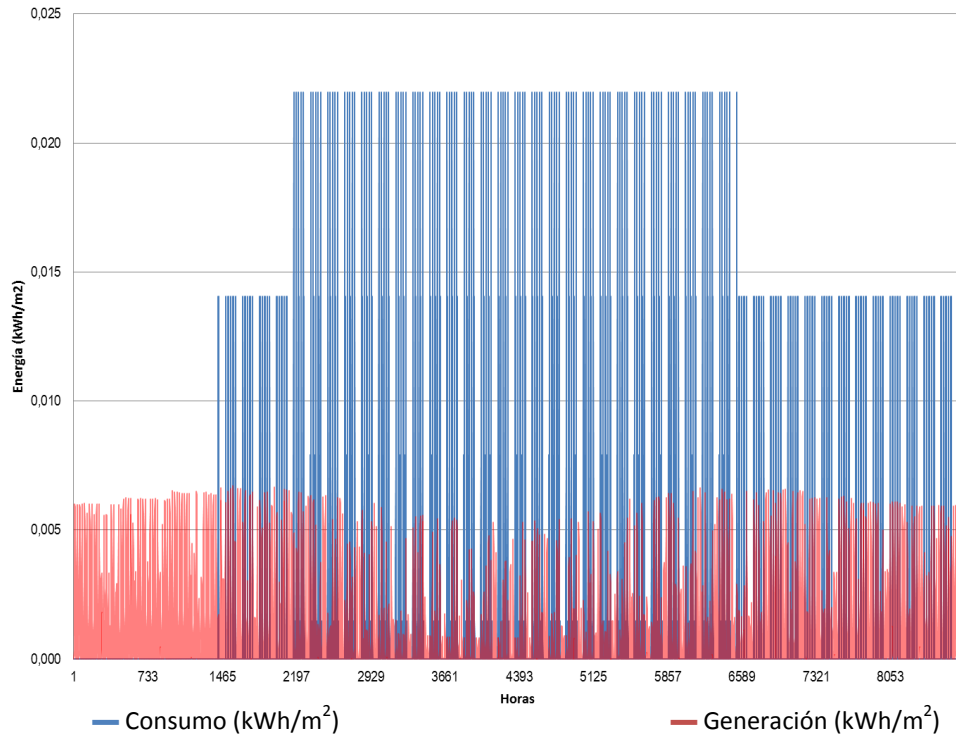


Gráfico 24. Consumo y generación para paneles optimizados para julio [51º] en nivel básico-medio

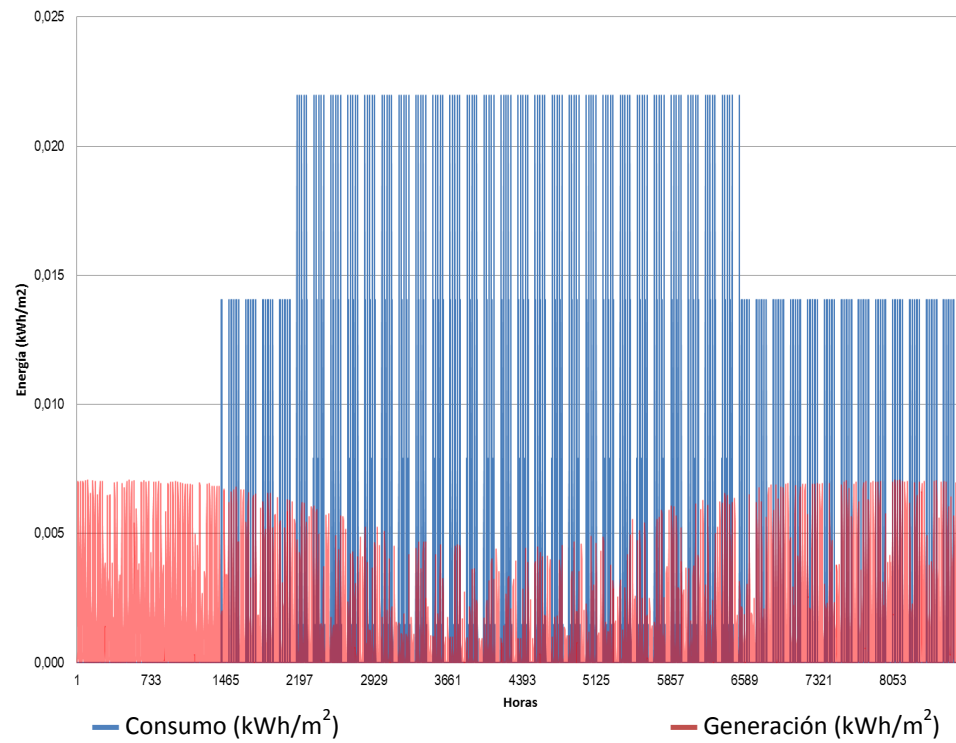


Gráfico 25. Consumo y generación para paneles optimizados anual [25º] en nivel básico-medio

En el Gráfico 23, Gráfico 24 y Gráfico 25, más atrás, puede observarse el resultado hora a hora de la simulación de consumo y generación de energía eléctrica, para las tres posiciones ensayadas. Con resultados análogos a los encontrados en el primer caso de estudio, presentando una curva de generación con amplitud máxima en la posición horizontal (Gráfico 23), mínima en la posición optimizada para julio (Gráfico 24) y media en la posición optimizada anual (Gráfico 25). Puede apreciarse también que la tendencia de la curva de consumo presenta un comportamiento mucho más regular que en el primer caso; asociada a los equipos de computación, que presentan una carga eléctrica representativa y constante durante todo el periodo de ocupación.

Tabla 11. Comparativo multifactorial en caso de estudio de nivel básico-medio

Inclinación FV °	Generación de energía		Tiempo de auto-consumo		Venta de energía		Compra de energía	
	kWh/m ² -año	%	Horas	%	kWh/m ² -año	%	kWh/m ² -año	%
00	10,61	0,0	3612	0,0	8,30	0,0	8,32	0,0
25	11,58	9,2	3612	0,0	8,94	7,7	7,98	-4,0
51	10,79	1,7	3596	-0,2	8,15	-1,8	7,99	-3,9

La Tabla 11, muestra los resultados del análisis comparativo multifactorial, donde nuevamente puede apreciarse que la posición optimizada anual presenta un mejor desempeño; ya que para la misma superficie de captación, la producción de energía eléctrica es un 9,2% mayor, la venta un 7,7% mayor y la compra un 4,0% menor, que la posición horizontal considerada base. Estos resultados confirman que la posición de paneles fotovoltaicos con mejor desempeño para establecimientos educacionales en la ciudad de Concepción, es la optimizada anual -con acimut norte y 25° de inclinación-; logrando en ambos casos, mayor generación, mayor venta y menor compra de energía eléctrica en el periodo anual.

El análisis comparativo multifactorial de ambos casos de estudio, permite comprobar que variaciones en la posición de los paneles fotovoltaicos, sólo producen variaciones mínimas, menores al 1%, en el tiempo de auto-consumo. Contrariamente a lo que podía interpretarse en el análisis mensual, reflejado en el Gráfico 18 (pág. 62) y Gráfico 22 (pág. 67); comprobando una vez más, la importancia de un análisis detallado de simulación horaria. Con el objetivo de investigar el comportamiento del tiempo de auto-consumo, se realizan simulaciones horarias para días característicos del año, donde pueda evidenciarse el comportamiento de las curvas de generación para las distintas posiciones.

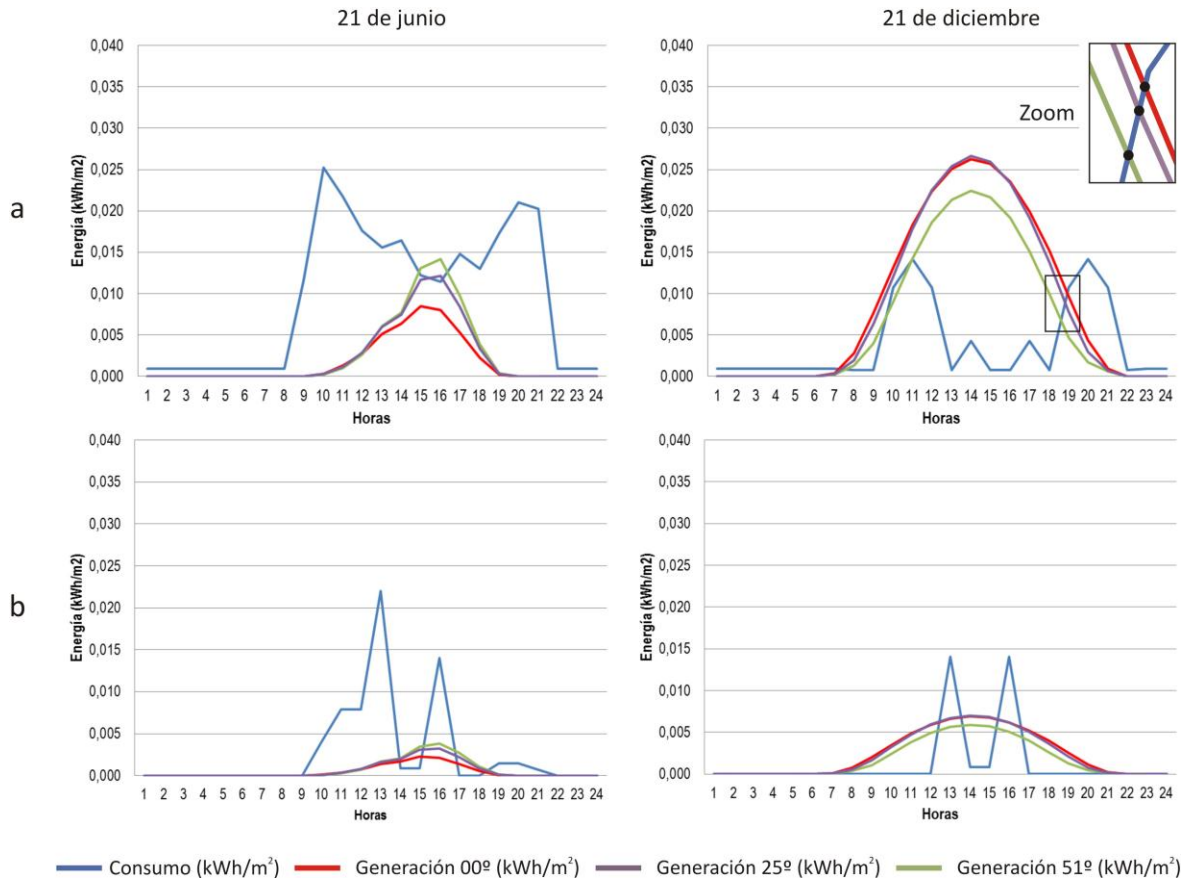


Gráfico 26. Consumo y generación para días característicos en ambos casos de estudio

El Gráfico 26 muestra las curvas de consumo y generación de distintas posiciones de paneles fotovoltaicos, para el 21 de junio y 21 de diciembre, en el caso de estudio de nivel superior (ref. a) y de nivel básico-medio (ref. b). Al evaluar cada uno de los gráficos de forma independiente, puede apreciarse que, para cualquiera de las posiciones de los paneles fotovoltaicos, el periodo de tiempo de generación de energía eléctrica es el mismo. Este periodo queda definido por el ciclo solar, dado que la generación se produce siempre que haya luz natural, siendo de 11 horas (9 a 20 horas) el 21 de junio, y 16 horas (6 a 22 horas) el 21 de diciembre, aproximadamente. De esta forma, las variaciones en la magnitud de la generación de energía eléctrica, se atribuyen principalmente a cambios en la pendiente de la curva de generación, que sólo cambian levemente el punto de corte con la curva de consumo (Gráfico 26, Zoom); cuya proyección vertical define el número de horas de auto-consumo. Estos resultados demuestran que las variaciones en la inclinación de los paneles fotovoltaicos, sólo pueden producir alteraciones mínimas en el tiempo de auto-consumo.

3.2 Análisis de costos de ciclo de vida

Las simulaciones energéticas realizadas durante la sección anterior (3.1.3, pág. 62), permiten obtener resultados detallados de las capacidades de compra y venta de energía eléctrica, de paneles fotovoltaicos con orientación norte y distintas inclinaciones. A partir de esos resultados, el objetivo de esta sección, es realizar un análisis de costo de ciclo de vida, evaluando la relación entre la posición de los sistemas fotovoltaicos y el tiempo de retorno de inversión. El análisis se realiza para el caso de estudio de nivel superior, que considera un escenario completo de consumo energético, incluyendo iluminación, electricidad y calefacción. Considerando, al igual que en el caso anterior, la instalación de 158 m² de paneles fotovoltaicos, equivalentes al 52% de la superficie de planta considerada, que permiten cubrir el 100% del consumo; con paneles con orientación norte e inclinaciones de 0, 25 y 51 grados.

3.2.1 Supuestos económicos

El análisis de costos de ciclo de vida, se realiza en base a la norma ASTM E 917-05 (ASTM 2005); desde donde se seleccionan las siguientes fórmulas de análisis financiero, para definir el valor del dinero en el tiempo. Siendo en todos los casos, i la tasa de descuento y n el período evaluado.

- Valor Presente Singular (VPS) - Permite obtener el VPS de una cantidad futura cualquiera F

$$VPS = F \times \frac{1}{(1 + i)^n}$$

- Valor Presente de una Anualidad (VPA) - Permite obtener el VPA de un monto anual conocido A

$$VPA = A \times \frac{(1 + i)^n - 1}{i (1 + i)^n}$$

- Valor Presente de una Anualidad Modificada - Permite obtener el valor presente (P), de una anualidad conocida (A), que aumenta según una tasa de escalonamiento (e)

$$P = A \times \left(\frac{1 + e}{i - e} \right) \times \left[1 - \left(\frac{1 + e}{1 + i} \right)^n \right]$$

Para el análisis se considera una tasa de descuento del 10%, normalmente adoptada en la evaluación de proyectos fotovoltaicos (IEA 2010a, 2010b), y un ciclo de vida de 40 años, por

tratarse de establecimientos educacionales, que presentan normalmente un uso prolongado en el tiempo. No se considera inflación dado que se entiende estructural por debajo del 5,0%, siendo el promedio de los últimos 10 años del 3,7%⁵. Para la tasa de escalonamiento de electricidad se considera un 6%, basado en la evolución del precio medio de mercado de los últimos años⁶.

La superficie de captación del sistema fotovoltaico de 158 m², permite establecer el tamaño de la instalación a través del módulo *Photovoltaics Surface* de *Ladybug* [v.0.0.62] (Sadeghipour 2016); calculando una instalación de 21 kWp, a partir de la cual puede estimarse el costo de la misma. Teniendo en cuenta que las instalaciones fotovoltaicas están sujetas al efecto de economías de escala, se utilizan antecedentes de costos de adjudicación de licitaciones del Programa Techos Solares Públicos [PTSP] (MINERGIA y GIZ 2015), para tener una estimación más precisa.

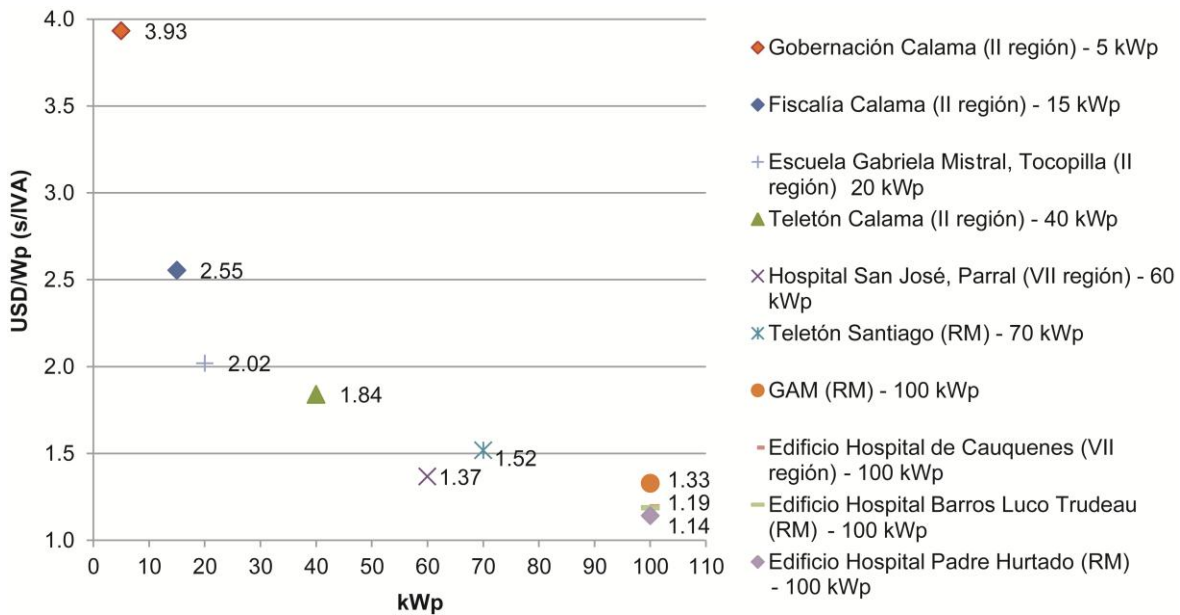


Gráfico 27. Comparación costo neto de adjudicación en USD/Wp. PTSP

El Gráfico 27 muestra los proyectos adjudicados por el PTSP en 2015, donde puede apreciarse el claro efecto de economía de escalas; reflejado en los distintos precios de acuerdo al tamaño de la instalación fotovoltaica. Para el análisis del caso de estudio de nivel superior, se considera un costo neto de 2,02 USD/Wp, considerando la semejanza con el proyecto de la Escuela Gabriela Mistral, correspondiente a una instalación de 20 kWp.

⁵ Banco Central de Chile - <http://si3.bcentral.cl/Siete/secure/cuadros/arboles.aspx>

⁶ Comisión Nacional de Energía - <http://datos.energiaabierta.cne.cl>

En cuanto a la vida útil de los sistemas fotovoltaicos, se adoptan los valores del *National Renewable Energy Laboratory [NREL]*, que establece un periodo de 25 a 40 años (NREL 2016b); por lo que no se consideran en el análisis, costos de remplazo ni valor residual de los sistemas.

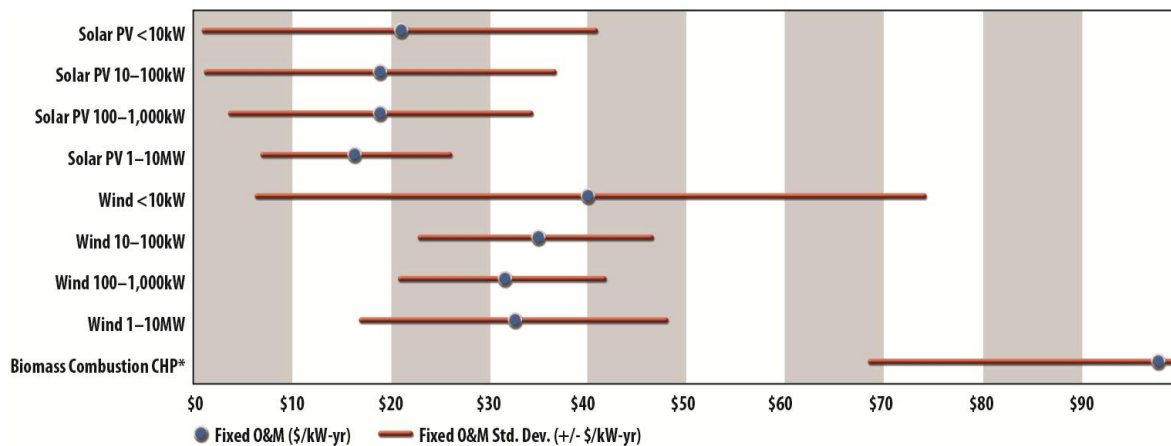


Gráfico 28. Costos fijos de operación y mantenimiento para ERNC. NREL

Para los costos de operación y mantenimiento, se consideran los registros de la misma fuente (NREL 2016a) que pueden apreciarse en el Gráfico 28; estimando un costo fijo para instalaciones fotovoltaicas de 10 a 100 kWp, de 18 USD/kWp-año, aproximadamente.

3.2.2 Resultados del análisis de costos de ciclo de vida

En función de las fórmulas de análisis y los supuestos económicos establecidos, se realiza el análisis financiero para el caso de estudio de nivel superior. Considerando un caso base, sin implementación de sistemas fotovoltaicos y con consumo eléctrico completo -iluminación, electricidad y calefacción-, y tres alternativas con implementación de 158 m² de sistemas fotovoltaicos y variaciones de inclinación de 0, 25 y 51 grados; considerando los valores de compra y venta de energía eléctrica, obtenidos de la Tabla 10 (pág. 65).

La Tabla 12, más adelante, muestra los costos de inversión estimados y en valor presente, para los rubros considerados en el caso base y las distintas alternativas. En el caso base sólo existe compra de energía, asociada al consumo total; mientras que en las alternativas, las cantidades de compra y venta de energía en cada caso, se valorizan de acuerdo a las tarifas correspondientes (CGE Distribución 2016), teniendo en cuenta las consideraciones de la Sección 1.3.1 (pág. 30), para realizar un balance de facturación neta, de acuerdo a lo establecido por Ley 20.571 de *Net Billing*.

Tabla 12. Análisis financiero para sistemas FV con distintas inclinaciones

Aulario AB	CASO BASE - Sin FV		Alternativa A - FV 00°		Alternativa B - FV 25°		Alternativa C - FV 51°	
Superficie total 834 m2	Energía (kWh/m ² -año)		Energía (kWh/m ² -año)		Energía (kWh/m ² -año)		Energía (kWh/m ² -año)	
Tasa descuento 10%	Compra	Venta	Compra	Venta	Compra	Venta	Compra	Venta
Ciclo de vida 40 años	40,26	0,00	25,65	25,67	24,83	28,38	25,31	25,55
Rubro	Estimado \$	Presente \$	Estimado \$	Presente \$	Estimado \$	Presente \$	Estimado \$	Presente \$
Instalación 158m ² FV	-	-	27.785.100	27.785.100	27.785.100	27.785.100	27.785.100	27.785.100
Electricidad (tasa 6%)	4.969.372	101.760.579	1.581.450	32.384.219	1.313.225	26.891.631	1.546.499	31.668.508
Operación y mantención	-	-	247.590	2.421.195	247.590	2.421.195	247.590	2.421.195
Costo total	4.969.372	101.760.579	29.614.140	62.590.514	29.345.915	57.097.926	29.579.189	61.874.803
Ahorro anual	-		3.140.333		3.408.557		3.175.284	

La Tabla 12 permite apreciar que, aunque la inversión en instalación de sistemas FV sea la misma - por considerarse igual superficie de captación-, el costo total estimado y en valor presente, es menor para la alternativa B, optimizada anual con 25 grados de inclinación. La optimización de la posición de los sistemas, produce un diferencial que incrementa los índices de venta y reduce los índices de compra de energía eléctrica, lo que se traduce en menores costos, y en consecuencia mayores ahorros anuales. Por otra parte, puede apreciarse que, al considerar el análisis para los 40 años de ciclo de vida supuestos, los costos totales en valor presente de las alternativas sufren una importante reducción con respecto al caso base; fuertemente influenciados por el costo de la electricidad. La alternativa B, que revela los mejores resultados, presenta un costo total en valor presente que podría considerarse prácticamente la mitad -56%- del caso base. Lo que significa que a lo largo del ciclo de vida del edificio, el costo energético puede reducirse prácticamente a la mitad, gracias a la implementación de sistemas fotovoltaicos. Estableciendo una equivalencia a lo largo de la vida útil, entre el costo energético de dos edificios con implementación de sistemas fotovoltaicos y el mismo edificio sin implementación de tecnología solar activa.

Los mayores ahorros anuales, logrados mediante la optimización de la posición de los sistemas fotovoltaicos, se traducen en un menor tiempo de retorno de la inversión; como puede verse en el Gráfico 29, más adelante. Puede apreciarse que el retorno de la inversión a lo largo de los 40 años evaluados, presenta un claro desfase entre los resultados obtenidos para la inclinación de 25 grados y las restantes alternativas, de posición horizontal y 51 grados de inclinación.

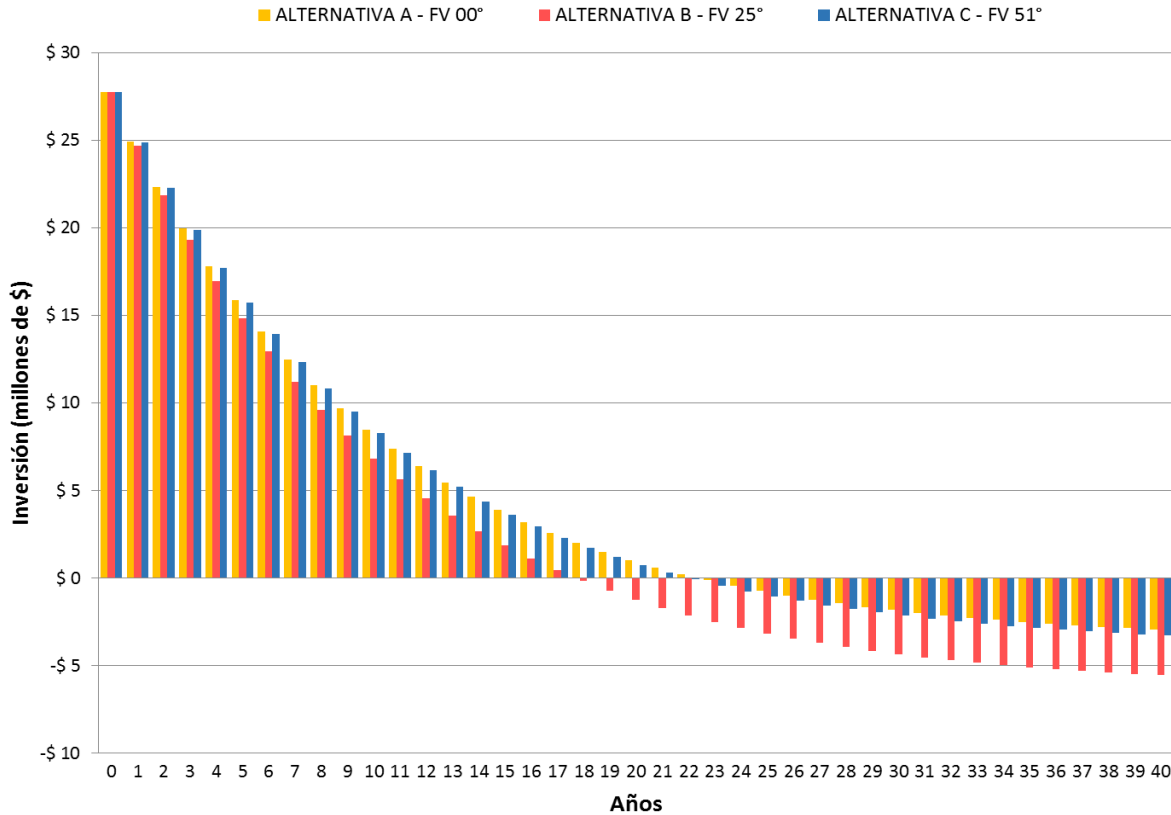


Gráfico 29. Tiempo de retorno de inversión para sistemas FV con distintas inclinaciones

Los resultados de recuperación de la inversión mostrados en la Tabla 13, permiten apreciar que la posición optimizada con inclinación a 25 grados, presenta un tiempo de retorno de inversión de 18 años; 4 años menor que la inclinación de 51 grados y 5 años menor que la posición horizontal. Considerando que la vida útil de los paneles fotovoltaicos se estima entre 25 y 40 años, se presentan también los resultados de recuperación de la inversión para estos periodos. Puede apreciarse que para cualquiera de los casos, la recuperación de la inversión se produce antes de los 25 años, y que la posición optimizada presenta los mejores resultados -con utilidades con importantes diferencias-, en cualquiera de los dos periodos considerados.

Tabla 13. Recuperación de la inversión para sistemas FV con distintas inclinaciones

Inclinación FV	Retorno de inversión	Recuperación a los 25 años		Recuperación a los 40 años	
		años	% inversión	\$	% inversión
00	23	103	719.824	111	2.924.371
25	18	111	3.154.512	120	5.547.356
51	22	104	1.037.076	112	3.266.159

Estos resultados, demuestran que al considerar la posición optimizada de sistemas fotovoltaicos - acimut norte y 25 grados de inclinación-, no sólo se logra el mejor desempeño en términos energéticos, sino también en términos financieros. Obteniendo por la misma inversión en instalación de sistemas fotovoltaicos, mayores ahorros y utilidades y menores tiempos de retorno; gracias únicamente, a los mejores índices de compra y venta de energía eléctrica.

Por último, se exploran los aspectos financieros en relación a la capacidad de producción energética extensiva; con el objetivo de evaluar si la maximización de generación eléctrica, permite disminuir el tiempo de retorno de inversión, con respecto al óptimo determinado. Para ello, se analiza una alternativa con la máxima superficie de ocupación posible, considerada para la posición horizontal en un 70% de la superficie de planta -por restricciones de operación y servicio-, equivalente a 214 m² de paneles fotovoltaicos, que permiten cubrir el 136% del consumo total.

Se consideran los mismos supuestos económicos que en el caso anterior y una estimación del tamaño de instalación de 28 kWp, con un costo neto de 1,98 USD/Wp, determinado por regresión potencial, en base a los antecedentes de licitación del PTSP (Gráfico 27, pág.72).

Tabla 14. Análisis financiero para generación energética extensiva

Aulario AB	CASO BASE - Sin FV		Alternativa B - FV 25° 158m ² - 52% planta		Alternativa X - FV 00° 214 m ² - 70% planta	
	Energía (kWh/m ² -año)		Energía (kWh/m ² -año)		Energía (kWh/m ² -año)	
Superficie total 834 m2						
Tasa descuento 10%	Compra	Venta	Compra	Venta	Compra	Venta
Ciclo de vida 40 años	40,26	0,00	24,83	28,38	23,34	37,84
Rubro	Estimado \$	Presente \$	Estimado \$	Presente \$	Estimado \$	Presente \$
Instalación 158m ² FV	-	-	27.785.100	27.785.100	-	-
Instalación 214m ² FV	-	-	-	-	36.264.541	36.264.541
Electricidad (tasa 6%)	4.969.372	101.760.579	1.313.225	26.891.631	544.888	11.157.971
Operación y mantención	-	-	247.590	2.421.195	330.120	3.228.260
Costo total	4.969.372	101.760.579	29.345.915	57.097.926	37.139.549	50.650.773
Ahorro anual	-		3.408.557		4.094.364	

La Tabla 14, permite apreciar que al incrementar la extensión de sistemas fotovoltaicos, se reduce el índice de compra y aumenta el índice de venta de energía eléctrica, lo que produce una reducción del costo total en valor presente y en consecuencia mayores ahorros anuales; pero con incrementos en el costo total estimado, producto de las mayores superficies consideradas.

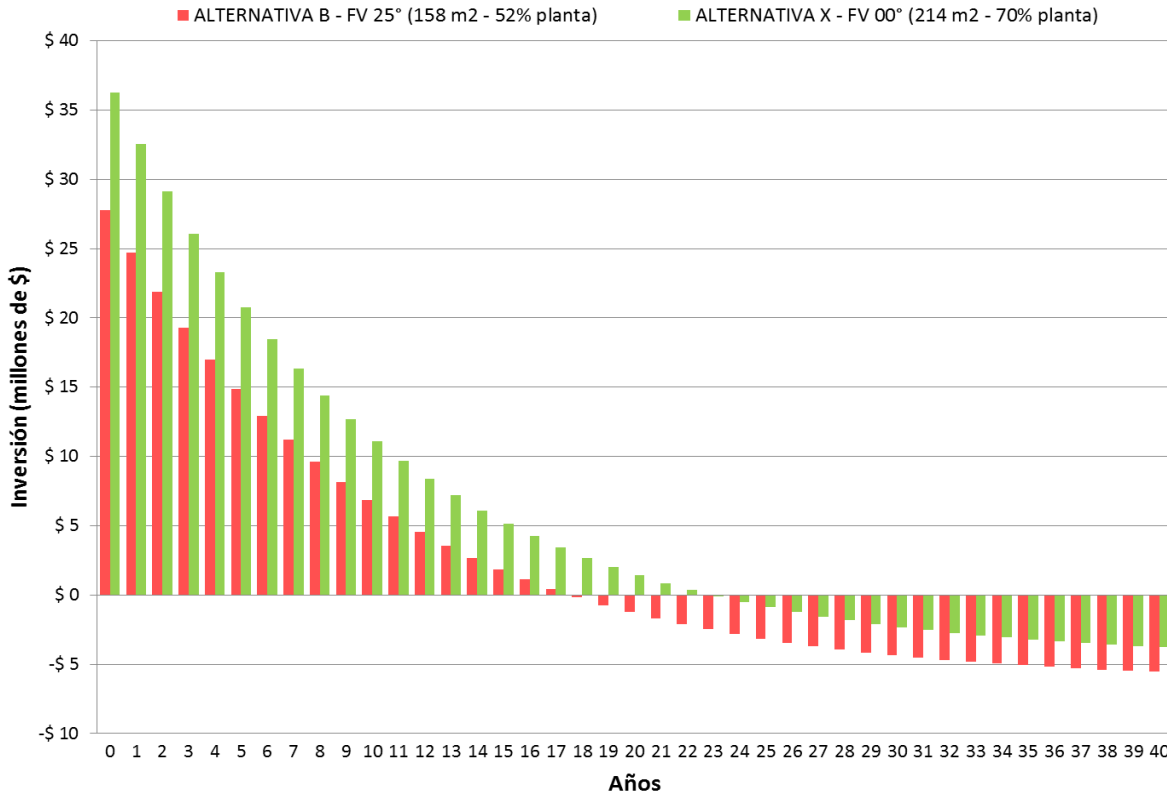


Gráfico 30. Tiempo de retorno de inversión para generación energética extensiva

Los resultados del Gráfico 30, permiten apreciar que la alternativa evaluada, implica una mayor inversión por concepto de instalación de los sistemas, mayor tiempo de retorno de la inversión y menores utilidades al final del ciclo de vida evaluado; con respecto a la posición optimizada.

Tabla 15. Recuperación de la inversión para generación energética extensiva

Inclinación FV °	Superficie FV		Retorno de inversión años	Recuperación 25 años		Recuperación 40 años	
	m2	% planta		% inversión	\$	% inversión	\$
25	158	52	18	111	3.154.512	120	5.547.356
00	214	70	23	102	900.168	110	3.774.455

La Tabla 15 muestra que el tiempo de retorno de inversión para la alternativa de generación extensiva, se incrementa en 5 años con respecto al caso de posición optimizada, y presenta menores utilidades tanto a los 25 como a los 40 años. Demostrando que la posición optimizada con acimut norte y 25 grados de inclinación, presenta el mejor desempeño en todos los aspectos financieros evaluados.

3.3 Aporte de energía solar en el desempeño energético

Se analiza en esta sección, la capacidad de aporte de energía solar en relación al consumo energético de los establecimientos educacionales. Estableciendo para ello, una condición de análisis en relación al marco regulatorio energético nacional, dada la idoneidad de los programas educacionales para acogerse a la Ley de *Net Billing* -explicado en Sección 1.3.1 (pág. 30)- y descartando la posibilidad de utilizar bancos de baterías, por el elevado costo que suponen. En base a la condición de análisis definida, se determina la superficie mínima de captación para distintos escenarios de consumo energético y en establecimientos con distinto número de plantas.

3.3.1 Condición de análisis en relación a la Ley 20.571

Como fuera establecido en la Sección 3.1.3 (pág. 62), para el caso de estudio de nivel superior, la instalación horizontal de 158 m² de paneles fotovoltaicos, equivalentes al 52% de la superficie de planta considerada, permiten cubrir el consumo total de 3 plantas de iluminación, electricidad y calefacción; mientras que en el caso de estudio de nivel básico-medio, 42 m² equivalentes al 14%, permiten cubrir el consumo eléctrico total de 3 plantas de iluminación y electricidad. Estos resultados, reflejan un aporte revelador de la energía solar en el consumo energético de los establecimientos educacionales. El potencial descifrado, que demuestra que existen márgenes para cubrir más que el 100% del consumo, invita a explorar los límites del aporte solar que permiten que la facturación anual energética sea cero; considerando la Ley 20.571 de *Net Billing*.

La facturación de energía eléctrica para tarifas BT2 y BT3 -bajo las que normalmente se registran los establecimientos educacionales-, considera cargos diferenciados por energía y potencia, según lo establecido en la Sección 1.3.1 (pág. 30). Un análisis de los registros de facturación disponibles, permite estimar la participación de cada uno de estos cargos, en la facturación final de los establecimientos educacionales. La Tabla 16, más adelante, permite apreciar que todos los establecimientos evaluados se enmarcan en tarifas BT2 y BT3; con una relación diversa de participación de cargo por energía y por potencia según el establecimiento, pero que en promedio puede simplificarse en un 56% y 44% respectivamente. Este porcentaje de cargo por energía es exactamente el mismo que para la tarifa BT1, por lo que puede concluirse que para las tarifas BT2 y BT3, la valorización de venta de energía, es de aproximadamente el 56% de la valorización de compra; considerando de manera simplificada una relación compra-venta de 1 a 2.

Tabla 16. Relación entre cargo por energía y por potencia en Eeduc

Código	Establecimiento	Tipo de tarifa	Cargo por energía	Cargo por potencia
			%	%
E02	Escuela Rene Louvel Bert	BT3 PP	41%	59%
C04	Colegio Gran Bretaña	BT2 PPP	83%	17%
C05	Colegio España	BT3 PPP	62%	38%
L02	Liceo Andalién - Medidor 01	BT3 PPP	59%	41%
L02	Liceo Andalién - Medidor 02	BT2 PPP	52%	48%
Promedio*			56%	44%

* calculado en base a la incidencia de la sumatoria de cada uno de los cargos sobre la sumatoria total

Desde el punto de vista económico, esta relación de valorización de venta a la mitad del precio de compra, puede interpretarse entendiendo que será necesario vender el doble de energía de la que se compra, para que la facturación neta sea cero en la evaluación anual. Esta interpretación permite definir una condición de análisis, simplificada en la siguiente expresión:

$$\text{Saldo de energía} = \text{Energía vendida} / 2 - \text{Energía comprada}$$

Para la expresión definida, cuando la energía eléctrica vendida sea el doble que la comprada, el saldo de energía será igual a cero, lo que se traduce en una facturación neta de energía eléctrica anual, también igual a cero. Cuanto menor sea el saldo de energía, mayor será el monto a abonar por energía eléctrica a la distribuidora y viceversa.

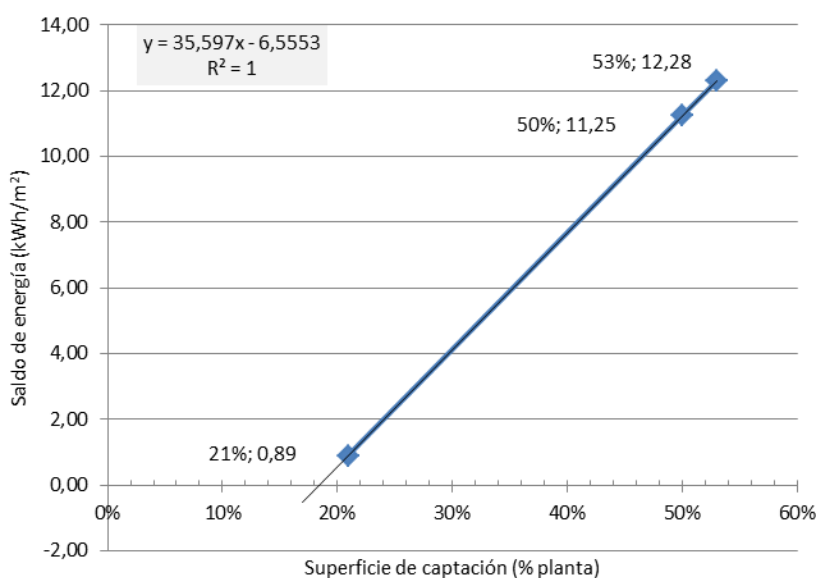
A partir de esta condición de análisis definida, el objetivo de esta sección, es comprobar la capacidad de aporte de energía solar a los requerimientos energéticos de los establecimientos educacionales, considerando paneles fotovoltaicos en posición optimizada anual -acimut norte y 25 grados de inclinación- con mejor desempeño, según lo establecido en la Sección 3.1.3 (pág. 62). Determinando la relación entre la superficie de captación y el consumo de distintos escenarios energéticos, para distinto número de plantas de los niveles formativos básico-medio y superior.

Esta condición tiene un doble beneficio, ya que permite que la facturación anual neta sea nula, pero también establece que los edificios funcionen con energía positiva, vendiendo excedentes energéticos, que pueden ser utilizados para mejorar las condiciones de confort, compartirse localmente con la comunidad, o con otros edificios con mayor consumo en el caso del nivel superior, mediante sistemas inteligentes de distribución de energía eléctrica (*Smart Grid*).

Tabla 17. Procesamiento de datos en análisis de saldo de energía

Superficie de captación % planta	Venta de energía kWh/m ²	Venta de energía / 2 kWh/m ²	Compra de energía kWh/m ²	Saldo de energía kWh/m ²
21	11,10	5,55	-4,66	0,89
50	27,17	13,59	-2,34	11,25
53	28,96	14,48	-2,20	12,28

La Tabla 17 muestra un ejemplo del procesamiento de datos en el análisis de saldo de energía, donde puede observarse que variaciones en la dimensión de la superficie de captación -expresada como porcentaje de la superficie de planta-, producen distintos saldos de energía. Estos resultados, determinados mediante simulaciones para idéntica posición optimizada anual de paneles fotovoltaicos, permiten determinar que existe una relación lineal entre la superficie de captación y el saldo de energía.



Superficie de captación	19%	21%	50%	53%
Saldo de energía	0,53	0,89	11,25	12,28

Gráfico 31. Relación entre superficie de captación y saldo de energía

De la expresión obtenida a partir de la regresión lineal: $y = 35,597x - 6,5553$

$$\text{Cuando } y = 0 \rightarrow x = 6,5553 / 35,597 = 0,184 \rightarrow X = 18,4 \%$$

El Gráfico 31, muestra un ejemplo de la relación lineal existente entre la superficie de captación y el saldo de energía, donde puede verse la ecuación de la curva que define la relación entre ambos

parámetros; con un valor de $R^2=1$, lo que indica alta una precisión en los resultados. Para la relación definida en el ejemplo, puede verse que a partir de la ecuación, puede extrapolarse el porcentaje de ocupación, para el cual el saldo de energía es igual a cero. Determinando que para una de superficie de captación del 18,4%, el saldo de energía será igual a cero y considerando el entero superior inmediato, con un 19% y un saldo de energía igual a 0,53.

3.3.2 Superficie mínima de captación según escenarios de consumo energético

La relación determinada en la sección anterior entre la superficie de captación y el saldo de energía, permite calcular la superficie de captación mínima, que hace que el saldo energético sea cero, para distintos escenarios de consumo energético. Para establecer el aporte de energía solar en el desempeño energético, se consideran para ambos casos de estudio, tres escenarios con distintos requerimientos energéticos y variaciones en el número de plantas, a los efectos de poder determinar el alcance del aporte de energía solar, en relación al tamaño del edificio. Estableciendo para los escenarios, mejoras que puedan presentar incidencias significativas en el consumo de energía eléctrica de los establecimientos educacionales.

Si bien una estrategia podría considerar la sustitución de los artefactos de iluminación -tubos fluorescentes T5, en ambos casos de estudio- por otros de mayor eficiencia, como los de tecnología LED, investigaciones realizadas (Sanchez y Sweeney 2010), sugieren que las diferencias entre ambas tecnologías no son relevantes. Por este motivo se consideran para las simulaciones, las luminarias existentes, incorporando como medida de eficiencia energética, controles de luminiscencia. Para la calefacción, se considera en ambos casos el equipo existente en el caso de estudio de nivel superior, de bomba de calor -*Split York Stellar 2000 - System Heat Pumps*-, que presenta un *Coefficient of Performance* [COP] de 1.81. En base a estas consideraciones, se definen los siguientes escenarios de consumo energético:

Escenario A - Iluminación, electricidad y calefacción (Caso base)

Escenario B - Iluminación con control de luminiscencia, electricidad y calefacción

Escenario C - Iluminación con control de luminiscencia y electricidad

Se considera el escenario A como caso base, entendiéndose que de existir soluciones que contemplen este escenario que presenta los consumos más altos, existirán soluciones para los escenarios restantes, cuyos consumos serán menores.

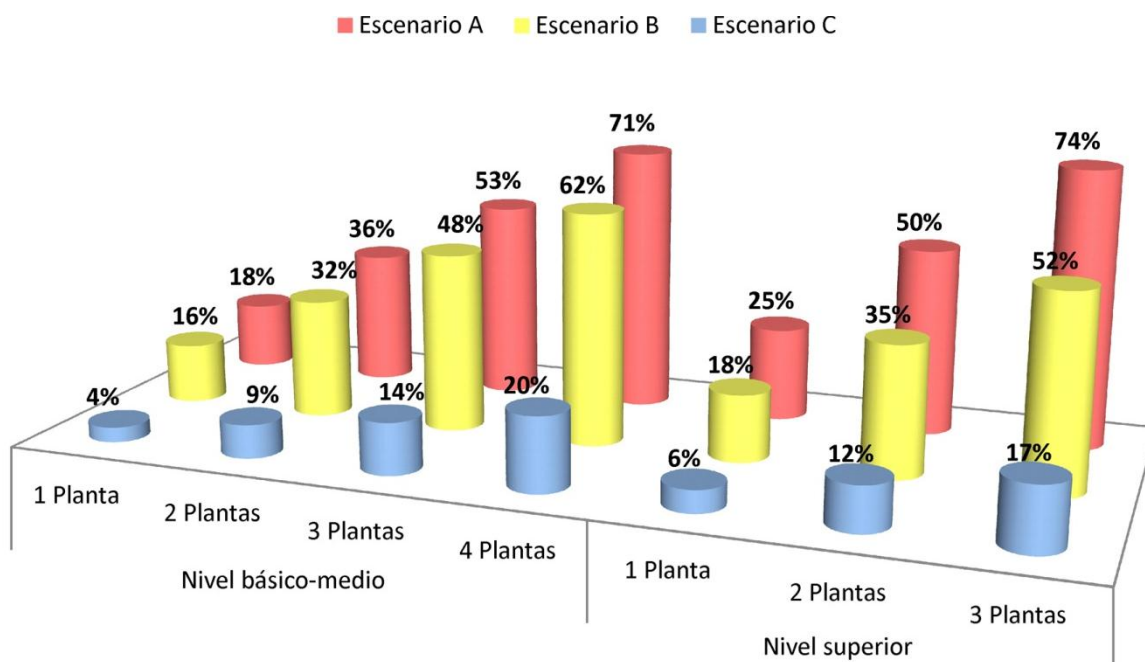


Gráfico 32. Superficie mínima de captación para saldo de energía nulo

El Gráfico 32 muestra los resultados de las simulaciones realizadas, donde puede apreciarse la superficie mínima de captación -expresada como porcentaje de la superficie de planta-, necesaria para que el saldo de energía sea igual a cero, para los tres escenarios considerados y distinto número de plantas, en ambos casos de estudio. Los resultados demuestran que, una superficie de captación en posición optimizada, equivalente al 71% de la superficie de planta, permite que el saldo de energía sea igual a cero en un edificio de 4 plantas en nivel básico-medio, generando remanentes además de cubrir el consumo total de iluminación, electricidad y calefacción; mientras que en el caso de nivel superior, una superficie del 74% de la superficie de planta, cumple con las mismas condiciones, para un edificio de 3 plantas. Comprobando el enorme potencial de aporte de energía solar, en el desempeño energético de los establecimientos educacionales. Para la completa interpretación, estos resultados deben confrontarse con los límites geométricos de incorporación de sistemas fotovoltaicos en posición optimizada en cubierta, explorados en la Sección 3.4.2 (pág. 86), de este documento.

Tabla 18. Incremento promedio de superficie de captación para aumentar una planta

Caso de estudio	Escenario A	Escenario B	Escenario C
Nivel básico-medio	18%	15%	5%
Nivel superior	25%	17%	6%

Los resultados obtenidos, permiten además estimar el incremento promedio de superficie de captación con sistemas fotovoltaicos, necesario para aumentar una planta en un establecimiento educacional, calculado para los distintos escenarios establecidos y en ambos casos de estudio, como puede verse en la Tabla 18, más atrás.

Tabla 19. Información energética según caso de estudio, escenario y número de plantas

Nivel	Escenario	Plantas	Superficie de captación		Consumo cubierto	Energía vendida	Energía comprada	Excedente energía	Saldo energía
			nº	% planta					
Básico medio	A	1	18%	55	163%	10.440	4.978	5.462	242
		2	36%	110	163%	20.795	9.971	10.824	426
		3	53%	162	159%	30.455	15.064	15.390	163
		4	71%	217	160%	40.787	20.065	20.722	329
	B	1	16%	49	162%	9.185	4.405	4.781	188
		2	32%	98	162%	18.330	88.18	9.512	347
		3	48%	147	162%	27.527	13.227	14.300	537
		4	62%	190	159%	35.955	17.809	18.146	169
	C	1	4%	12	173%	3.078	1.510	1.568	29
		2	9%	28	172%	6.067	2.973	3.095	61
		3	14%	43	171%	9.023	4.472	4.551	39
		4	20%	61	183%	12.919	5.814	7.105	646
Superior	A	1	25%	77	158%	13.979	6.786	7.193	203
		2	50%	153	158%	27.890	13.589	14.301	356
		3	74%	226	156%	41.093	20.476	20.617	70
	B	1	18%	55	176%	11.373	5.320	6.053	366
		2	35%	107	170%	21.967	10.694	11.274	290
		3	52%	159	167%	32.295	16.087	16.209	61
	C	1	6%	18	184%	3.983	1.832	2.152	160
		2	12%	37	184%	7.959	3.664	4.294	315
		3	17%	52	173%	11.153	5.538	5.615	39

La Tabla 19 muestra la información energética completa para ambos casos de estudio, en distintos escenarios y número de plantas. En términos generales, puede apreciarse que el consumo cubierto es similar en todos los casos; pudiendo estimar que un promedio general del 167%, permite establecer un saldo de energía tendiente a cero. Para todos los casos la energía vendida es aproximadamente el doble de la comprada, resultando en un saldo de energía siempre positivo y tendiente a cero, que se traduce en una facturación neta anual también tendiente a cero. Pero asegurando además, por la condición de saldo de energía establecida, que en todos los casos existirán importantes excedentes energéticos -que se incrementan proporcionalmente al aumentar el número de plantas-, producto de las mayores superficies de captación que son necesarias para que el saldo de energía se iguale a cero.

3.4 Estrategias de incorporación de sistemas fotovoltaicos

Los aportes de energía solar en el desempeño energético de los establecimientos educacionales determinados en la sección anterior, se complementan con estrategias de incorporación de sistemas fotovoltaicos en cubierta. Analizando en base a consideraciones geométricas de ocupación y distanciamiento necesario -para garantizar el correcto funcionamiento de las tecnologías-, los límites geométricos para incorporar sistemas FV, en posición optimizada anual y en otras posiciones, cuando ésta no pueda ser considerada.

3.4.1 Distancia mínima entre filas de captación

A partir de la posición optimizada anual de paneles fotovoltaicos -acimut norte y 25 grados de inclinación- determinada para establecimientos educacionales, se exploran en primer lugar los límites de ocupación de cubierta desde el punto de vista geométrico, para edificios con orientación predominante este-oeste, considerando las condiciones del caso de estudio.

Al considerar la orientación predominante del edificio, se debe conocer la distancia mínima entre filas de captación para evitar que disminuya el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos por efecto de sombreado. La distancia entre líneas de captación, se calcula considerando la elevación solar mínima, que ocurre en invierno cuando la proyección de sombra será más larga (CDT y CChC 2014). Para conocer la altura solar mínima se utiliza la expresión:

$$H = (90^\circ - |\phi|) - 23.5^\circ$$

$$H = (90^\circ - |36.8^\circ|) - 23.5^\circ = 29.7^\circ$$

Siendo H la altura solar en grados y ϕ la latitud de la localidad. Para Concepción, ubicado en la latitud 36.5° , se tendrá una altura solar mínima de $29,7^\circ$. A partir de este valor, puede determinarse la distancia mínima entre filas de captación, según la expresión (CDT y CChC 2014):

$$d_{\min} = L \left(\cos \beta + \frac{\sin \beta}{\tan H} \right)$$

Donde L es la longitud total del módulo (incluido el marco y la estructura de soporte), H es la elevación solar mínima y β es la inclinación del módulo; como puede verse en el esquema de la Figura 23, a continuación.

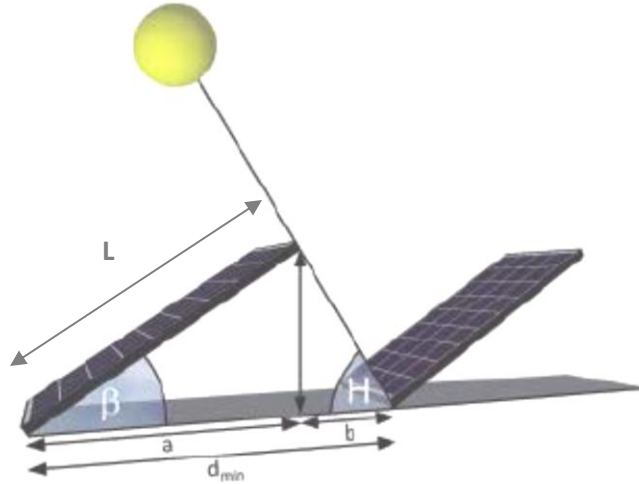


Figura 23. Distancia mínima entre filas de captación. CDT y CCHC

En el caso de Concepción y para la inclinación considerada de paneles fotovoltaicos de 25 grados, la distancia mínima entre líneas de captación, queda definida como:

$$d_{\min} = L \left(\cos 25 + \frac{\sin 25}{\tan 29,7} \right) = L \times 1,65$$

Teniendo en cuenta el diseño de cubierta necesario para integrar los sistemas fotovoltaicos en posición optimizada y siendo el ángulo de inclinación de 25°, prácticamente igual al ángulo de altura solar mínima de 29,7°, se considera por simplificación que la resolución para bloques con orientación este-oeste, se realice considerando triángulos isósceles, con ángulos iguales de 25 grados. Esta simplificación, ofrece un margen de seguridad sobre la distancia mínima necesaria para evitar sombreadamiento, para orientaciones con leves variaciones respecto al acimut norte; a la vez que simplifica la resolución por aspectos constructivos que podrían tenerse en cuenta para la ejecución de la forma de cubierta deseada. Teniendo en cuenta dicha simplificación, la nueva expresión de distanciamiento mínimo queda definida como:

$$d_{\min} = L \left(\cos 25 + \frac{\sin 25}{\tan 25} \right) = L \times 1,81$$

Determinando que para la ciudad de Concepción, la distancia mínima entre planos de captación, será equivalente a 1.81 veces, la distancia considerada de ala norte de la cubierta.

3.4.2 Límites geométricos para sistemas en posición optimizada

Esta sección investiga los límites geométricos de incorporación en cubierta, de sistemas fotovoltaicos en posición optimizada anual, con acimut norte y 25 grados de inclinación. Integrando las características descifradas en la caracterización formal, al análisis de bloques de establecimientos educacionales con orientaciones norte-sur y este-oeste.

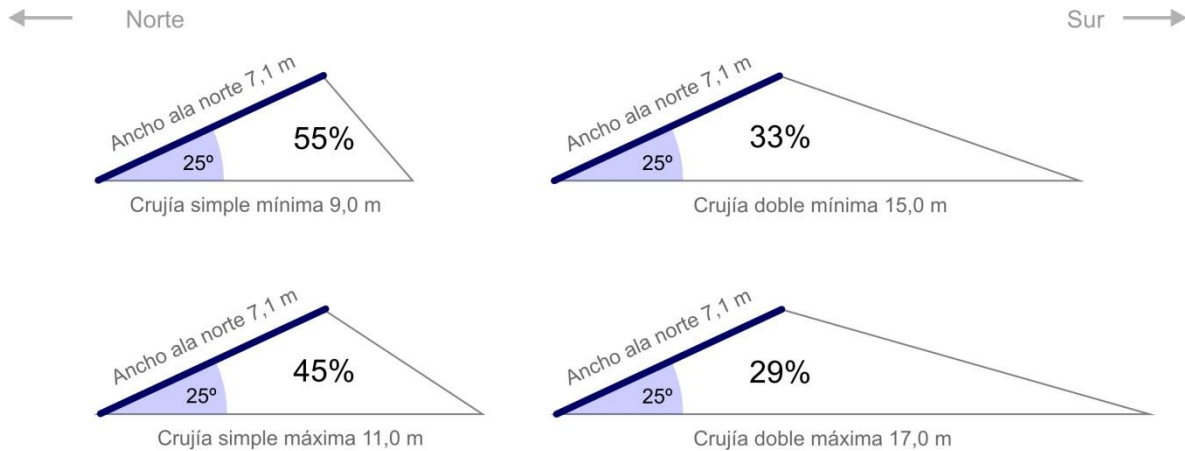


Figura 24. Ocupación máxima de cubierta en sección transversal de bloque norte-sur

La Figura 24, muestra la sección transversal de cubierta de un bloque con orientación norte-sur, con el ala norte con una inclinación óptima de 25 grados, para distintos anchos de crujía representativos, de 9-11 metros para crujías simples y 15-17 metros para dobles; según condiciones formales determinadas (Sección 2.2.1, pág. 37). Estableciendo en todos los casos, una restricción de altura de cubierta de 3 metros -para evitar incrementos excesivos de espacios normalmente no habitables-; que permite definir el ancho del ala norte de 7,1 metros. Considerando que la superficie de captación sea semejante a la superficie del ala norte, puede establecerse que existe una relación proporcional entre los pares de lados de ambas superficies, que mediante cálculos realizados, se determina que queda definido por las expresiones:

$$\text{ancho de captación} = \sqrt{\% \text{ de ocupación} \times \text{ancho de ala norte}^2}$$

$$\text{largo de captación} = \sqrt{\% \text{ de ocupación} \times \text{largo de ala norte}^2}$$

En base a ello y considerando una superficie de captación semejante y equivalente al 70% de la superficie del ala norte -por restricciones de operación y servicio-, en la Figura 24, se tendrá:

$$\text{ancho de captación} = \sqrt{0,7 \times 7,1 \text{ m}^2} = 5,9 \text{ m}$$

Determinando el porcentaje del ancho de captación con respecto al del ala norte, como:

$$5,9 \text{ m} / 7,1 \text{ m} = 84 \%$$

Esto significa que, definir la superficie de captación como el 70% de la superficie del ala norte, equivale a considerar una superficie del 84% de cada uno de sus lados. Lo que permite determinar el porcentaje de máximo de ocupación de cubierta por sistemas fotovoltaicos -expresado como porcentaje de la planta-, en función de la expresión:

$$\text{Ocupación máxima FV (\% planta)} = \frac{\sqrt{\% \text{ de ocupación} \times \text{ancho de ala norte}^2}}{\text{ancho de crujía}} \times 0.84$$

Esta relación definida, permite expresar la ocupación máxima de cubierta, con sólo conocer el ancho del ala norte y de crujía. Además, el valor determinado de ocupación de cubierta, no sufrirá modificaciones al considerar el largo de bloque, dado que al multiplicar el ancho de captación y de crujía por el mismo largo, la relación se mantendrá constante.

Tabla 20. Ocupación máxima de cubierta para distintos anchos de crujía en bloque norte-sur

Ancho de crujía	Ancho de captación	Ocupación de cubierta
m	m	% planta
9,0	5,9	55
11,0	5,9	45
15,0	5,9	33
17,0	5,9	29

La Tabla 20, muestra los porcentajes de ocupación de cubierta, calculados para los distintos anchos de crujía característicos considerados. Donde puede advertirse que, cuanto menor sea el ancho de crujía, mayor será el porcentaje de ocupación de cubierta. Mientras que una crujía simple de 9 metros, admitirá como máximo una ocupación de cubierta del 55% de la planta, una crujía doble de 17 metros, sólo admitirá un 29% como máximo. Además, mayores anchos de crujía, implican mayores superficies de planta y en consecuencia mayores requerimientos energéticos; que deberán satisfacerse con la misma superficie de captación -definida por el ancho del ala norte constante-. Demostrando mejores desempeños, cuanto menor sea el ancho de crujía.

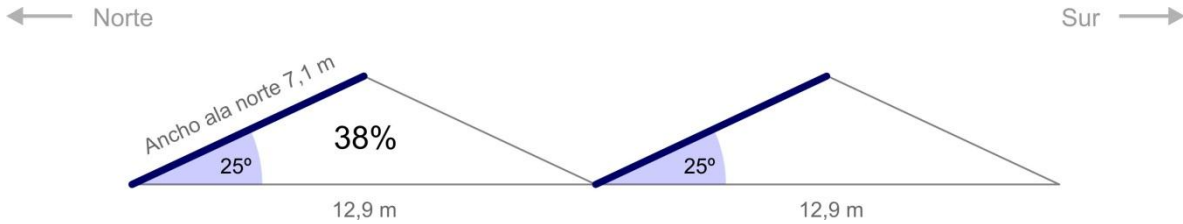


Figura 25. Ocupación máxima de cubierta en sección longitudinal de bloque este-oeste

Al considerar la ocupación de cubierta por paneles fotovoltaicos en posición optimizada, en una sección longitudinal de un bloque con orientación este-oeste (Figura 25), se consideran las mismas restricciones de altura, definiendo el ancho del ala norte también en 7,1 m; pero considerando además, el distanciamiento mínimo necesario entre filas de captación, para evitar disminuciones de rendimiento de los sistemas fotovoltaicos por efecto de sombreamiento. Definido según la expresión determinada en la sección anterior, como:

$$d_{\min} = L \times 1,81$$

$$d_{\min} = 7,1 \text{ m} \times 1,81 = 12,9 \text{ m}$$

Lo que permite determinar el porcentaje de ocupación máxima de cubierta, para bloques con orientación este-oeste, a partir de la expresión:

$$5,9 \text{ m} / 12,9 \text{ m} \times 0,84 = 38\%$$

En este caso, para cualquier ancho de crujía, la relación entre superficie de captación y superficie de planta, será constante e igual al 38%, como máximo. Quedando establecida una relación de proporcionalidad entre la generación de energía (superficie de captación) y los requerimientos energéticos (superficie de planta), que hacen irrelevante el valor que adquiera el ancho de crujía.

Los resultados obtenidos, permiten reconocer características geométricas de cubierta para la incorporación de sistemas fotovoltaicos en posición optimizada; definiendo límites a considerar para la evaluación de distintos escenarios de consumo energético y con distinto número de niveles, determinados en la Sección 3.3.2 (pág. 81). En ambas secciones, los resultados de ocupación de cubierta, se expresan como porcentaje de la planta, en primer lugar para considerar un parámetro de referencia fijo -a diferencia de las superficies de cubierta que varían según la forma-; pero además, para establecer una única unidad que permita comparar los resultados.

Tabla 21. Resumen de superficie mínima de captación según escenario y límites geométricos

Superficie de captación FV (% planta)			
Código	Nivel Básico-medio	Nivel Superior	Código
		74	A3
A4	71		
B4	62		
Orientación N-S - Crujía 9 m		55	
A3	53		
		52	B3
		50	A2
B3	48		
Orientación N-S - Crujía 11 m		45	
Orientación Este-Oeste		38	
A2	36		
		35	B2
Orientación N-S - Crujía 15 m		33	
B2	32		
Orientación N-S - Crujía 17 m		29	
		25	A1
C4	20		
A1	18	18	B1
		17	C3
B1	16		
C3	14		
		12	C2
C2	9		
		6	C1
C1	4		

La Tabla 21, muestra un resumen de las superficies mínimas de captación necesarias según escenarios de consumo energético -en colores- y límites geométricos de incorporación en cubierta de sistemas FV -cortes en negro-; que permite cruzar la información obtenida en ambas secciones. Los códigos, ubicados a la izquierda del nivel básico-medio y a la derecha del nivel superior, representan el escenario de consumo y número de plantas, de acuerdo a lo establecido en la sección 3.3.2, pág. 81. Para considerar, por ejemplo, un establecimiento de nivel básico-medio, en escenario A y de 3 plantas -que requiere una superficie de captación de FV del 53% de la planta-, sólo la orientación norte-sur con un ancho de crujía de 9 m -en la cual se puede ocupar hasta un 55% de la planta-, constituirá una solución válida; dado que las demás configuraciones presentan porcentajes máximos de ocupación, menores al requerido. Esto permite comprobar, que para los escenarios con requerimientos de ocupación superior al 55% de la planta, aunque el potencial solar sea suficiente para cubrir los requisitos energéticos, no existe solución geométrica que permita alojar la superficie necesaria de paneles en posición optimizada; pudiendo optar por soluciones donde la posición no sea óptima, o asumir que el saldo de energía será negativo.

3.4.3 Límites geométricos para sistemas en otras posiciones

Se analizan los límites geométricos de incorporación de sistemas fotovoltaicos en cubierta, para situaciones en las que, por distintas razones, no se pueda considerar la posición optimizada anual. Considerando las variaciones de radiación solar y geometría de las alas de captación, para distintas inclinaciones de cubierta, en bloques con orientación predominante norte-sur y este-oeste.

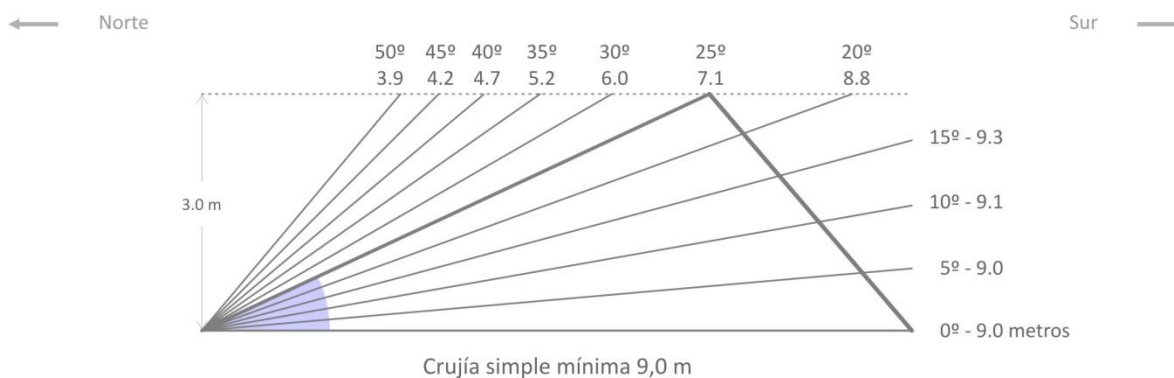


Figura 26. Variación de ala norte en sección transversal de bloque norte-sur

La sección transversal de un bloque norte-sur (Figura 26) muestra que, considerando una altura máxima de cubierta de 3 m, los largos del ala de captación norte, disminuyen progresivamente para inclinaciones mayores a la optimizada de 25 grados y aumentan para inclinaciones menores. Conocidos los valores de ancho de ala norte, se calculan los valores de ancho de captación, asumiendo una ocupación de sistemas fotovoltaicos del 70% del ala norte -por restricciones de operación y servicio-, y considerando la siguiente expresión, determinada en la sección anterior:

$$\text{ancho de captación} = \sqrt{\text{porcentaje de ocupación} \times \text{ancho de ala norte}^2}$$

Esta expresión, permite determinar el ancho de captación disponible en cada caso, para las distintas inclinaciones de cubierta consideradas y las restricciones de diseño establecidas.

Tabla 22. Radiación y ancho de captación según inclinación en bloque norte-sur

Inclinación	º	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Radiación	kWh/m ² -año	1533	1578	1614	1640	1657	1665	1663	1652	1631	1600	1561
Radiación	%	-8%	-5%	-3%	-2%	0%	0%	0%	-1%	-2%	-4%	-6%
Ancho necesario	m	6,4	6,2	6,1	6,0	5,9	5,9	5,9	5,9	6,0	6,1	6,3
Ancho disponible	m	7,5	7,6	7,6	7,8	7,3	5,9	5,0	4,4	3,9	3,5	3,3
Prioridad	Nº	6	5	4	3	2	1	7	8	9	10	11

La Tabla 22, más atrás, permite apreciar que los valores de radiación solar -según antecedentes (Figura 5, pág.24)-, presentan un comportamiento prácticamente simétrico con respecto a la inclinación de 25 grados. Tomando como base el ancho de captación para la radiación máxima, se calculan para todas las inclinaciones, los anchos necesarios de captación, que permitirían producir la misma generación de energía eléctrica, compensando las disminuciones de radiación solar. Estos anchos necesarios de captación, se comparan con el ancho geométrico disponible, según distintas inclinaciones, para establecer un orden de prioridad de acuerdo a los resultados. Mientras que los valores a la izquierda de la inclinación óptima, presentan anchos disponibles mayores que los necesarios, los de la derecha, presentan anchos disponibles insuficientes. Esto demuestra que, a pesar de que el comportamiento de la radiación sea cuasi simétrico, indicando que sería indistinto considerar inclinaciones simétricas con respecto a la de 25 grados -20 o 30, 15 o 35, etc.-, la incorporación de los sistemas puede verse limitada por restricciones geométricas, de acuerdo a la inclinación considerada. Estableciendo en función de ello, un orden de prioridad -que también aplica para otros anchos de crujía-, que puede utilizarse cuando no pueda considerarse la inclinación óptima de 25 grados de inclinación.

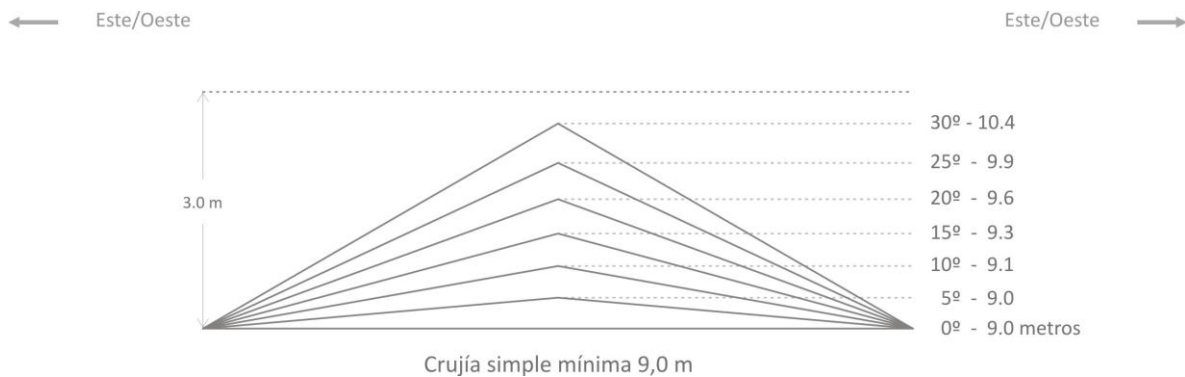


Figura 27. Variación de alas de cubierta en sección transversal de bloque este-oeste

Para bloques con orientación este-oeste, en los que se consideren diseños con cubiertas a dos aguas, la Figura 27 permite apreciar que la superficie de captación aumenta progresivamente con la inclinación, ya que en este caso, ambas alas pueden ser consideradas para captación. En este caso se consideran inclinaciones de hasta 30 grados, dado que inclinaciones mayores resultan en alturas de cubierta mayores a la establecida, según restricciones de diseño. Procediendo de la misma manera que en el ejemplo anterior, a partir del ancho total de ambas alas, se calculan los anchos disponibles, considerando una ocupación de alas del 70% por sistemas fotovoltaicos.

Tabla 23. Radiación y ancho de captación según inclinación en bloque este-oeste

Inclinación	º	0	5	10	15	20	25	30
Radiación*	kWh/m ² -año	1533	1531	1519	1503	1480	1453	1422
Radiación	%	0%	0%	-1%	-2%	-3%	-5%	-7%
Ancho necesario	m	7,5	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8,1
Ancho disponible	m	7,5	7,6	7,7	7,8	8,0	8,3	8,7
Prioridad	Nº	1	2	3	4	5	6	7

* Por simplificación se considera el promedio de radiación solar de orientación este y oeste

En este caso, la Tabla 23 muestra que los valores de radiación solar, disminuyen progresivamente desde la posición horizontal. Al igual que en el ejemplo anterior, para cada inclinación, se calcula a partir de la posición óptima -en este caso horizontal-, el ancho necesario que permitiría producir la misma generación, compensando las disminuciones de radiación. Puede comprobarse que los anchos disponibles son en todos los casos, iguales o mayores que los necesarios. Estableciendo un orden de prioridad -que también aplica para otros anchos de crujía-, que queda dispuesto en relación a la disminución de radiación solar.

Como puede verse en ambos ejemplos, las condiciones geométricas de diseño de cubierta pueden presentar restricciones para la incorporación de los sistemas fotovoltaicos. Es importante tener en cuenta que los resultados expuestos, son enunciados para igualar la generación eléctrica, considerando la máxima ocupación en posición optimizada. En otras situaciones, en las que esta condición no deba ser considerada, en el caso de bloques con orientación norte-sur, podrían seleccionarse indistintamente las inclinaciones simétricas con respecto a la inclinación optimizada -20 o 30, 15 o 35, etc.-, por ejemplo. Asimismo, debe tenerse en cuenta que los resultados pueden variar, si son consideradas otras condiciones de diseño -por ejemplo alturas de cubierta distintas a la seleccionada-; pero mediante los ejemplos enunciados, se establece una metodología que permite establecer el orden de prioridad, en cualquier otro caso que presente condiciones distintas a las enunciadas.

**Definición paramétrica de optimización solar activa
en establecimientos educacionales**

La información obtenida a partir de la caracterización formal y energética, realizada en el Capítulo 2 y los resultados de factibilidad de incorporación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos educacionales desarrollados en el Capítulo 3, conforman una base de datos utilizada como insumo para el desarrollo de este capítulo. Vinculando toda la información, en una definición paramétrica abierta de exploración formal, que puede asistir decisiones tempranas de diseño de nuevos establecimientos educacionales, evaluando la capacidad solar activa de cubierta y sugiriendo formas con mejor desempeño.

4.1 Reglas paramétricas formales

La definición paramétrica desarrollada en este capítulo, incluye la definición de reglas paramétricas que permiten configurar la volumetría de los establecimientos educacionales. Incorporando un patrón de crecimiento, que define la configuración espacial del establecimiento y reglas formales de definición de cubierta, considerando la posición optimizada anual para la incorporación de sistemas fotovoltaicos.

4.1.1 Patrón de crecimiento para configuración espacial

La configuración espacial de los establecimientos educacionales, se define en base a un patrón de crecimiento, que incorpora como antecedente los resultados de la Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educacionales [GEEEduc] (ACHEE 2014). En ella, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar la incidencia de distintos parámetros -agrupamiento, orientación, infiltración, superficie vidriada, tipos de vidrio y envolvente- en la demanda energética de los establecimientos educacionales; analizando un aula tipo para distintas ciudades representativas de las zonas climáticas del país.

El análisis realizado por la GEEEduc para la ciudad de Concepción, establece que la orientación es el segundo parámetro en influencia en las demandas energéticas de los establecimientos educacionales; luego de las infiltraciones. Particularmente, para bloques mono-orientados, la orientación norte presenta las menores demandas energéticas [10,5 kWh/m²-año aprox.], seguidas por las orientaciones oriente [15,0 kWh/m²-año aprox.] y poniente [16,0 kWh/m²-año aprox.], de registros muy similares, siendo la orientación sur [20,0 kWh/m²-año aprox.] la que presenta mayores demandas energéticas; como puede en la Figura 28, a continuación.

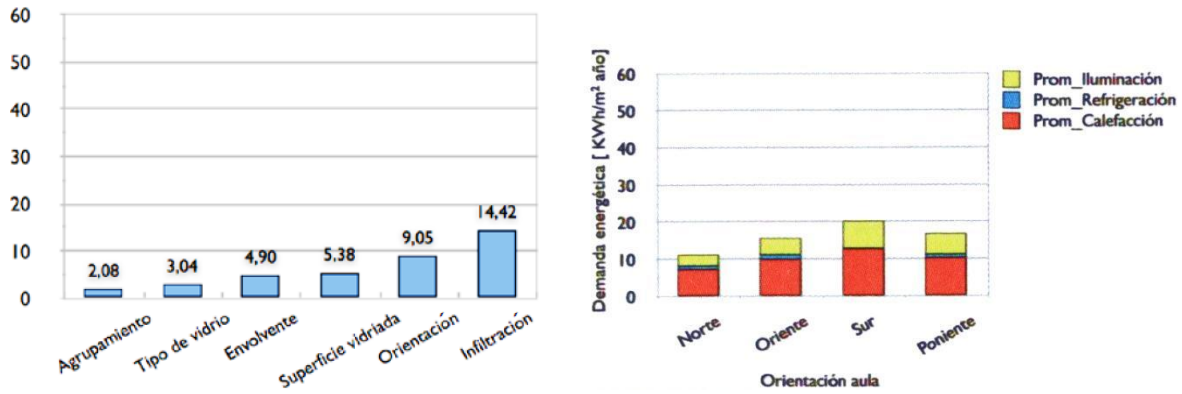


Figura 28. Incidencia de parámetros y demanda por orientación en Eeduc en Concepción. GEEeduc

Este perfil de demanda queda asociado a la disponibilidad de energía solar en cada orientación; mientras que en la fachada norte la mayor disponibilidad solar disminuye los requerimientos energéticos de iluminación y calefacción, en la fachada sur ocurre exactamente lo contrario. Considerando que la implementación de tecnologías solares activas, debe reconocer e incorporar la disponibilidad de energía solar según la orientación, se define que un patrón de crecimiento automático, que siga la misma tendencia que la orientación según demanda energética.

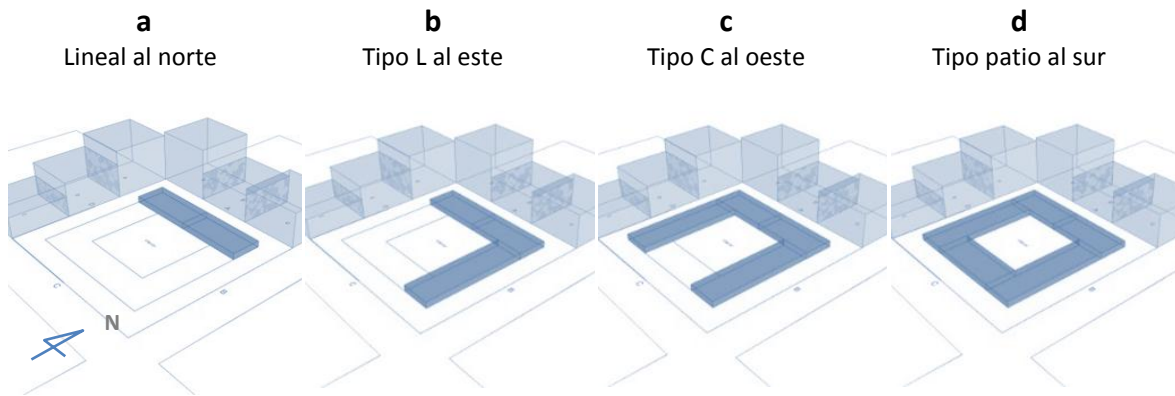


Figura 29. Patrón de crecimiento y configuración espacial en definición paramétrica

Como puede verse en la Figura 29, el patrón de crecimiento queda definido considerando en primera instancia una configuración lineal orientada al norte (ref. a), seguido de un crecimiento en L orientado al este (ref. b), un crecimiento en C con orientación al oeste (ref. c), para terminar con una configuración tipo patio, orientada al sur (ref. d); donde los requerimientos energéticos son mayores. La configuración espacial, considera las condiciones del entorno construido, pudiendo

definir en base a parámetros de radiación solar, la distancia de deslinde necesaria, para evitar pérdidas por sombreado del contexto.

El patrón de crecimiento definido, considera los casos identificados en la caracterización formal (sección 2.2.1, pág. 37), donde todos los ejemplos analizados podían de manera simplificada, asimilarse a los cuatro tipos de configuración espacial definidos; siendo las más repetidas, la configuración tipo C y la tipo patio.

El en caso de bloques de doble crujía que presentan dos orientaciones predominantes, la información aportada por la GEEEduc, permite deducir que los requerimientos energéticos para un bloque con orientación norte-sur, son prácticamente iguales a los de un bloque con orientación oriente-poniente; entorno a los 31 kWh/m²-año. Dado que la información de demanda energética es igual para ambos casos, no es posible definir un patrón de crecimiento efectivo en función de este parámetro; por lo que de manera simplificada, se considera que los bloques de doble crujía, tengan el mismo patrón de crecimiento que los bloques de crujía simple.

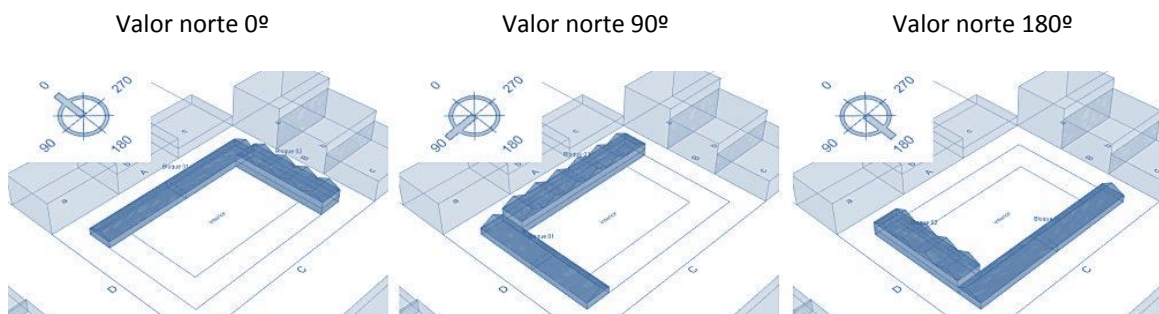


Figura 30. Reordenamiento de configuración espacial en función del ángulo norte

Como puede verse en la Figura 30, la definición paramétrica realizada, permite también que la configuración espacial del establecimiento educacional, se reordene en función del valor del ángulo norte; parámetro editable dentro de la programación. Al cambiar este valor, el patrón de crecimiento se reordena automáticamente, haciendo que el primer bloque quede siempre orientado al norte, el segundo al este, el tercero al oeste y el cuarto al sur; reconfigurando a su vez el diseño de cubierta, para que las alas de captación siempre queden orientadas al norte.

4.1.2 Variación formal de cubierta

Las reglas de definición paramétrica establecidas para la variación formal de cubierta, contemplan la incorporación de sistemas fotovoltaicos para la posición optimizada anual -acimut norte y 25º de inclinación-, determinada mediante las simulaciones realizadas (Sección 3.4.1, pág. 84).

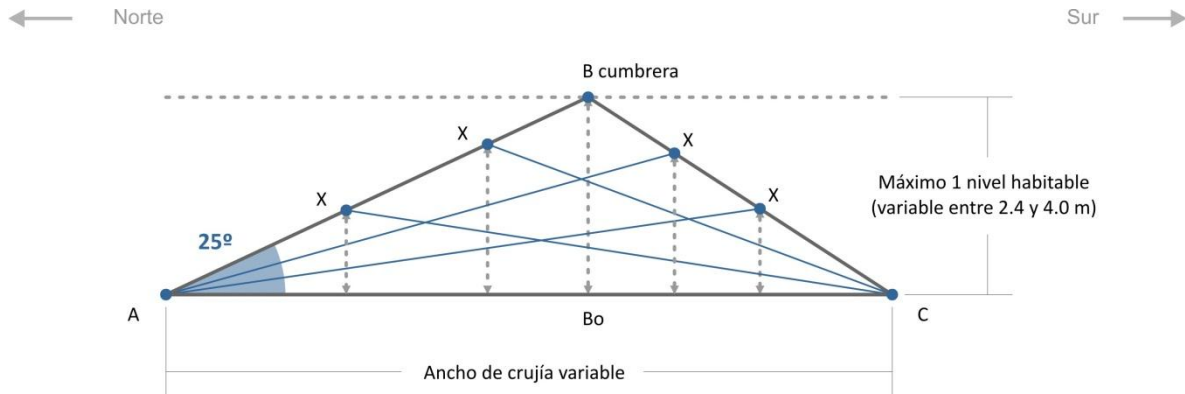


Figura 31. Variación formal de cubierta en sección transversal de bloque norte-sur

La Figura 31 muestra un esquema de las reglas paramétricas consideradas para la variación formal de cubierta, en bloques con orientación predominante norte-sur. Se define como altura de cubierta, la distancia desde la cumbre [B] hasta su proyección vertical a la base [Bo]; estableciendo como limitante de diseño que dicha altura paramétrica, sea como máximo igual a un nivel habitable -2,4 a 4,0 metros-, con el objetivo de evitar alturas de cubierta excesivamente altas, que generan un incremento de espacios que normalmente no son habitables.

La regla paramétrica básica considera que el ala norte de la cubierta, quede orientada según el ángulo optimizado $\hat{B}AC$ con una inclinación de 25 grados. Se define que la cumbre sea un punto variable X, cuyo lugar geométrico es el segmento $|ABC|$. Cuando el punto X coincide con el punto A o C, la solución de cubierta será un plano horizontal. Cuando el punto X coincide con el punto B, la solución de cubierta será óptima, dado que se tendrá la máxima superficie posible, con la máxima radiación solar anual. Además, se define como regla paramétrica adicional la variación de la altura de cubierta y en consecuencia el valor del ángulo $\hat{X}AC$. Aunque estas variaciones no optimizarán el resultado energético, la exploración de opciones formales de cubierta para distintas configuraciones, pueden constituir soluciones que consideren otros aspectos.

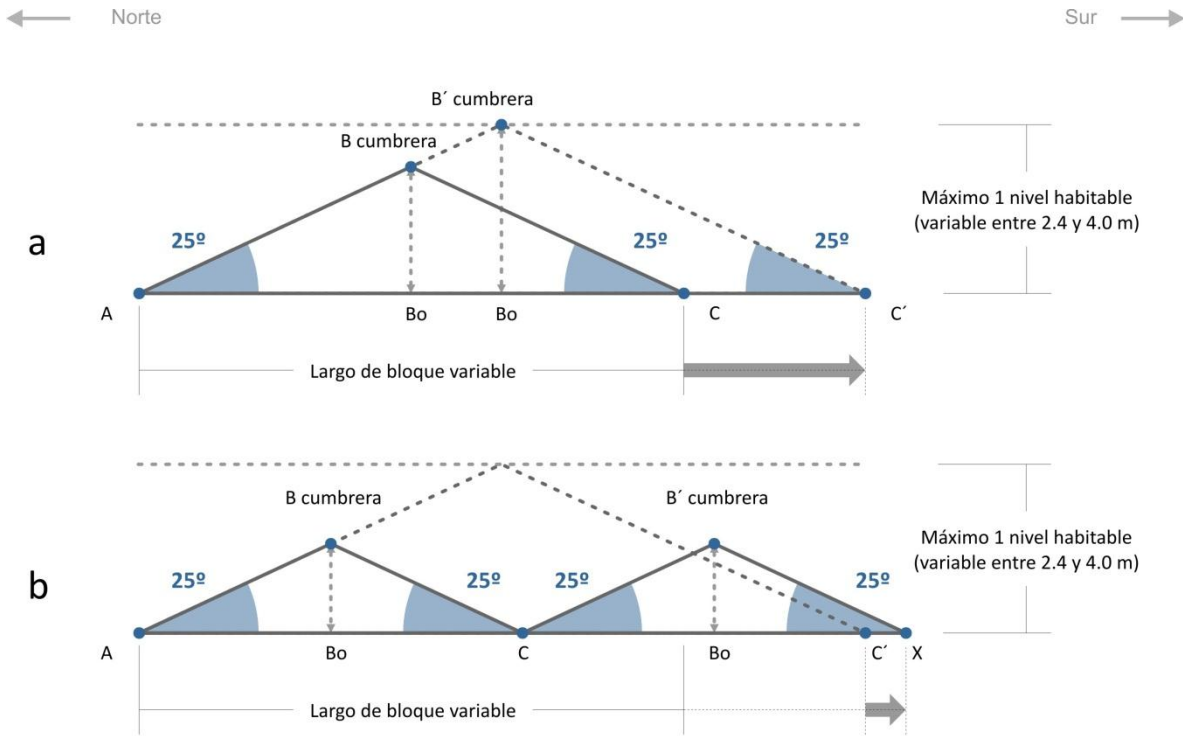


Figura 32. Variación formal de cubierta en sección longitudinal de bloque este-oeste

Para el caso de bloques con orientación predominante este-oeste, la Figura 32 muestra en una sección longitudinal, las reglas paramétricas consideradas. Considerando las mismas restricciones de altura de cubierta que en el caso anterior y el ángulo optimizado \widehat{BAC} de 25 grados, para maximizar el desempeño de los sistemas fotovoltaicos. En este caso, al variar el largo del bloque $|AC|$, el triángulo ABC se escala formando un triángulo semejante, hasta alcanzar el límite de altura igual a un nivel habitable en B'; donde la cubierta queda definida por el triángulo semejante $AB'C'$ (Figura 32, ref. a). Cuando el largo de la crujía sigue aumentando más allá de C', por ejemplo hasta X -como puede verse en la Figura 32, ref. b-, la distancia de la base $|AX|$ se divide en dos y se forman 2 nuevos triángulos semejantes al original; a partir de los cuales se repite iterativamente, el proceso de escalado y división, a medida que el largo aumenta. En esta definición, se incorporan dos reglas paramétricas adicionales, la posibilidad de variar la cumbre dentro del lugar geométrico definido por el segmento $|ABC|$ y la posibilidad de variar la altura de cubierta, definida por la distancia $|BBo|$. Estas reglas adicionales, permiten realizar exploraciones formales de cubierta, sabiendo que no producirán desempeños óptimos de generación eléctrica. Asimismo, la definición incluye una variante de diseño, que permite explorar el potencial solar activo en cubiertas a dos aguas, orientadas longitudinalmente en bloques con orientación este-oeste.

4.2 Desarrollo de la definición paramétrica: *iGUANA*

Las reglas formales establecidas en la sección anterior, se integran en una definición paramétrica de exploración formal, realizada en el software de diseño paramétrico *Grasshopper* [v.0.9.0076] (Robert Mc Neel & Associates [sin fecha]), que permite simular la volumetría de nuevos establecimientos educacionales, evaluando en tiempo real la radiación solar recibida en cubierta y la generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos, según variaciones de la morfología arquitectónica.

La definición incorpora funciones de optimización paramétrica, realizadas a partir del módulo *Galapagos Evolutionary Solver* (Rutten 2010), incluido en *Grasshopper*, que utiliza soluciones evolutivas y algoritmos genéticos, para evaluar una función objetivo a partir de un parámetro variable. Para los análisis de radiación solar y cálculo de sistemas fotovoltaicos, la definición utiliza *Ladybug* [v.0.0.62] (Sadeghipour 2016), un plugin de código abierto para análisis ambiental, que provee una variedad de información interactiva para la toma de decisiones durante las etapas tempranas de diseño. *Ladybug* utiliza la base de datos de archivos climáticos de *EnergyPlus* (.epw), y valores de radiación solar para cada hora del año, calculados mediante la función *Gendaymtx* de *Radiance* (Ashdown y Ward 2013). La definición también utiliza *Centipede* (Smuts 2012), un plugin de animación de objetos, que permite programar el patrón de crecimiento establecido.

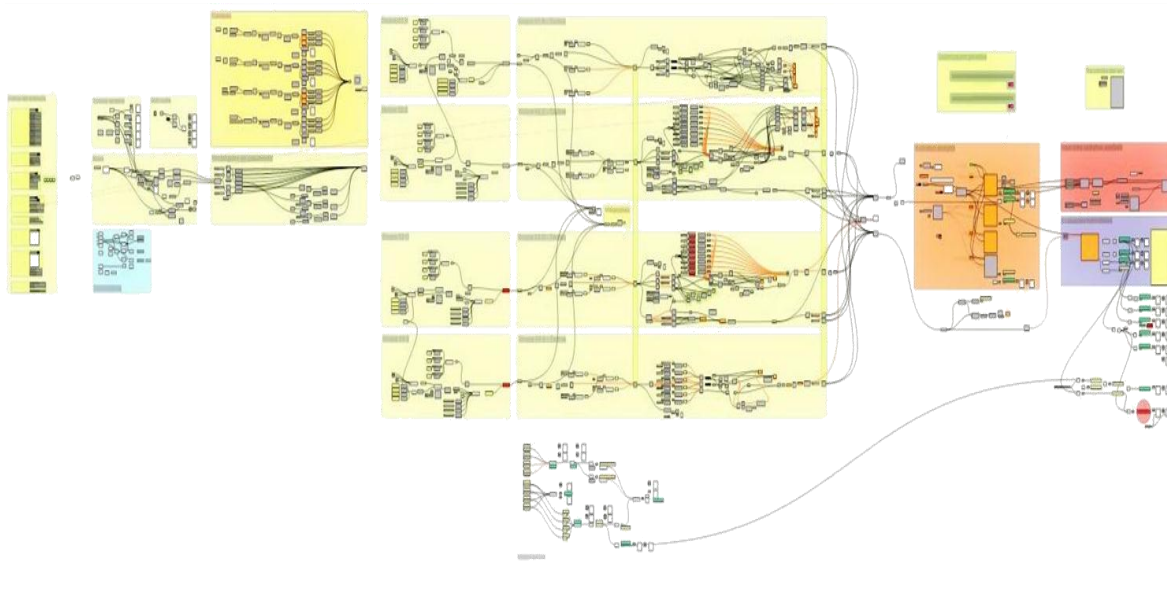


Figura 33. Definición paramétrica de *iGUANA* en *Grasshopper*

La Figura 33, más atrás, muestra la definición paramétrica de *iGUANA*, nombrada así en alusión a la búsqueda del sol y considerando que los plugins de *Grasshopper* suelen denominarse con nombres de animales, conformando lo que se conoce como el zoológico. La definición se realiza en base a un código abierto, que permite que pueda ser fácilmente adaptado, a otras resoluciones en las que se busque alcanzar objetivos similares a los planteados en este trabajo (Morales 2012).

iGUANA puede asistir decisiones tempranas de diseño de nuevos establecimientos educacionales, en relación a su implantación, configuración espacial y optimización formal de cubierta. Estableciendo a partir de la vinculación de información de entrada interactiva, la volumetría del establecimiento y su contexto, basado en el patrón de crecimiento -preestablecido en función de la demanda energética asociada a la orientación-, definido en la sección anterior.

La definición también permite realizar variaciones formales en la cubierta, adaptando el diseño para la integración de paneles fotovoltaicos y calculando interactivamente el total de energía producida y porcentaje cubierto de demanda. El módulo de optimización *Galapagos Evolutionary Solver*, se utiliza en la definición para resolver dos funciones objetivo, relacionadas con el potencial solar. En primer lugar, permite maximizar la superficie de captación en la que la radiación solar anual por metro cuadrado es máxima. Optimizando el desempeño de los sistemas fotovoltaicos, para garantizar la máxima generación posible por unidad de superficie; lo que se traduce en menores superficies de captación y por lo tanto, menores costos de inversión. Por otra parte, también es posible maximizar la generación energética anual; lo cuál puede ser necesario en situaciones particulares donde se priorice la cantidad total de energía, por sobre la generación optimizada que se presenta en el primer caso.

4.2.1 Parámetros de entrada interactivos

Una de las ventajas de las herramientas de diseño paramétrico, es que permiten programar un conjunto de parámetros iniciales y sus relaciones, para obtener como resultado la generación de una determinada volumetría; asociada en este caso al diseño de establecimientos educacionales.

En la Figura 34, más adelante, puede verse el entorno visual y la secuencia de definición paramétrica de *iGUANA*; incluyendo las principales etapas necesarias para definir el diseño del establecimiento educacional y las instancias en las que se utilizan los plugin para análisis de radiación solar, optimización formal de cubierta y generación de energía eléctrica.

Capítulo 4. Definición paramétrica de optimización solar activa en establecimientos educacionales

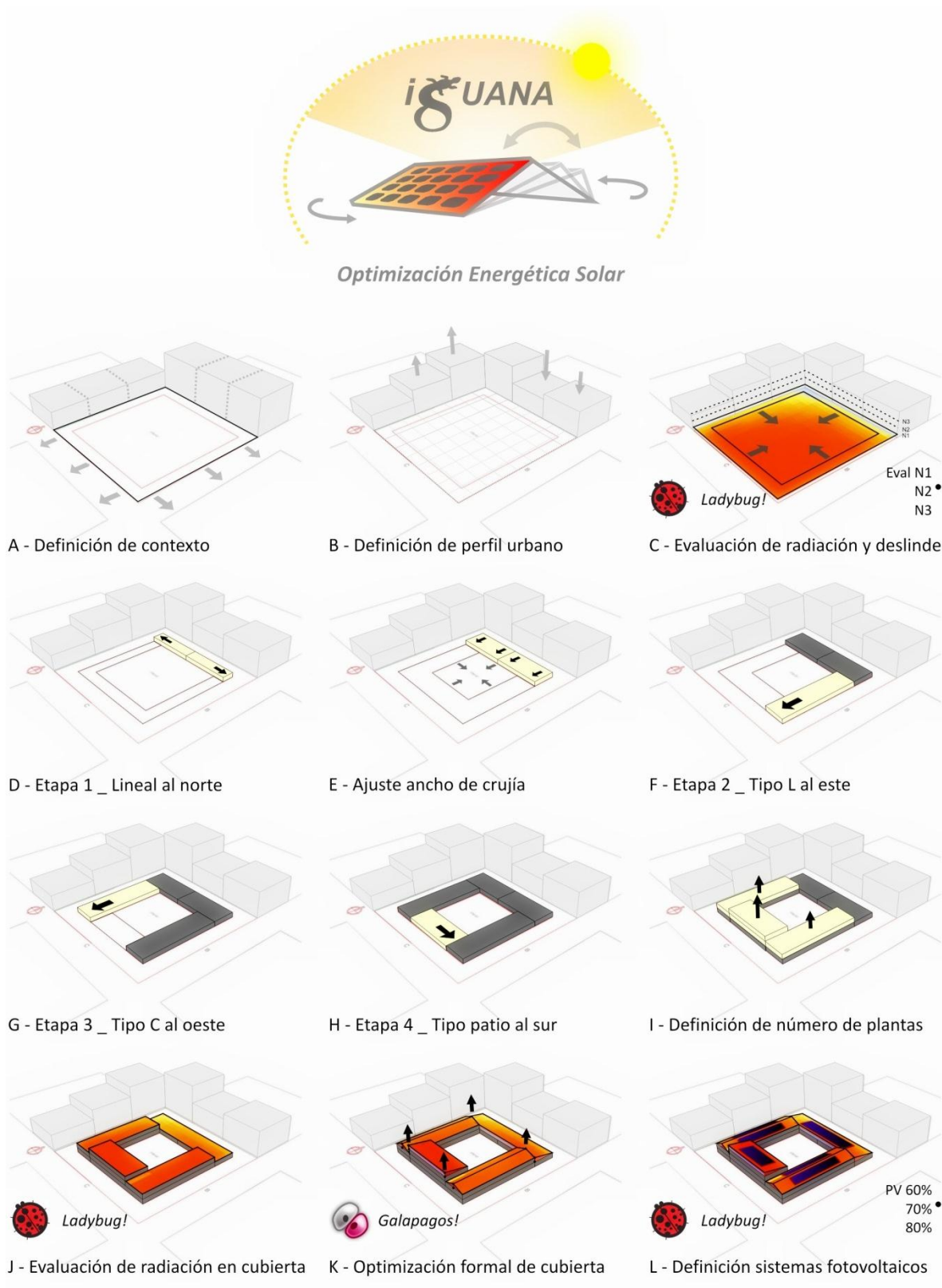


Figura 34. Entorno visual y secuencia de definición paramétrica en iGUANA

Las etapas necesarias para el diseño de los establecimientos, están asociadas a parámetros de entrada interactivos, detallados a continuación. La característica paramétrica, permite que los valores de entrada sean configurables en un rango predeterminado; mientras que el desarrollo en código abierto, admite que cualquiera de estos rangos pueda ser personalizado de ser necesario.

- A. Definición de contexto - Permite establecer las dimensiones del lote, entre 20 y 100 metros por lado y su relación con el contexto, pudiendo definir los lados del lote que presentan calles, para simular situaciones aisladas, adosadas o en esquina, regulando el ancho entre 0 y 30 metros (avenida principal).
- B. Definición de perfil urbano - Definición de altura del entorno, con el objetivo de simular obstrucciones que puedan afectar el potencial solar, pudiendo representar de 1 a 3 volúmenes por lado del lote, con una altura variable de 0 a 30 metros (representando un edificio de 10 niveles), para cada volumen.
- C. Evaluación de radiación y deslinde - Evaluación primaria de radiación promedio anual, en superficie de perfil prefigurado del edificio, a una altura equivalente de 1, 2 o 3 plantas. Permite tener una aproximación de las pérdidas de radiación por contexto, definiendo el deslinde entre 0 y 20 metros.
- D. Construcción etapa 1 - Se define un parámetro de animación de crecimiento del establecimiento, variable entre 0 y 400 (edificio completo tipo patio). La primer etapa corresponde a la construcción del bloque lineal, siempre orientado al norte, con un rango variable de 0 a 100 (bloque completo al norte).
- E. Ajuste ancho de crujía - Definición del ancho de crujía, variable entre 9 y 11 metros para crujías simples y de 15 a 17 metros para dobles crujías. Se excluyen valores de crujía comprendidos entre 11 y 15 metros.
- F. Construcción etapa 2 - Crecimiento del edificio en L, con el segundo bloque siempre orientado al este, con un rango variable de 100 a 200 (bloque completo al este), en parámetro de crecimiento.
- G. Construcción etapa 3 - Crecimiento del edificio en C, con el tercer bloque siempre orientado al oeste, con un rango variable de 200 a 300 (bloque completo al oeste), en parámetro de crecimiento.
- H. Construcción etapa 4 - Etapa final de crecimiento conformando tipología patio, con el cuarto bloque orientado al sur; rango de 300 a 400 (bloque completo al sur), en parámetro de crecimiento.
- I. Definición de número de plantas - Establece el número de plantas de cada uno de los bloques diseñados, variable de 1 a 3 y definición de altura general de planta del edificio, variable entre 2,4 y 4,0 metros.
- J. Evaluación de radiación en cubierta - Se utiliza *Ladybug* para conocer la radiación total en cubierta, pudiendo ser evaluada para cada bloque y para cada ala de cubierta según orientación, por separado.

- K. Optimización formal de cubierta - Se utiliza *Galapagos* para optimizar la forma de la cubierta evaluando la máxima superficie de captación con radiación máxima anual o la máxima radiación total anual.
- L. Definición de sistemas fotovoltaicos - Se establecen las alas de cubierta que tendrán sistemas FV y se determina la ocupación (0 a 70%), la eficiencia de los paneles FV (10 a 20%, seteado en 15%), la superficie activa de paneles (0 a 100%, seteado en 90%) y su superficie (1,0 a 2,0 m², seteado en 1,8 m²).
- M. Escenario - Definición de nivel educativo básico-medio o superior, superficie destinada a aulas (50 a 100%, seteado en 75% según Catastro de Infraestructura 2012-2013 (MINEDUC [sin fecha])) y escenario de consumo, pudiendo seleccionar independientemente consumos de iluminación, electricidad y/o calefacción, para comprobar el aporte de energía solar seccionado o en escenario de consumo completo.
- N. Economía - Permite definir factores económicos para estimar el costo de inversión. El valor de Watt instalado de sistemas fotovoltaicos, se define a partir de la regresión potencial de los antecedentes del PTSP (Gráfico 27, pág. 72), que considera el efecto de economías de escala de las instalaciones. También se configura el IVA (0 a 19%), el valor de la UF (25.000 a 30.000 \$CH) y el valor del dólar (600 a 800 \$).

Los valores que se establecen seteados por defecto, constituyen recomendaciones de diseño, en base a información recabada en distintas etapas a lo largo de la investigación.

4.2.2 Resultados obtenidos en tiempo real

La componente de interactividad que ofrecen las herramientas paramétricas, permite que en cualquier momento pueda modificarse cualquiera de los parámetros de entrada, calculando automáticamente y en tiempo real los siguientes resultados.

- A. Superficie de ocupación, construida y de aulas (m²) - Ocupación en terreno, superficie construida considerando todas las plantas del edificio y de aulas en base a factor de superficie establecido.
- B. Volumen total y de aulas (m³) - Volumen total del edificio considerando todas las plantas y volumen de aulas, determinado en función del porcentaje establecido como parámetro de entrada.
- C. Número máximo de alumnos (u) - En función de los requerimientos normativos de OGUC («Decreto No 47» 2016), considerando 3,0 m³ por alumno, para nivel básico-medio, 4,5 m³ para superior y 1,1 m² por alumno para ambos niveles. Se calcula el número máximo de alumnos por requerimientos de volumen y superficie y se considera el menor de ambos valores, para conocer la capacidad estimativa del edificio.

- D. Radiación en perfil del edificio en lote ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{-año}$) - Radiación promedio anual, en superficie de perfil prefigurado del edificio, en una altura equivalente a 1, 2 o 3 plantas.
- E. Superficie de captación FV (m^2) - superficie bruta de captación de paneles fotovoltaicos, incluyendo marcos y espacios entre células, que son descontados para cálculo de generación de energía eléctrica.
- F. Energía AC producida total anual (kWh-año) y promedio anual ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{-año}$) - Total anual de energía alterna producida por el sistema FV y energía promedio anual por m^2 del establecimiento construido.
- G. Consumo total anual (kWh-año) - Calculado en función de la superficie construida y el escenario de consumo establecido como parámetro de entrada, de acuerdo al nivel formativo seleccionado.
- H. Excedente de energía (kWh-año) - Total de energía anual que no es utilizada para consumo y puede destinarse para otro uso, diferencia entre la energía producida total anual y el consumo total anual.
- I. Porcentaje cubierto de consumo (%) - Fracción de consumo cubierta por la generación eléctrica FV.
- J. Tamaño de la instalación (kW) - Tamaño de la instalación FV para la superficie de captación establecida.
- K. Número total de paneles FV (u) - Cantidad de paneles FV necesarios para la instalación, calculado en función de la superficie total de captación FV y la superficie establecida de cada panel FV.
- L. Costo de la instalación FV (UF y USD) - Costo estimativo de la instalación en UF y USD, calculado a partir del tamaño de la instalación FV en kW y el costo por Watt instalado de sistemas fotovoltaicos.
- M. Viviendas abastecidas con excedentes (u) - En caso de existir excedentes de energía, se calcula el número de viviendas que podría abastecerse, en función de los requerimientos detallados en 4.3.3, pág. 107.

4.3 Ensayos exploratorios sobre generación de energía eléctrica con *iGUANA*

La definición paramétrica desarrollada, permite realizar exploraciones formales desarrollando distintas volumetrías de establecimientos educacionales, para obtener una importante cantidad de resultados en un tiempo reducido. Esta sección presenta algunos ensayos exploratorios considerados relevantes, pudiendo, en función de la flexibilidad de la herramienta, realizarse muchos otros que permitan evaluar distintos requerimientos.

Todas las simulaciones de cálculo de generación de energía eléctrica, se realizan a partir del módulo *Photovoltaics Surface* de *Ladybug*, basado en *NREL PVWatts v1* (Dobos 2013). En todos los casos se consideran módulos fotovoltaicos con una eficiencia del 15% y un albedo promedio anual de 0,20; considerado normalmente por la mayoría de los software de cálculo fotovoltaico, para ciudades y suburbios (Sadeghipour [sin fecha]).

4.3.1 Relación entre generación y consumo de energía eléctrica

Esta sección analiza la relación entre la generación de energía eléctrica, mediante sistemas fotovoltaicos en posición optimizada anual -acimut norte y 25º de inclinación- y el consumo de los establecimientos educacionales; según distintos escenarios -obtenidos en base a las simulaciones desarrolladas en la sección 3.1, pág. 55-, para los niveles formativos básico-medio y superior.

La programación desarrollada mediante *IGUANA*, permite seccionar los consumos por concepto de iluminación, electricidad y/o calefacción, para ambos niveles formativos. Con el objetivo de evidenciar la relación entre consumo y generación de energía eléctrica, se presentan los resultados del ensayo realizado; presentando la superficie construida posible de abastecer, en base al aporte de 1 m² de panel solar fotovoltaico, en posición optimizada anual.

Tabla 24. Superficie construida de Eeduc abastecida con 1m² de panel FV en posición optimizada

Nivel Básico-medio			Nivel Superior		
Iluminación	Electricidad	Calefacción	Iluminación	Electricidad	Calefacción
41,8 m ²	16,4 m ²	8,3 m ²	Iluminación	10,6 m ²	4,5 m ²
16,4 m ²	26,8 m ²	7,5 m ²	Electricidad	8,9 m ²	52,9 m ²
8,3 m ²	7,5 m ²	10,4 m ²	Calefacción	4,5 m ²	6,9 m ²
	6,4 m ²	Iluminación + Electricidad + Calefacción		4,2 m ²	

En la Tabla 24 pueden verse los resultados del ensayo, presentados de esta manera para poder evidenciar la superficie construida que es posible abastecer, en cualquier combinación de escenario de consumo posible y para ambos niveles formativos. De considerar, por ejemplo, un escenario en nivel básico-medio que incluya requerimientos de iluminación y electricidad, el aporte de generación de 1 m² de panel FV en posición optimizada anual, permitiría cubrir el consumo total de 16,4 m² de superficie construida de establecimiento. Mientras que los resultados al considerar un escenario completo, incluyendo iluminación, electricidad y calefacción, pueden verse al final de la Tabla, siendo el aporte de cada metro cuadrado de panel FV, suficiente para cubrir el consumo de 6,4 m² en nivel básico-medio y 4,2 m² en nivel superior. Esta información, puede utilizarse para obtener una estimación rápida, de la dimensión necesaria de superficie FV en posición optimizada, en función de los metros cuadrados que se deseen construir.

4.3.2 Variación en generación de energía eléctrica según acimut e inclinación

Por distintos motivos, -orientación del lote, criterios de diseño o implantación- la incorporación de sistemas fotovoltaicos en cubierta, no siempre puede realizarse para la posición optimizada anual, como fuera deseable. Esta sección, analiza las diferencias en la generación de energía eléctrica, por variaciones de acimut e inclinación de los sistemas fotovoltaicos, a partir de los resultados obtenidos para la posición optimizada anual.

Tabla 25. Variación en generación de energía eléctrica según acimut e inclinación

Acimut (°)	-40 al NO	-30	-20	-10	0 Norte	10	20	30	40 al NE
Inclinación (°)									
25	-2,8%	-1,5%	-0,5%	-0,1%	0,0%	-0,4%	-1,3%	-2,6%	-4,1%
20	-2,6%	-1,6%	-0,8%	-0,5%	-0,4%	-0,8%	-1,5%	-2,5%	-3,8%
15	-3,0%	-2,2%	-1,6%	-1,4%	-1,3%	-1,6%	-2,1%	-2,8%	-3,8%
10	-3,8%	-3,3%	-2,9%	-2,8%	-2,7%	-2,9%	-3,2%	-3,7%	-4,4%
5	-5,2%	-4,9%	-4,7%	-4,6%	-4,6%	-4,7%	-4,9%	-5,1%	-5,4%
0	-7,2%	-7,2%	-7,2%	-7,2%	-7,2%	-7,2%	-7,2%	-7,2%	-7,2%

La Tabla 25, muestra las reducciones porcentuales en la generación de energía eléctrica, para combinaciones de variación de acimut desde -40 [al noroeste] hasta 40 [al noreste], con variación de inclinación desde 0 a 25 grados; tomando como referencia la posición optimizada anual. En los resultados, puede observarse que las disminuciones por efecto de la variación de inclinación, son mayores que por efecto de la de acimut. Mientras que variaciones de 25 grados en la inclinación, disminuyen en un 7,2% la generación de energía eléctrica; variaciones de 40 grados en el acimut, producen una reducción del 4,1%, como máximo. Demostrando que la posición de los sistemas fotovoltaicos, presenta mayor sensibilidad a variaciones de inclinación que de acimut, y relativizando la importancia de una orientación plena al norte. Estos resultados, incitan a formular criterios de diseño que al menos consideren la inclinación óptima de los sistemas -fuertemente influenciada por decisiones de diseño-, cuando no sea posible considerar la orientación óptima; de menor incidencia en la generación eléctrica y ligada a factores más rígidos como la trama urbana.

Comparaciones con valores de radiación, de la base de datos Meteonorm, para la ciudad de Concepción (Figura 5, pág. 24), expresados también en variación porcentual, permitieron comprobar para todos los registros, diferencias menores al 1% entre radiación y generación de energía eléctrica; validando los resultados obtenidos y la información de la definición.

4.3.3 Generación de energía eléctrica en establecimiento promedio

Esta sección explora el potencial de generación de energía eléctrica de los establecimientos educacionales. Realizando un ensayo de simulación para un establecimiento de tamaño promedio, de aproximadamente 2.000 m² de superficie de cubierta, considerando que los bloques de aulas representan el 72% de la superficie de cubierta -2.736 m² en promedio para el nivel básico-medio-, según las características formales descifradas (Sección 2.2.1, pág. 37).

Para la simulación, se desarrolla una configuración espacial tipo patio, con una rotación de los ejes principales de 26 grados al noroeste -considerando una ubicación en la trama central de la comuna de Concepción-, en un lote adosado por los lados, con calle frontal de 20 m y con un perfil urbano de altura común de 10 m, para simular pérdidas en la generación por sombreadamiento.

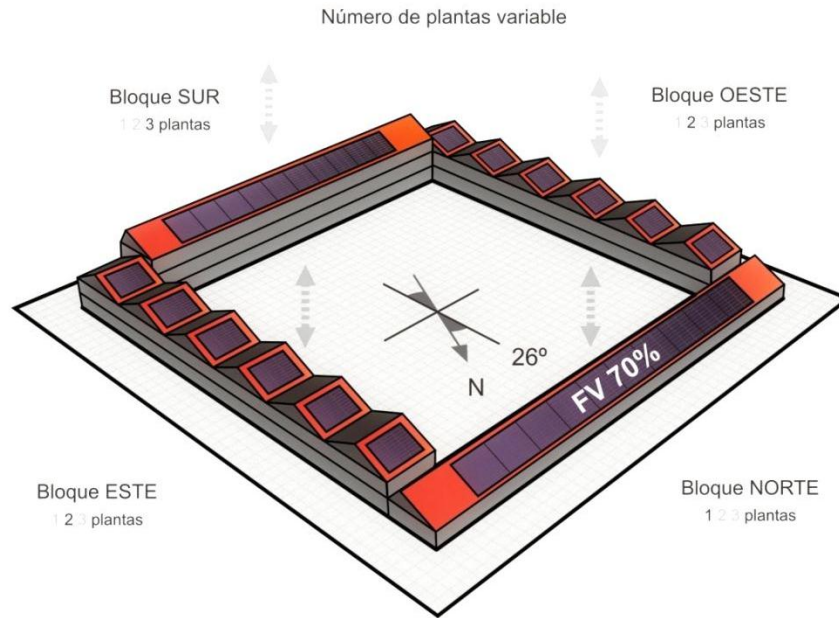


Figura 35. Configuración espacial en ensayo de generación de energía eléctrica

En la Figura 35 puede verse la configuración espacial desarrollada en el ensayo, con un diseño de cubierta -establecido a partir de las consideraciones incluidas en la definición paramétrica- que incorpora los sistemas FV en posición optimizada anual. Se consideran bloques de 9 metros de ancho de crujía -para maximizar la superficie de ocupación de los sistemas-, y una ocupación del 70% de las alas de captación, considerando restricciones de operación y servicio. El ensayo se realiza para los niveles formativos básico-medio y superior, con variaciones progresivas en el

número de plantas de cada bloque; escalonando el conjunto de norte a sur, para evitar efectos de auto-sombreado. Evaluando el porcentaje de consumo cubierto y los excedentes energéticos; que son comparados con el consumo eléctrico promedio de una vivienda en Concepción, para conseguir una medida de referencia, que cuantifique el potencial energético. Para la comparación, se considera una superficie promedio de 77 m² por vivienda (CDT 2010) y un consumo eléctrico de 31,5 kWh/m²-año -destinados principalmente a equipos e iluminación-, equivalentes al 17,98% del consumo energético total de una vivienda en Concepción, establecido en 175,1 kWh/m²-año (CDT 2010). En primer lugar, se realiza un ensayo para las condiciones reales de consumo que presentan los establecimientos -iluminación y electricidad en nivel básico-medio y agregando calefacción en nivel superior-, a modo de evaluar el potencial considerando la situación actual.

Tabla 26. Generación y excedentes eléctricos de establecimiento promedio. Parte 1

Nivel formativo	Número de plantas por bloque				Consumo cubierto	Excedente energía	Número de viviendas
	Norte	Este	Oeste	Sur	%	kWh-año	u
Básico Medio	1	1	1	1	749%	146.534	60
	1	1	1	2	621%	141.976	59
	1	2	2	2	440%	131.279	54
	2	2	2	2	379%	125.466	52
	2	2	2	3	341%	120.716	50
	2	3	3	3	278%	109.715	45
	3	3	3	3	252%	103.238	43
Superior	1	1	1	1	194%	80.870	33
	1	1	1	2	159%	62.488	26
	1	2	2	2	113%	18.959	8
	2	2	2	2	97%	0	0
	2	2	2	3	87%	0	0
	2	3	3	3	71%	0	0
	3	3	3	3	65%	0	0

Los resultados de la Tabla 26, muestran que en el nivel básico-medio, la generación de energía eléctrica permite cubrir el consumo del establecimiento, en todas las configuraciones. Desde un 252% de consumo cubierto, con excedentes que permiten cubrir el consumo eléctrico total anual de 43 viviendas, hasta un 749%, cubriendo el consumo de 60 viviendas. En el nivel superior, el consumo cubierto de las configuraciones uniformes de 2 y 3 plantas, es de un 97% a un 65%, respectivamente; por lo que no se generan excedentes de energía. Mientras que las restantes configuraciones cubren de un 113% a 194% del consumo del establecimiento, con remanentes que permiten cubrir el consumo eléctrico total anual de 8 a 33 viviendas, correlativamente.

Tabla 27. Resultados de simulación entregados por iGUANA

Item	Unidad	Valor
Superficie total de ocupación	m ²	2.052
Superficie total construida	m ²	2.052
Superficie total de aulas	m ²	1.539
Volumen total	m ³	6.156
Volumen total de aulas	m ³	4.617
Número máximo de alumnos	u	1.399
Radiación total anual en cubierta	kWh-año	2.352.740
Radiación promedio anual en cubierta	kWh/m ² -año	1.715
Superficie bruta de FV	m ²	960
Generación AC total anual	kWh-año	169.106
Generación AC promedio anual	kWh/m ² -año	196
Consumo total anual	kWh-año	22.572
Excedente de energía	kWh-año	146.534
Porcentaje de consumo cubierto	%	749
Tamaño de la instalación	kW	128
Número total de paneles FV (1,8m ² superficie bruta)	m ²	533
Costo de la instalación (1UF - 26.115 \$CH)	UF	4.217
Costo de la instalación (1 USD - 650 \$CH)	USD	169.407
Viviendas abastecidas con excedentes	u	60

En la Tabla 27, puede verse un registro de todos los resultados obtenidos mediante *iGUANA*, para el ensayo realizado con la configuración uniforme de 1 planta, en nivel formativo básico-medio. Un establecimiento de estas características, podría alojar cerca de 1.400 alumnos y cubrir el 749% de su consumo, con una instalación de 533 paneles FV de 1,8 m², equivalentes a una instalación de 128 kW con un costo estimado de 4.217 UF, y con excedentes para cubrir el consumo eléctrico total anual de 60 viviendas. Puede verse que el tamaño de la instalación para un establecimiento promedio como el evaluado, puede superar levemente el límite máximo de 100 kW de capacidad instalada que establece la Ley *Net Billing* («Ley N° 20.571» 2012); revelando las limitaciones legislativas existentes, para incorporar infraestructuras de grandes superficies a la modalidad.

La Figura 36, más adelante, muestra una imagen objetivo del potencial de abastecimiento urbano de energía eléctrica, de un establecimiento de 2.524 m² de superficie total de cubierta -similar al ensayado-, que podría abastecer el consumo eléctrico total anual de cerca de 60 viviendas, en un radio de influencia cercano a los 80 metros, cuando la configuración es uniforme de 1 planta.

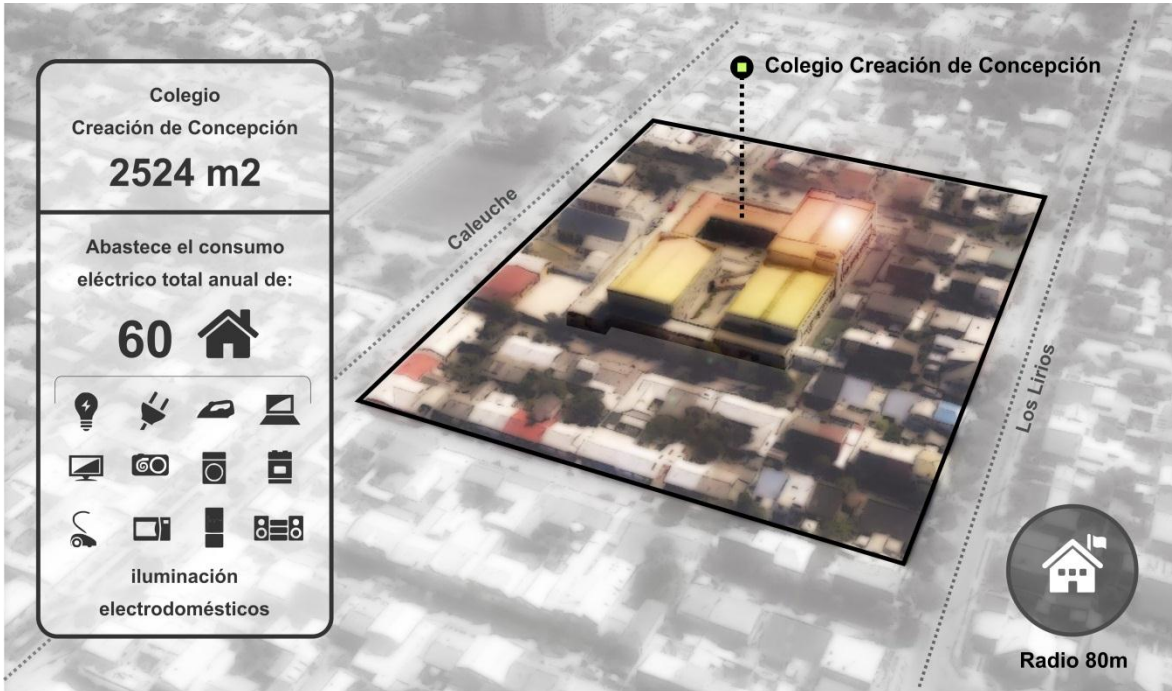


Figura 36. Imagen objetivo de abastecimiento eléctrico de establecimiento promedio

Con el objetivo de explorar la capacidad de potencial de generación eléctrica, se realiza una segunda simulación bajo las mismas condiciones, pero considerando requerimientos completos de iluminación, electricidad y calefacción, también para el nivel básico-medio, en el que sólo se habían considerado los consumos reales de iluminación y electricidad.

Tabla 28. Generación y excedentes eléctricos de establecimiento promedio. Parte 2

Nivel formativo	Número de plantas por bloque				Consumo cubierto %	Excedente energía kWh-año	Número de viviendas u
	Norte	Este	Oeste	Sur			
Básico Medio	1	1	1	1	291%	111.075	46
	1	1	1	2	241%	99.052	41
	1	2	2	2	171%	70.626	29
	2	2	2	2	147%	54.549	22
	2	2	2	3	133%	42.334	17
	2	3	3	3	109%	13.604	6
	3	3	3	3	98%	0	0

Los resultados de la Tabla 28, muestran que el potencial de generación es suficiente para considerar los requerimientos de calefacción y aun así disponer de remanentes energéticos, en prácticamente todas las configuraciones; abasteciendo el consumo eléctrico total anual de entre 6 y 46 viviendas, dependiendo del caso. Estos resultados demuestran que un establecimiento de

tamaño promedio, posee el potencial para auto-abastecer los requerimientos actuales de iluminación y electricidad, con remanentes para implementar sistemas de calefacción, -mejorando las actuales condiciones de confort sin climatización- y aun así, abastecer el consumo eléctrico total anual de un importante número de viviendas, al menos del entorno inmediato.

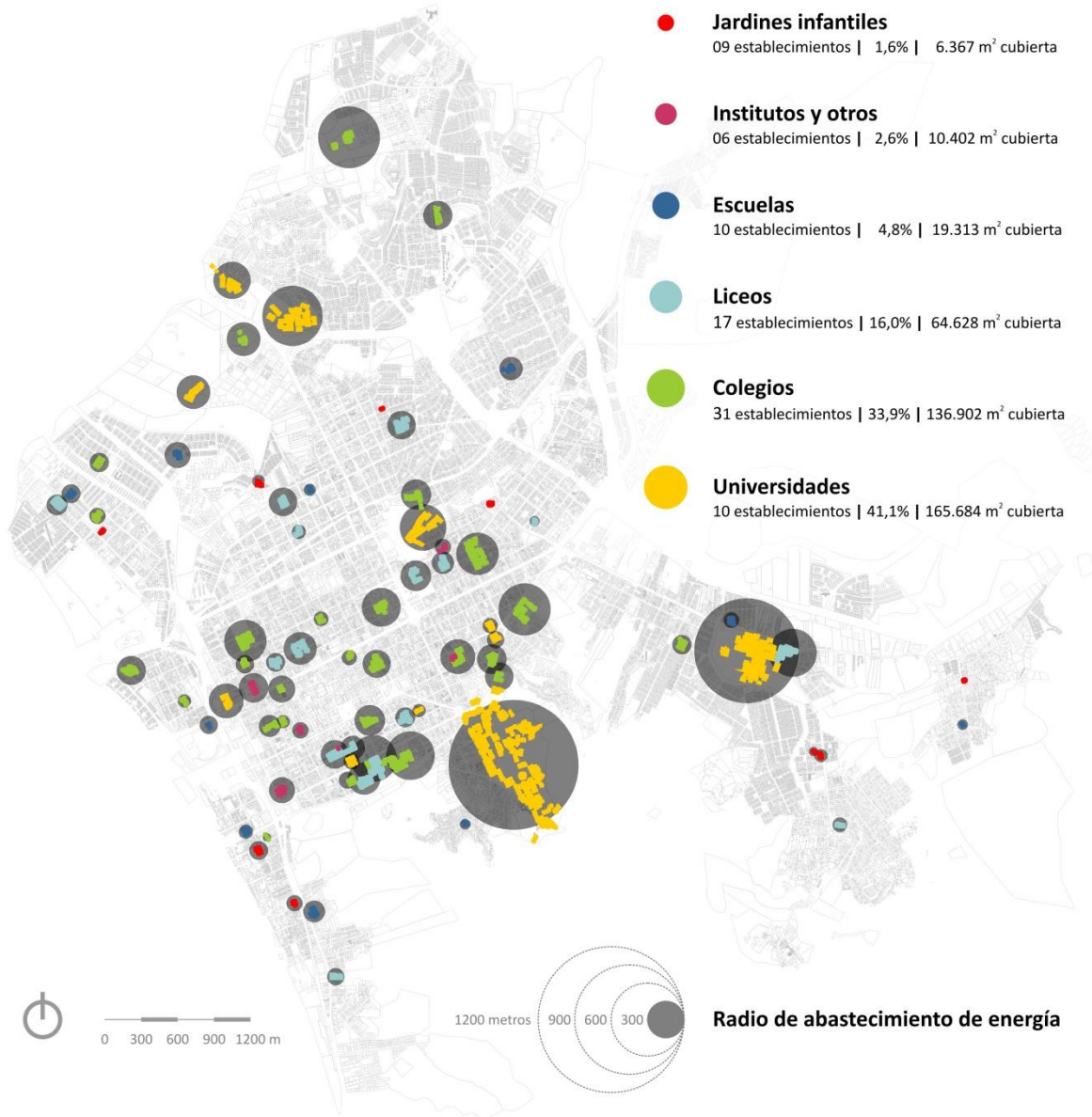


Figura 37. Imagen objetivo de abastecimiento eléctrico integrado en la comuna de Concepción

La Figura 37 muestra una aproximación al potencial de abastecimiento urbano integrado, de los establecimientos educacionales de la comuna de Concepción. Que permite apreciar el radio de abastecimiento que los establecimientos podrían tener en el territorio, a partir de los excedentes

energéticos calculados para la situación actual real de consumo, y considerando zonas de influencia proporcionales a la superficie de cubierta. Aunque sólo sea una estimación primaria, ya que no se considera la densidad o la morfología urbana por ejemplo, permite tener un acercamiento al aporte que podría lograr la integración energética de infraestructura educacional.

4.4 Recomendaciones de diseño e incorporación arquitectónica

Esta última sección establece recomendaciones de diseño, para establecimientos educacionales que consideren la incorporación arquitectónica de sistemas fotovoltaicos en cubierta. Resumiendo a partir de los resultados obtenidos en los distintos capítulos, criterios de diseño que pueden asistir a la optimización del desempeño, de las instalaciones a implementar.

Como criterio general de implantación, se recomienda programar las ampliaciones de los establecimientos, generando volúmenes escalonados de norte a sur, que eviten efectos de auto-sombreado, lo que puede disminuir considerablemente la generación de energía eléctrica.

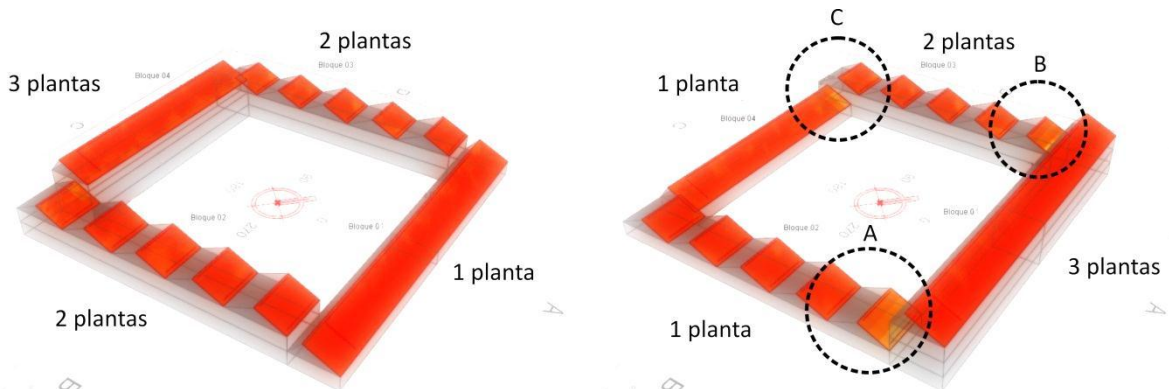


Figura 38. Análisis de radiación según escalonamiento del establecimiento

La Figura 38 muestra a la izquierda, un ejemplo de correcto escalonamiento de bloques de norte a sur, sin pérdidas por auto-sombreado y a la derecha un escalonamiento inadecuado, generando puntos notables de reducción de radiación (A, B y C); disminuyendo en el ejemplo, un 5% la radiación promedio en cubierta -1677 a 1593 kWh/m²-año-, en las superficies evaluadas. En el mismo sentido con respecto a la implantación, deben considerarse también como factor relevante, las pérdidas de radiación por sombreado del contexto. Cuando éste sea una condición invariable, porque el lote no se pueda seleccionar, evaluar la distancia óptima de deslinde puede contribuir a minimizar los efectos adversos de sombreado.

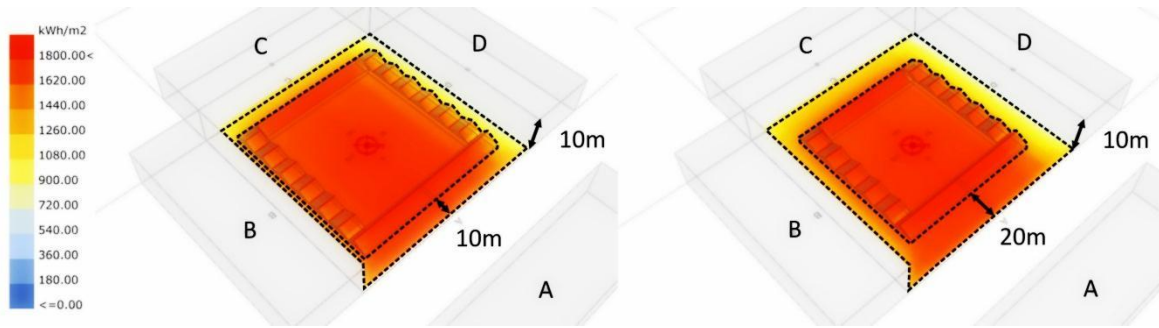


Figura 39. Análisis de radiación según deslinde del establecimiento

En la Figura 39 puede verse una simulación de evaluación de deslinde, realizada en *iGUANA*. En el ejemplo, realizado para un contexto de altura uniforme de 10m, un aumento del deslinde de 10m, provoca un aumento de un 5% -1397 a 1464 kWh/m²-año-, en la radiación promedio en cubierta.

En cuanto al diseño de cubierta, los resultados de las simulaciones energéticas realizadas en la Sección 3.1.3 (pág. 62), comprueban que para la ciudad de Concepción, la posición optimizada anual -acimut norte y 25° de inclinación- presenta el mejor desempeño; asegurando la máxima generación, mayor venta y menor compra de energía eléctrica, por unidad de superficie. La incorporación de sistemas fotovoltaicos en posición optimizada, plantea nuevos desafíos de diseño para integrar la producción de energía, a la volumetría de los establecimientos; y puede ser orientada, mediante estrategias que permitan maximizar sus capacidades.

Tabla 29. Ocupación máxima de cubierta según orientación y ancho de crujía

Orientación del bloque	Crujía	Ancho de crujía	Ocupación de cubierta
	Tipo	m	% planta
Norte-Sur	Simple mínima	9	55
Norte-Sur	Simple máxima	11	45
Este-Oeste	Simple o doble	9 a 17	38
Norte-Sur	Doble mínima	15	33
Norte-Sur	Doble máxima	17	29

La Tabla 29, presenta un resumen de los límites geométricos de ocupación de cubierta determinados. Para incrementar la capacidad de ocupación de cubierta de sistemas fotovoltaicos en posición optimizada, se recomienda, en establecimientos con crujías simples, maximizar la extensión de bloques con orientación norte-sur, donde puede alcanzarse de un 45 a 55% de ocupación -expresado como porcentaje de la planta-, con respecto a la ocupación de los bloques

este-oeste, en la que sólo puede alcanzarse un 38% como máximo. Cuando se consideren establecimientos con crujías dobles, se sugiere maximizar la extensión de bloques este-oeste, que presentan mayor ocupación que los bloques con orientación norte-sur, donde sólo se alcanzará de un 29 a un 33%. Para bloques con orientación norte-sur, priorizar las crujías simples de ancho mínimo de 9 m, puede mejorar en hasta un 26% la ocupación de cubierta; con respecto a crujías dobles de ancho máximo. Mientras que para bloques con orientación este-oeste, no se define el ancho de crujía, dado que en cualquier caso podrá ocuparse como máximo, un 38% de la planta.

Estas recomendaciones, combinadas con los resultados obtenidos de aporte de energía solar en el desempeño energético (Tabla 21, pág. 89), permiten establecer sugerencias en cuanto al número de plantas a considerar, cuando se persiga alcanzar saldos energéticos y de facturación nulos. Para escenarios completos, que consideren iluminación, electricidad y calefacción, cuando los bloques tengan orientación norte-sur, se recomienda considerar crujías simples mínimas, que permiten abastecer como máximo 3 plantas en nivel básico-medio y 2 en nivel superior. Mientras que en bloques con orientación este-oeste, independientemente del ancho de crujía, se sugiere no sobrepasar las 2 plantas en nivel básico-medio y 1 en superior.

Cuando por distintos motivos, no sea posible considerar la posición optimizada de los sistemas FV, se recuerda -según lo establecido en la Tabla 25 (pág.106)- priorizar la inclinación óptima, por sobre la orientación óptima; dado que la inclinación tiene mayores incidencias en la generación de energía, que la orientación. Cuando tampoco sea posible considerar ésta inclinación, se establecen recomendaciones en la Tabla 30, en base a los resultados obtenidos en la Sección 3.4.3 (pág. 90).

Tabla 30. Prioridad de inclinación según orientación de cubierta

Orientación	Inclinación °	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Norte	Prioridad nº	6	5	4	3	2	1	7	8	9	10	11
Este-Oeste	Prioridad nº	1	2	3	4	5	6	7	-	-	-	-

Se sugiere en cubiertas con orientación norte, considerar inclinaciones progresivamente menores a 25°, hasta alcanzar la posición horizontal, dado que, aunque la radiación solar sea cuasi simétrica a partir de 25°, la incorporación de sistemas puede tener restricciones geométricas, para inclinaciones mayores. Mientras que para cubiertas con orientación este-oeste, se recomienda considerar inclinaciones progresivamente más verticales desde la posición horizontal, dado que en dicha posición la radiación es máxima, decreciendo hacia inclinaciones superiores.

Resumen de resultados

La investigación realizada, presenta un orden secuencial, en el que los resultados obtenidos en cada capítulo, sirven como insumo para la etapa siguiente. Esta sección presenta un resumen de los principales resultados alcanzados, en los diferentes apartados del trabajo.

Capítulo 1 - Se detecta un perfil de consumo de establecimientos educacionales sincronizado con potencial solar, idóneo para considerar en la Ley 20.571 de generación residencial - *Net Billing*.

Capítulo 2 - Se realiza un catastro de Eeduc por nivel formativo en la comuna de Concepción-Chile, que permite descifrar las características formales más representativas -largo, ancho, proporción, número de plantas, tipo de cubierta y configuración espacial-, de edificios de nivel básico-medio y superior. Comprobando consumos eléctricos de 11,1 y 43,0 kWh/m²-año, respectivamente.

Capítulo 3 - Simulaciones para casos de estudio representativos de las características formales descifradas, permiten determinar la posición óptima de paneles fotovoltaicos -acimut norte y 25º de inclinación. Generando más energía (hasta 9,2% en nivel básico-medio y 8,8% en superior), aumentando las ventas (hasta 7,7% y 10,5%), disminuyendo las compras (hasta -4,0% y -3,2%), y con menores tiempos de retorno de la inversión (hasta 5 años) y mayor utilidad al final del período evaluado; en comparación a otras posiciones. Se determina el aporte de energía solar, capaz de abastecer requerimientos completos de 4 plantas en nivel básico-medio y 3 en superior, con superficie FV optimizada del 71 y 74% de la planta, respectivamente y con facturación anual eléctrica nula. Se plantean estrategias de incorporación de sistemas FV, según límites geométricos.

Capítulo 4 - La información recopilada, se integra en una herramienta paramétrica original, que permite determinar la capacidad solar activa de cubierta y sugerir formas con mejores desempeños. Se determina la relación entre generación y consumo; abasteciendo con 1 m² FV en posición optimizada, requerimientos completos de 6,4 m² construidos de nivel básico-medio y 4,2 m² de superior. Se comprueban variaciones en la generación desde la posición optimizada, según acimut (hasta -4,1% por 40º) e inclinación (-7,2% por 25º). Se determina la capacidad de generación de un establecimiento promedio, suficiente para cubrir auto-consumo completo y requerimientos eléctricos anuales de hasta 46 viviendas en nivel básico-medio y 33 en superior.

Conclusiones y discusión

Esta investigación demuestra que por su extensión volumétrica, los establecimientos educacionales presentan un enorme potencial de captación de energía solar activa, incluso en ciudades de latitudes geográficas medias, como en el caso de la ciudad de Concepción-Chile. Estas posibilidades pueden optimizarse mediante estrategias de diseño de las condiciones de la morfología arquitectónica, sugiriendo formas con mejores desempeños, que permitan maximizar sus capacidades y en definitiva sintonizar con un modelo de eficiencia; produciendo más energía, con menos recursos.

En países en desarrollo, donde los recursos son siempre limitados, este aforismo del hacer más con menos cobra un sentido particular, dado que plantea desafíos intelectuales para proyectar desde la restricción y atenuar las barreras económicas, a costas del ingenio. Lograr la optimización de los sistemas, para conseguir el mejor desempeño de los recursos solares, guarda una estrecha relación con lo anterior, permitiendo transformar una tecnología a priori exógena, en una apropiada -aplicada con propiedad a las circunstancias y hecha propia para adecuar al contexto-. Mitigando el elevado costo de inversión inicial que los sistemas fotovoltaicos presentan, lo que constituye una de las mayores barreras para la implementación de tecnologías solares activas. Se ha demostrado, que la optimización en la posición de los sistemas fotovoltaicos, permite garantizar la máxima generación de energía por unidad de superficie, lo que se traduce en menores superficies de captación -para lograr la misma cantidad de energía-, y por lo tanto menores costos de inversión inicial. Además, la incorporación de sistemas en posición optimizada, permite lograr mayores índices de venta de energía -excedentes que no son utilizados para auto-consumo- y menores índices de compra de energía -déficits en momentos en que la generación no es suficiente-, produciendo, solamente gracias al diferencial de la optimización de estos índices, menores tiempos de retorno de la inversión. Estas condiciones deben ser especialmente consideradas, en países que cuenten con marco regulatorio de generación energética particular, por las ventajas económicas que estas mejoras pueden provocar, y particularmente en programas educacionales; para los que se ha demostrado una fuerte idoneidad, basada en los perfiles de consumo acoplados con el potencial solar. En la investigación, aun para una condición de análisis de facturación eléctrica anual nula -que implica que la venta energética sea el doble de la compra,

bajo el marco regulatorio energético nacional-, se ha podido comprobar que el potencial solar, permite abastecer el consumo completo de establecimientos de hasta 4 plantas en nivel básico-medio y 3 en nivel superior.

Mediante las simulaciones energéticas, también se ha comprobado que las variaciones en las posiciones analizadas, sólo afectan mínimamente la cantidad de tiempo de auto-consumo; dado que la generación energética se produce en correlación con el ciclo solar, independientemente de la posición de los sistemas fotovoltaicos. Estos resultados, invitan a reflexionar sobre medidas alternativas para mejorar dicho desempeño; pudiendo ser una alternativa, utilizar la información de los perfiles de consumo, para sincronizar las actividades de mayor demanda energética, con las horas de mayor radiación solar. La utilización de equipos informáticos, por ejemplo, de gran participación en el consumo de establecimientos de nivel básico-medio y protagónicos dentro de los nuevos modelos educativos -que incrementan progresivamente el uso de las tecnologías de información y comunicación-, podría por ejemplo, sincronizarse con las horas de mayor potencial. Alterando los perfiles de consumo, desde estrategias asociadas a cambios conductuales -y no sólo a la eficiencia energética de elementos externos al hombre-, y enseñando desde la premisa ética, de utilizar más, cuando hay más. Ésta lógica, cobra más sentido aún, cuando el objeto de estudio son los establecimientos escolares, tal vez uno de los programas que presenta mayor sincronización con el ciclo circadiano, y uno de los fundamentos por el cual el aprovechamiento solar, resulta tan pertinente.

Los resultados obtenidos en la investigación, demuestran que el potencial solar disponible, permite generar establecimientos con auto-suficiencia energética y con remanentes que podrían utilizarse para mejorar sustancialmente las condiciones de confort de los espacios educativos públicos -normalmente desprovistos de sistemas de climatización-, activar sus espacios para fines sociales en periodos sin uso, o compartirse localmente a través de sistemas inteligentes de distribución de energía eléctrica (*smart grid*); fundamentados en sus condiciones intrínsecas de dispersión territorial. En ese sentido, particularmente atractivos resultan los resultados de los ensayos de generación energética, en relación al aporte urbano que los establecimientos podrían lograr; inaugurando una línea de discusión e investigación, acerca de las ventajas sociales del aprovechamiento de recursos solares en zonas urbanas. Esta visión de los establecimientos educacionales como edificios de energía positiva, invita a reflexionar sobre su contribución en futuros escenarios energéticos, en los que podrían consolidarse como nodos urbanos de

generación energética distribuida. Cumpliendo, de esta forma, con un importante papel en el desarrollo de comunidades urbanas sustentables y sintonizando con una nueva generación - energética y humana-, donde el edificio actúe como educador en prácticas sostenibles, ya no desde una mirada intrínseca, sino desde una reflexión social, hacia nuevos modelos de democracia y descentralización energética.

Por último, esta investigación plantea un cuestionamiento al pensamiento tradicional de la forma arquitectónica -desarrollada únicamente como respuesta a valores estéticos y funcionales-, involucrando una nueva dimensión comprometida con el desempeño ambiental, hacia el desarrollo de un hábitat construido más sustentable. En ese sentido, las nuevas modalidades de diseño paramétrico, en combinación con plugins de análisis ambiental, permiten que los profesionales de diseño descubran aspectos energéticos, que hasta ahora habían permanecido invisibles. Concibiendo la forma, desde un proceso de exploración temprana de diseño y como respuesta a criterios de desempeño ambiental. Estas modalidades, se asocian a nuevas lógicas de trabajo colaborativo -como las culturas de código abierto-, donde las definiciones pueden ser retomadas y adaptarse o perfeccionarse, para dar respuesta a un problema; hacia una construcción colectiva de saberes integrados. Por lo pronto, la definición paramétrica desarrollada en la investigación, constituye un punto de partida incipiente -en fase de programación-, para la exploración de las incidencias paramétricas de la forma, en el potencial solar activo de los establecimientos educacionales; que según los antecedentes consultados, no había sido revisada. Mediante este trabajo, se ha logrado construir una herramienta original básica, para incorporar la dimensión solar activa, en el diseño temprano de infraestructuras educacionales. Gracias al carácter de código abierto y las dinámicas colaborativas, esta versión podría adaptarse para integrar otros aspectos ambientales y mayor flexibilidad de diseño, así como otras dimensiones relevantes -como la componente económica o el beneficio social del aporte urbano de excedentes energéticos-; lo que constituyen también futuras líneas de investigación.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de investigación Conicyt CON*FIN AKA-ERNC 007; se agradece al proyecto por los recursos y la financiación proporcionadas, para llevar adelante la investigación.

Se agradece a la Dirección de Administración de Educación de la Municipalidad de Concepción, al Departamento de Proyectos y Construcciones de la Universidad del Bío-Bío y a la administración de la Escuela Rene Louvel Bert, por la información aportada para el desarrollo de la investigación.

A la división de Posgrados de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, por el espacio y la infraestructura facilitada a lo largo de todo el proceso.

A Rodrigo García, por su compromiso con la educación y el conocimiento, su constancia para potenciar las capacidades de cada estudiante, su enfoque certero en la orientación académica y por la confianza depositada, al brindarme la oportunidad de participar en este proyecto.

Abreviaciones y acrónimos

AG	Algoritmos Genéticos
ACS	Agua Caliente Sanitaria
BAPV	<i>Building Attached Photovoltaics</i> (fotovoltaica adosada en edificios)
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaics</i> (fotovoltaica integrada en edificios)
DAEM	Dirección de Administración de Educación Municipal
EEduc	Establecimientos Educativos
ERNC	Energías Renovables No Convencionales
FV	Sistema Fotovoltaico
JUNJI	Junta Nacional de Jardines Infantiles
PTSP	Programa Techos Solares Públicos
PV	<i>Photovoltaics</i>
SIC	Sistema Interconectado Central
SNCAE	Sistema Nacional de Certificación Ambiental de Establecimientos Educativos
SST	Sistema Solar Térmico

Unidades

°	Grados
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
kWp	Kilovatio pico
m	metros
m ²	metros cuadrados
m ³	metros cúbicos
MW	Megavatio
nd	no disponible
Wp	Vatio pico

Referencias Bibliográficas

- ACESOL, [sin fecha]. Guía para usuarios del Net Billing. [en línea]. [Consulta: 19 julio 2016]. Disponible en: <http://www.acesol.cl/index.php/fotovoltaica-distribuida/gu%C3%ADa-para-usuarios-del-net-billing.html>.
- ACHEE, 2014. *Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos*. Santiago de Chile: Agencia Chilena de Eficiencia Energética.
- ANTON, I. y TĂNASE, D., 2016. Informed Geometries. Parametric Modelling and Energy Analysis in Early Stages of Design. *Energy Procedia*, vol. 85, no. November 2015, pp. 9-16. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2015.12.269.
- ASHDOWN, I. y WARD, G., 2013. Gendaymtx. [en línea]. [Consulta: 17 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.radiance-online.org/learning/documentation/manual-pages/pdfs/gendaymtx.pdf>.
- ASTM, 2005. *E917-05 Standard Practice for Measuring Life-Cycle Cost of Buildings and Building Systems*. 2005. Estados Unidos: ASTM.
- BUTTI, K. y PERLIN, J., 1985. *Un hilo dorado. 2500 años de arquitectura y tecnología solar*. Madrid: Hermann Blume. ISBN 84-7214-311-2.
- CÁMARA CHILENO-ALEMANA, 2015. Primer colegio en Chile en conectarse a la red eléctrica con su planta fotovoltaica bajo la ley Net Billing. [en línea]. [Consulta: 6 mayo 2016]. Disponible en: <http://chile.ahk.de/es/novedades/news/single-view/artikel/primer-colegio-en-chile-en-conectarse-a-la-red-electrica-con-su-planta-fotovoltaica-bajo-la-ley-de-net-billing/?cHash=753840794769e71fb3178bdad06976c5>.
- CDT, 2010. Estudio de Usos Finales y Curva de Oferta de Conservación de la Energía en el Sector Residencial. Santiago de Chile:
- CDT y CCHC, 2014. *Diseño y Funcionamiento de Sistemas Solares Fotovoltaicos* [en línea]. 1. Santiago de Chile: s.n. ISBN 978-956-7911-27-1. Disponible en: <http://informatica.cdt.cl/documentos/publicaciones/index.php?opcion=publicaciones>.
- CDT, PNUD y UTFSM, 2008. Registro solarimétrico - Irradiancia solar en territorios de la república de Chile. [en línea]. Santiago de Chile: Disponible en: https://issuu.com/prosolar/docs/registrosolarimetrico_de_chile.
- CGE DISTRIBUCIÓN, 2016. CGE Distribución Tarifas. [en línea]. [Consulta: 18 julio 2016]. Disponible en: <http://www.cgedistribucion.cl/informacion-comercial/tarifas-y-procesos-tarifarios/>.
- CITEC-UBB y DECON-UC, 2015. *Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para licitaciones de Diseño y Obras de la Dirección de Arquitectura, según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios _ Versión 2*. S.l.: s.n.
- COCH, H. y SERRA, R., 1995. *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: Edicions UPC. ISBN 84-7653-505-8.
- Decreto N° 47 - Fija nuevo texto de la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, 2016. 2016. Chile: Diario Oficial de la República de Chile. 21 de marzo de 2016. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Decreto N° 548 - Aprueba normas para la planta física de los locales educacionales que establecen las exigencias mínimas que deben cumplir los establecimientos reconocidos como cooperadores de la función educacional del estado, según el nivel y modalidad, 2012. 2012. Santiago de Chile, Chile: Diario Oficial de la República de Chile. 9 de julio de 2012 - Ministerio de Educación.
- Decreto N° 594 - Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales en los lugares de trabajo, 2015. 2015. Santiago de Chile, Chile: Diario Oficial de la República de Chile. 24 de enero de 2015. Ministerio de Salud.
- DEPECKER, P., MENEZO, C., VIRGONE, J. y LEPERS, S., 2001. Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment*, vol. 36, no. 5, pp. 627-635. ISSN 03601323. DOI 10.1016/S0360-1323(00)00044-5.
- DOBOS, A.P., 2013. *PVWatts Version 1 Technical Reference* [en línea]. 2013. S.l.: s.n. Disponible en:

- <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60272.pdf>.
- GARCÍA, R. y GONZÁLEZ, A., 2014. Condiciones de forma y desempeño energético de viviendas unifamiliares en el centro - sur de Chile. *Revista INVI*, vol. 29, no. 80, pp. 111-141.
- GARCÍA, R., WEGERTSEDER, P., BAERISWYL, S. y TREBILCOCK, M., 2014. Mapa Energético-Solar de Concepción : Cartografía Urbana del Consumo Energético y Captación Solar en Edificaciones Residenciales de Concepción , Chile. *Norte Grande*, vol. 59, pp. 123-144.
- HACHEM, C., ATHIENITIS, A. y FAZIO, P., 2011. Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. *Solar Energy* [en línea], vol. 85, no. 9, pp. 1864-1877. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2011.04.027. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11001472>.
- HOSES, S., SAN JUAN, G. y ROSENFELD, E., 1999. Estudio comparativo del funcionamiento energético de prototipos edilicios educacionales de la provincia de Buenos Aires. [en línea], Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/1999/1999-t008-a025.pdf>.
- IEA, 2010a. Projected Costs of Generating Electricity. [en línea]. Paris: Disponible en: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/projected_costs.pdf.
- IEA, 2010b. Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy. [en línea]. Paris: Disponible en: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap.pdf.
- IEA, 2011. Clean energy. Progress Report. IEA input to the Clean Energy Ministerial. *Oecd / Iea* [en línea], pp. 67. ISSN 0036-8733. DOI 10.1038/477517a. Disponible en: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CEM_Progress_Report-1.pdf.
- IEA, 2012. IEA SHC Task 41: Solar Energy and Architecture, Report T.41.A.1, Building integration of Solar Thermal and Photovoltaics: barriers, needs, strategies. [en línea], pp. 228. Disponible en: <http://task41.iea-shc.org/publications>.
- JELLE, B.P. y BREIVIK, C., 2012. State-of-the-art Building Integrated Photovoltaics. *Energy Procedia* [en línea], vol. 20, no. 1876, pp. 68-77. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2012.03.009. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610212007394>.
- JIMENÉZ-ESTÉVEZ, G., PALMA-BEHNKE, R., ROMÁN LATORRE, R. y MÓRAN, L., 2015. Heat and Dust. *IEEE power & energy magazine*, no. February, pp. 7.
- KNOWLES, R.L., 2003. The solar envelope: Its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 1, pp. 15-25. ISSN 03787788. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00076-2.
- Ley N° 20.365 - Establece franquicia tributaria respecto de sistemas solares térmicos, 2009. 2009. Santiago de Chile, Chile: Diario Oficial de la República de Chile. 19 de agosto de 2009 - Ministerio de Hacienda.
- Ley N° 20.571 - Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales, 2012. 2012. Santiago de Chile, Chile: Diario Oficial de la República de Chile. 22 de marzo de 2012. Ministerio de Energía.
- Ley N° 20.698 - Propicia la ampliación de la matriz energética, mediante fuentes renovables no convencionales, 2013. 2013. Santiago de Chile, Chile: Diario Oficial de la República de Chile. 22 de octubre de 2013. Ministerio de Energía.
- LUND, P., 2012. Large-scale urban renewable electricity schemes - Integration and interfacing aspects. *Energy Conversion and Management* [en línea], vol. 63, pp. 162-172. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2012.01.037. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.037>.
- MINEDUC, 2014. *Nuevos espacios educativos 2010 - 2013* [en línea]. Santiago de Chile: Ministerio de Educación de Chile. ISBN 978-956-292-463-4. Disponible en: <http://portales.mineduc.cl/usuarios/mineduc/doc/NuevosEspaciosEducativos.pdf>.
- MINEDUC, [sin fecha]. Plan Estratégico de Infraestructura Escolar. . Santiago de Chile:
- MINEDUC y UNESCO, 1999. *Guía de diseño de espacios educativos* [en línea]. Santiago de Chile: UNESCO. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001231/123168s.pdf>.
- MINERGI, 2013. Plan de Acción de Eficiencia Energética 2020. . Santiago de Chile:
- MINERGI, 2014. *Energía 2050 - Política energética de Chile*.pdf. [en línea]. Santiago de Chile: Disponible en: <http://www.energia2050.cl/documentos>.
- MINERGI, [sin fecha]. Programa Techos Solares Públicos. [en línea]. [Consulta: 14 julio 2016]. Disponible en: <http://www.minenergia.cl/techossolares/>.
- MINERGI y GIZ, 2015. Primer Reporte Costos de adjudicación Programa Techos Solares Públicos Licitaciones 2015. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.minenergia.cl/techossolares/wp->

- content/uploads/2015/12/Reporte-de-costos-de-adjudicación-PTSP-2015-2.pdf.
- MINVU, 2013. Estrategia Nacional de Construcción Sustentable. [en línea]. Santiago de Chile: Disponible en: http://csustentable.minvu.cl/wp-content/uploads/2014/11/Estrategia-Construccion-Sustentable_ENERO-2014_VF_Baja.pdf.
- MORALES, L.A., 2012. Arquitectura paramétrica aplicada en envolventes complejas en base a modelos de experimentación en el diseño arquitectónico. *Revista de Arquitectura e Ingeniería* [en línea], vol. 6, pp. 11. ISSN 01887017. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/1939/193926410002.pdf>.
- MUNICIPALIDAD DE VITACURA, 2014. Vitacura, primera comuna en Chile en impulsar desarrollo de energía renovable. [en línea]. [Consulta: 17 julio 2016]. Disponible en: http://www.vitacura.cl/sala_prensa/noticias_detalle/775/vitacura-primera-comuna-en-chile-en-impulsar-desarrollo-de-energia-renovable.
- NEUHOFF, K., 2005. Large-scale deployment of renewables for electricity generation. *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 21, no. 1, pp. 88-110. ISSN 0266903X. DOI 10.1093/oxrep/gri005.
- NREL, 2016a. Energy Analysis. *Distributed Generation Energy Technology Operations and Maintenance Costs* [en línea]. [Consulta: 3 agosto 2016]. Disponible en: http://www.nrel.gov/analysis/tech_cost_om_dg.html.
- NREL, 2016b. Energy Analysis. *Useful life* [en línea]. [Consulta: 3 agosto 2016]. Disponible en: http://www.nrel.gov/analysis/tech_footprint.html.
- OLGYAY, V., 1962. *Design with Climate - Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. New Jersey: Princeton University. ISBN 978-84-252-1488-2.
- PEARCE, J.M., 2002. Photovoltaics - A path to sustainable futures. *Futures*, vol. 34, no. 7, pp. 663-674. ISSN 00163287. DOI 10.1016/S0016-3287(02)00008-3.
- PENG, C., HUANG, Y. y WU, Z., 2011. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 12, pp. 3592-3598. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.09.032.
- PÉREZ-LOMBARD, L., ORTIZ, J. y POUT, C., 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394-398. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- Reglamento de Ley N° 20.571 - Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales, 2014. 2014. Santiago, Chile: Diario Oficial de la República de Chile. 6 de setiembre de 2014. Ministerio de Energía.
- ROBERT MC NEEL & ASSOCIATES, [sin fecha]. Grasshopper. [en línea]. [Consulta: 25 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.grasshopper3d.com>.
- RUTTEN, D., 2010. Evolutionary Principles applied to Problem Solving. [en línea]. [Consulta: 17 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.
- SADEGHIPOUR, M., 2016. food 4 Rhino. *Ladybug + Honeybee* [en línea]. [Consulta: 20 julio 2016]. Disponible en: <http://www.food4rhino.com/project/ladybug-honeybee?ufh>.
- SADEGHIPOUR, M., [sin fecha]. *Ladybug Primer* [en línea]. S.l.: GitBook. Disponible en: <https://www.gitbook.com/book/mostapharoudsari/ladybug-primer/details>.
- SADEGHIPOUR, M. y PAK, M., 2013. Ladybug: a Parametric Environmental Plugin for Grasshopper To Help Designers Create an Environmentally-Conscious Design. *13th Conference of International Building Performance Simulation Association* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 3129 - 3135. Disponible en: http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2013/p_2499.pdf.
- SAKAMOTO, T. y FERRÉ, A. (eds.), 2008. *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture*. S.l.: Actar-D. ISBN 978-8496540798.
- SALCEDO, P., 2012. Análisis Paramétrico de Volúmenes Arquitectónicos con Algoritmos Genéticos. *Hábitat Sustentable*, vol. 2, pp. 47-58.
- SANCHEZ, S. y SWEENEY, S., 2010. LED vs T5 Technology: The Advantages and Disadvantages. [en línea], no. Winter 2006. Disponible en: <http://lumiversal.net/upload/T5 v. LED.pdf>.
- SMUTS, C., 2012. food 4 Rhino. *Centipede* [en línea]. [Consulta: 20 julio 2016]. Disponible en: <http://www.food4rhino.com/project/centipede?ufh>.
- SUI, J. y MUNEMOTO, J., 2007. Shape Study on a Green Roof Integrated Photovoltaic System for Bi-objective Optimization of Investment Value and CO2 Emission. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 307-314. ISSN 1346-7581. DOI 10.3130/jaabe.6.307.

- SYNERGY, 2016. Solar Insolation Tool. [en línea]. [Consulta: 12 mayo 2016]. Disponible en:
http://www.synergyenviro.com/tools/solar_insolation.asp.
- TRIPATHY, M., SADHU, P.K. y PANDA, S.K., 2016. A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 61, pp. 451-465. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2016.04.008. Disponible en:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116300259>.
- TRONCOSO, L., GARCÍA, R., NOPE, A. y ARELLANO, R., 2015. Mansardas solares por optimización paramétrica y fabricación digital para viviendas NZE. *Blucher Design Proceedings*, vol. 2, no. 3, pp. 317-321.
- TUHUS-DUBROW, D. y KRARTI, M., 2010. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment* [en línea], vol. 45, no. 7, pp. 1574-1581. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2010.01.005. Disponible en:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132310000077>.
- UBB y UC, 2014. *Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones*. CITEC, UBB. S.l.: s.n. ISBN 9789569275272.
- UN, 2014. *World Urbanization Prospects* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9789211515176. Disponible en:
<http://esa.un.org/unpd/wup/highlights/wup2014-highlights.pdf>.
- WIGINTON, L.K., NGUYEN, H.T. y PEARCE, J.M., 2010. Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems* [en línea], vol. 34, no. 4, pp. 345-357. ISSN 01989715. DOI 10.1016/j.compenvurbsys.2010.01.001. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.01.001>.
- WOODHOUSE, S. y MEISEN, P., 2011. Renewable Energy Potential of Chile. [en línea], no. August, pp. 35. Disponible en: [http://www.geni.org/globalenergy/research/renewable-energy-potential-of-chile/Chile 2020 Report II PBM final.pdf](http://www.geni.org/globalenergy/research/renewable-energy-potential-of-chile/Chile%202020%20Report%20II%20PBM%20final.pdf).
- ZALAMEA, E. y GARCÍA, R., 2014. Roof characteristics for integrated solar collection in dwellings of Real-Estate developments in Concepción, Chile. *Revista de la Construcción Journal of Construction*, vol. 36, no. 133, pp. 36-44. ISSN 0718-915X.

Abreviaciones y acrónimos

ACESOL	Asociación Chilena de Energía Solar
ACHEE	Agencia Chilena de Eficiencia Energética
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i> (Estados Unidos)
CCHC	Cámara Chilena de la Construcción
CDT	Corporación de Desarrollo Tecnológico (Chile)
CITEC	Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (UBB)
DECON	Dirección de Extensión en Construcción (UC)
GIZ	<i>Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i> (Alemania)
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MINEDUC	Ministerio de Educación de Chile
MINERGA	Ministerio de Energía de Chile
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (Estados Unidos)
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
UBB	Universidad del Bío-Bío (Chile)
UC	Universidad Católica (Chile)
UN	<i>United Nations</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UTFSM	Universidad Técnica Federico Santa María (Chile)

Anexo A. Catastro de establecimientos educacionales en la comuna de Concepción

Se presenta el catastro de los 83 establecimientos educacionales identificados en la comuna de Concepción. Los valores de superficie de cubierta, son los reales identificados mediante caracterización, antes de prorratear según la distribución porcentual de la muestra relevada.

Nº	Código	Nombre	Nivel	Dependencia	Dirección	Superficie cubierta m2
J Jardines y salas cuna						
1	J01	Juan Pablo Li	SC,J	AD	Janequeo 454	236
2	J02	El Chañar	SC,J		Aníbal Pinto 1860	716
3	J03	Pedro de Valdivia	J	AD	Las Canchas N/S	744
4	J04	Palomares	SC,J		Avda. Giacaman 127	260
5	J05	Los aromos	J		Pasaje Prieto 2020	375
6	J06	Jorge Montt	SC,J		Calle Jorge Montt 2498	412
7	J07	Costanera Sur			Rancagua 219	913
8	J08	María del Carmen Cárdenas		AD	Río Laja 1296	638
9	J09	Los duendecitos traviosos			Manuel Gutiérrez 1745	202
E Escuelas						
10	E01	Escuela Diego Portales	P,B	M	Avda. Principal 364	2.211
11	E02	Escuela Básica Rene Louvel Bert	P,B	M	Avenida Collao 1165	1.742
12	E03	Escuela Luis Alfredo Muñoz Burboa	P,B	M	Michimalongo 22	699
13	E04	Escuela Oscar Castro Zuñiga	P,B	M	Zanartu 167	885
14	E05	Escuela Esther Hunneus De Claro	P,B	M	José Del Carmen Soto 2895	1.772
15	E06	Escuela Especial Chile España	E	M	Pedro De Valdivia 651	1.654
16	E07	Escuela Parvularia Blanca Estela	P	M	Ejercito 1065	975
17	E08	Escuela Palestina De Palomares	P,B	M	Avenida Nonguen 776	438
18	E09	Escuela Santa Catalina De Siena	P,B	PS	Errázuriz 43	1.520
19	E10	Escuela Luis Cruz Ocampo			Diego de Almagro	1741
L Liceos						
20	L01	Liceo de niñas	M	M	Rengo 249	3.596
21	L02	Liceo Andalien	M	M	Martínez de Rozas 1445	2.505
22	L03	Liceo Enrique Molina Garmendia	B,M	M	Aníbal Pinto 31	5.658
23	L04	Liceo José Manuel Balmaceda	B,M (a)	M	Ejército 899	2.167
24	L05	Liceo Lorenzo Arenas Olivo	M	M	Cuarto Centenario 215	3.329
25	L06	Liceo Juan Martínez de Rozas	B,M		Caupolicán 955	3.203
26	L07	Liceo República de Ecuador	P,B,M		Pedro de Valdivia 1111	1.147
27	L08	Liceo Domingo Santa María	P,B,M		Santa María 2350	-
28	L09	Liceo República de Israel	P,B,M		Juan Martínez De Rozas 1645	2.426
29	L10	Liceo Rebeca Matte Bello	P,B,M		Castellón 1603	985
30	L11	Liceo Lucero González	P,B,M		Cno Nonguen Villa Nonguen 1273	756
31	L12	Liceo Técnico femenino A29	M		Víctor Lamas 567	3.690
32	L13	Liceo San Agustín De Concepción	P,B,M		Tucapel 219	2.978
33	L14	Liceo Enrique Oyarzun Moncada	M		Caupolicán 201	2.177
34	L15	Liceo Femenino De Concepción	M		Las Heras 355	1.827
35	L16	Liceo Industrial De Concepción	M		Avenida Collao 1602	4956

36	L17	Liceo Jorge Sánchez Ugarte	B,M		Juan De Dios Rivera 1821	4235
C Colegios						
37	C01	Colegio Lucila Godoy Alcayaga	P,B,M	M	Rengo 65	1.840
38	C02	Colegio República de Brasil	P,B,M	M	San Martín Esq. Galvarino	3.408
39	C03	Colegio Marina de Chile	P,B,M	M	Marina De Chile 2836	1.738
40	C04	Colegio Gran Bretaña	P,B,M	M	Bulnes 760	1.406
41	C05	Colegio España	P,B,M	M	Av. Roosevelt 1596	2.022
42	C06	Colegio Juan Gregorio Las Heras	P,B,M	M	Orompello 980	3.420
43	C07	Colegio Bío-Bío	P,B,E	M	Chacabuco 610	1.099
44	C08	Colegio Charles de Gaulle	P,B,M	PNS	Colo Colo 51	4.731
45	C09	Instituto de Humanidades Alfredo Silva	P,B,M	PNS	Colo Colo 24	5.421
46	C10	Colegio Particular Alonso De Ercilla	P,B	PS	Rancagua 114	405
47	C11	Colegio Inmaculada Concepción	P,B,M	PS	Aníbal Pinto 340	3.670
48	C12	Colegio Carmela Romero De Espinosa	P,B,M	PS	Freire 114	2.835
49	C13	Colegio Adventista De Concepción	M	PS	Freire 240	952
50	C14	Colegio Adventista	B	PS	Angol 780	988
51	C15	Colegio Del Sagrado Corazón	P,B,M	PS	Maipú 349	3.661
52	C16	Colegio Metodista Concepción	P,B,M	PS	Colo Colo 760	1.172
53	C17	Colegio San Pedro Nolasco	P,B,M	PNS	Freire 959	4.916
54	C18	Colegio La Providencia	P,B,M	PS	Lautaro 487	4.009
55	C19	Colegio Salesiano Domingo Savio	P,B,M	PS	Avenida San Juan Bosco Nº 140	7.672
56	C20	Colegio Bautista De Concepción	P,B,M	PNS	Hipólito Salas 1041	1.899
57	C21	Colegio María Inmaculada	P,B,M	PS	Gral. Cruz 250	8.584
58	C22	Colegio Santa Eufasia	P,B,M	PS	Lientur 1046	6.197
59	C23	Colegio Camilo Henríquez	P,B	PS	Pelantaro 1091	2.726
60	C24	Colegio Alerce	B,M	PS	Temístocles Rojas 497 Pedro Del Río	3.687
61	C25	Colegio el Faro		PS	Baldomero Sánchez 257	1.345
62	C26	Colegio Santa Luisa De Concepción	P,B,M	PS	Arturo Prat 2673	2.107
63	C27	Colegio Técnico Profesional Los Acacios	B,M	PS	Av. Vicuña Mackenna 1442	3.283
64	C28	Colegio Creación Concepción	P,B,M	PS	Arturo Pérez Canto, Villa Huáscar 902	2.524
65	C29	Colegio Santa Sabina	P,B,M	PS	Villa Universidad De Concepción 1477	2.995
66	C30	Colegio Padre Luis Amigo	B,M	PS	Paicavi 3117	2.110
67	C31	Kingston College			Ramón Carrasco 366	3.846
U Universidades						
68	U01	Universidad del Bío-Bío	S		Avda. Collao Nº 1202	32.543
69	U02	Universidad de Concepción	S		Víctor Lamas 1290	75.635
70	U03	Universidad Católica	S		Alonso de Ribera 2850	16.242
71	U04	Universidad Bolivariana - Paicaví	S		Tucapel Nº 3158, Valle Escondido	4.975
72	U05	Universidad Bolivariana - Orompello	S		Orompello Nº 235	638
73	U06	Universidad San Sebastián	S		Lientur 1457	10.985
74	U07	DUOC UC	S		Paicaví 3280	6.073
75	U08	Universidad de las Américas	S		Chacabuco 539	3.340
76	U09	Universidad Santo Tomás	S		Avenida Prat 879	3.346
77	U10	Universidad del Desarrollo	S			3.668
I Institutos y otros						
78	I01	Centro de formación técnica Crecic			Janequeo 454	691
79	I02	INFOCAP			Los Carrera 179	1.801
80	I03	Instituto Profesional Virgilio Gómez	S		Arturo Prat 193	2.586
81	I04	Instituto profesional AIEP	S		Barros Arana 302	1.072
82	I05	Centro de Educación Especial			Manuel Bulnes 1655	888
83	I06	Centro Artístico y Cultural			Rengo 269	307

Referencias nivel: SC Sala Cuna, J Jardín, P Parvulario, B Básico, M Medio, S Superior, E Especial, (a) Adultos

Referencias dependencia: AD Administración Directa, M Municipal, PS Particular Subvencionado, PNS Particular no subvencionado

Anexo B. Detalle de metodología de caracterización formal

Se presentan los detalles de la metodología de caracterización formal utilizada, aplicada a uno de los ejemplos estudiados. Para la caracterización de polígonos, se utilizaron varias herramientas combinadas, buscando lograr la mayor precisión posible. Se utilizaron imágenes satelitales georeferenciadas escala 1:10.000 con corrección ortométrica -corrigiendo la perspectiva de las imágenes aéreas-, provistas por el Laboratorio de Estudios Urbanos [LEU] de la UBB. Logrando mayor precisión en la identificación de polígonos, como puede verse en el comparativo de abajo.



Imagen satelital *Google Maps*



Imagen satelital con corrección ortométrica LEU-UBB

Esta información, se complementa con imágenes 3D obtenidas de *Google Maps*, donde puede encontrarse un mapeo completo 3D de la ciudad de Concepción. Estas imágenes -a continuación-, permiten recorrer la volumetría exterior del establecimiento y se utilizan para identificar número de plantas, tipo de cubierta y detalles de programas particulares en los establecimientos.



Google Maps 3D - Vista Sur



Google Maps 3D - Vista Norte

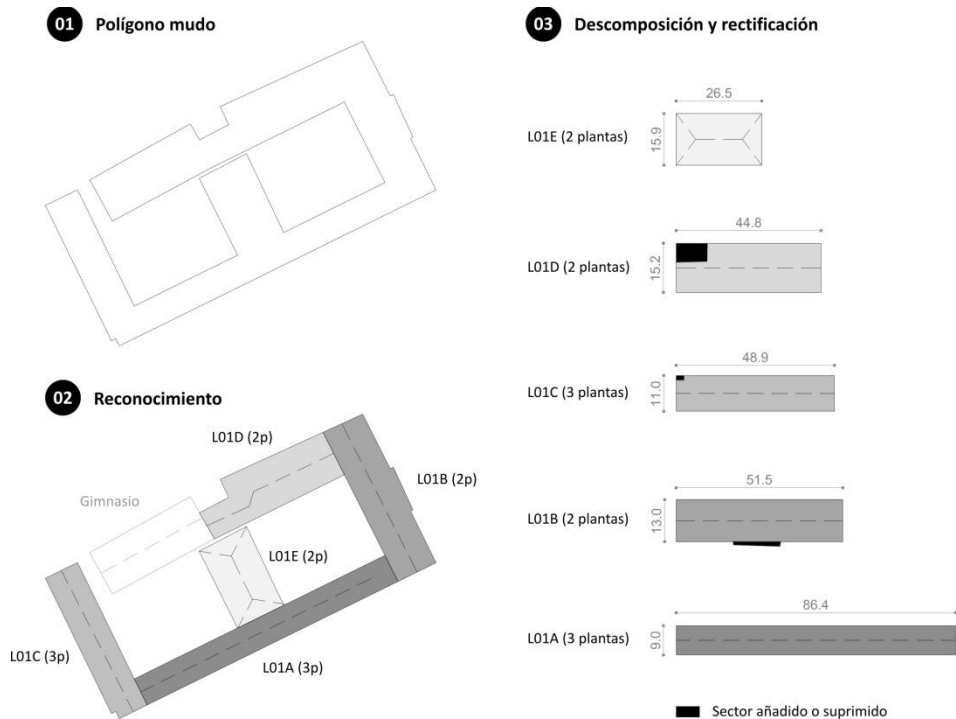


Google Street View - Vista SSO



Google Street View - Vista ESE

Otra herramienta utilizada son las imágenes de calle, obtenidas con *Google Street View* -arriba-, que permiten ajustar detalles, programas y complementar la información en general.



La información integrada, se utiliza para reconocer los polígonos de cada establecimiento -arriba-, a partir de un polígono mudo, obtenido de antecedentes. La descomposición se realiza considerando los volúmenes que se reconocen con predominancia de aulas. Los polígonos obtenidos se rectifican -añadiendo o suprimiendo desviaciones geométricas-, para asimilarlos a rectángulos de dimensiones características representativas; desde donde se caracterizan.

Anexo C. Estimación de carga eléctrica en Escuela Rene Louvel Bert

Se presenta el análisis de estimación de carga realizado para la Escuela Rene Louvel Bert, en base a visitas a las instalaciones y consultas a informantes calificados. Durante las visitas, realizadas junto con personal de mantención del establecimiento, se consultaron las horas de uso de los locales y artefactos, en un día promedio de julio y diciembre. Mediante la estimación se obtuvieron resultados de consumo eléctrico de 4308 kWh en Julio y 1995 kWh en Diciembre; aproximados a los registros de facturación, que presentan un consumo de 4377 y 2446 kWh, respectivamente.

Local	Cant. u	Item	Cant. u	Potencia W	Uso		Consumo	
					Horas-día		kWh-día	
					JUL	DIC	JUL	DIC
Comedor y cocina	1	Tubo fluorescente	38	28	5,0	0,0	5,3	0,0
		Microondas	1	1.200	0,5	0,5	0,6	0,6
		Refrigerador	3	20	24,0	24,0	1,4	1,4
		Refrigerador industrial	1	370	24,0	24,0	8,9	8,9
		Congelador horizontal	1	29	24,0	24,0	0,7	0,7
		Campana de extracción	1	250	5,0	5,0	1,3	1,3
SSHH	2	Tubo fluorescente	12	28	1,0	1,0	0,7	0,7
SSHH profesores	1	Tubo fluorescente	2	28	1,0	1,0	0,1	0,1
		Lámpara dicroica	4	100	1,0	1,0	0,4	0,4
		Termo-acumulador	2	3.000	4,0	2,0	24,0	12,0
Aula tecnológica	1	Tubo fluorescente	20	28	5,0	0,0	2,8	0,0
Multi-taller	1	Tubo fluorescente	26	28	5,0	0,0	3,6	0,0
Prekinder y kinder	1	Lámpara incandescente	22	60	5,0	0,0	6,6	0,0
		Lámparas bajo consumo	3	10	5,0	0,0	0,2	0,0
		PC	2	390	1,0	1,0	0,8	0,8
		Equipo de audio	2	100	1,0	1,0	0,2	0,2
SSHH Kinder	1	Tubo fluorescente	4	28	1,0	1,0	0,1	0,1
Secretaría	1	Tubo fluorescente	9	28	8,0	8,0	2,0	2,0
		PC	3	390	8,0	8,0	9,4	9,4
		Impresora	1	300	8,0	8,0	2,4	2,4
Sala diferencial	1	Tubo fluorescente	2	28	5,0	0,0	0,3	0,0
Baños secretaría	3	Lámpara dicroica	2	100	1,0	1,0	0,6	0,6
Oficina inspector	1	Tubo fluorescente	3	28	8,0	8,0	0,7	0,7
		PC	1	390	8,0	8,0	3,1	3,1
Oficina director	1	Tubo fluorescente	6	28	8,0	8,0	1,3	1,3
		PC	1	390	8,0	8,0	3,1	3,1

Materiales didácticos	1	Tubo fluorescente	3	28	5,0	0,0	0,4	0,0
		Fotocopiadora grande	1	1.500	0,5	0,5	0,8	0,8
Sala de profesores	1	Tubo fluorescente	16	28	4,0	0,0	1,8	0,0
		TV	1	70	1,0	1,0	0,1	0,1
		PC	2	390	1,0	1,0	0,8	0,8
		Impresora	1	300	0,1	0,1	0,0	0,0
		Refrigerador doméstico	1	20	24,0	24,0	0,5	0,5
		Microondas	2	1.200	0,3	0,3	0,6	0,6
		Hervidor	1	1.200	0,5	0,5	0,6	0,6
		Cafetera	1	1.200	0,5	0,5	0,6	0,6
		Termoacumulador	1	2.000	4,0	2,0	8,0	4,0
		Tostadora	1	900	0,2	0,2	0,2	0,2
Portería	1	Tubo fluorescente	4	28	5,0	0,0	0,6	0,0
		Calefactor de cuarzo	1	1.600	5,0	0,0	8,0	0,0
Circulación	1	Tubo fluorescente	48	28	5,0	0,0	6,7	0,0
Salas de clase	16	Tubo fluorescente	12	28	5,0	0,0	26,9	0,0
		Proyector	1	480	0,2	0,2	1,5	1,5
		PC	1	390	0,2	0,2	1,2	1,2
Aula música	1	Tubo fluorescente	12	28	3,5	0,0	1,2	0,0
Biblioteca	1	Tubo fluorescente	16	28	8,0	0,0	3,6	0,0
		PC	2	400	8,0	8,0	6,4	6,4
		Impresora	1	300	0,2	0,2	0,1	0,1
		Caloventilador	1	1.300	8,0	0,0	10,4	0,0
Sala informática	1	Tubo fluorescente	12	28	5,0	0,0	1,7	0,0
		PC	29	390	2,0	2,0	22,6	22,6
		Proyector	1	480	0,5	0,5	0,2	0,2
		Impresora	2	300	0,5	0,5	0,3	0,3
		Ventilador techo	1	70	0,0	7,0	0,0	0,5
Bodega general	1	Tubo fluorescente	2	28	1,0	0,0	0,1	0,0
Circulación	1	Tubo fluorescente	68	28	5,0	0,0	9,5	0,0
Consumo por rubro	Iluminación				39%	6%	77,1	5,9
	Agua caliente				16%	18%	32	16
	Equipos informáticos				26%	55%	50,2	50,2
	Otros equipos eléctricos				19%	21%	36,5	18,6
Consumo Total	Diario				kWh-día		195,8	90,7
Consumo Total	Mensual (en base 22)				kWh-mes		4307,6	1995,4

