

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS DE CAMINS, CANALS I PORTS



PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

MODELO INTEGRADO DE VALOR
PARA ESTRUCTURAS SOSTENIBLES

DOCTORANDA
DEISSY BIBIANA ALARCÓN NÚÑEZ

DIRECTOR DE TESIS
ANTONIO AGUADO DE CEA
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

CODIRECTOR DE TESIS
ALEJANDRO JOSA GARCÍA - TORNEL
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Barcelona, Diciembre 2005

RESUMEN

La incapacidad de predecir de manera confiable el funcionamiento de las edificaciones industriales, constituye hoy día un problema de planificación en el diseño. Esta carencia se ve reflejada en la generación de residuos, en la energía contenida en los materiales, en los costes generados, entre otros. Para evitar dicha problemática, se hace necesario optimizar la selección de soluciones en la etapa de diseño a través de un "índice de valor " definido como la medida de una solución respecto al beneficio obtenido y los recursos consumidos.

El *objetivo* de esta tesis se centra en la obtención de una metodología y una herramienta de toma de decisión que sirvan para definir un "*índice de valor*" y de esta forma de evaluar la sostenibilidad de un edificio industrial.

Para alcanzar dicho objetivo, se parte del modelo conceptual formado por tres ejes: *requerimientos, componentes y ciclo de vida*. (1) En el eje de requerimientos se definen los objetivos y necesidades que se deben cumplir en la edificación. (2) En el eje de los componentes se definen los diferentes sistemas que forman el edificio industrial (explanación, cimentación,). (3) En el eje ciclo de vida se constituye la vertiente temporal del proyecto. A partir de la intersección de estos ejes, se inicia la valoración.

Para llevar a cabo dicha valoración, la metodología ejecuta un proceso de seis etapas: ponderación en cada nivel de jerarquía, calificación de la respuesta de la alternativa respecto a un indicador, construcción de la función de valor, cálculo del valor de las alternativas , cálculo de la alternativa óptima y análisis de sensibilidad. A su vez, cada una de estas etapas se sustentan en distintas herramientas matemáticas como el Analytical Hierarchy Process (A.H.P.) dando soporte riguroso al método.

Por su parte, los puntos a destacar de la metodología son: la evaluación sostenible de grandes naves industriales, la integración de los pilares sostenibles, el diseño de una única función matemática (función de valor) a través de la cual se representa de manera fácil, simple y rápida las preferencias del decisor, y la ponderación escalonada para cada nivel de jerarquía.

Para comprobar el alcance de la propuesta, se desarrolla un caso práctico para la construcción de una terminal de autobuses en el cual se justifica la eficiencia del método. Como *conclusión*, esta metodología supone una ayuda significativa al sector de la construcción en el análisis de valor y la toma de decisión.

*La sabiduría suprema es tener sueños bastante grandes
para no perderlos de vista mientras se persiguen.*

William Faulkner

*A mis padres:
Plinio y Lydia por sus múltiples consejos, su sabiduría e infinito apoyo
A mis hermanas
Patty, Sandra y Paola por su cariño y comprensión
A Iván
por compartir y perseguir junto a mí, nuestros sueños*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi director de tesis el profesor Antonio Aguado ("Profe Antonio") quien con su infinita paciencia, su gran sabiduría y su enorme corazón logró impulsar y orientar este trabajo de investigación.

En segundo lugar y no por ello menos importante, quiero agradecer a mi codirector de tesis el profesor Alejandro Josa quien con su capacidad de análisis, sus valiosos aportes y continua colaboración logró abordar de manera acertada esta tesis.

Debo también un especial agradecimiento al grupo de investigación "MIVES" conformado por miembros de la Universidad Politécnica de Cataluña, miembros de la Universidad del País Vasco y el Centro tecnológico LBEIN. De la conformación de este grupo cabe destacar no solo los vínculos académicos creados, sino los lazos de amistad nacidos durante el desarrollo del proyecto. Quiero hacer una mención especial a mis compañeros Resmundo Manga e Isaac Garrucho por el apoyo y ayuda brindada en los momentos difíciles.

También me gustaría agradecer al Profesor Gaizka Ormazábal por su apoyo y aliento en la conformación de este proyecto. Al profesor Pere Alavedra por la colaboración y orientación durante la elaboración del caso práctico.

Quisiera también incluir en este apartado a mis compañeros de doctorado en Ingeniería Civil y por su puesto, a mis compañeros de despacho ya que gracias a su solidaridad, candidez y consejos hicieron de este tiempo algo indescriptible. Agradezco igualmente a mi amiga Erika Zulema Calvo por su incondicional amistad, sus enseñanzas y los grandes momentos vividos.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido a mi formación y desarrollo profesional y personal.

CONTENIDO DE LA TESIS

Resumen.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Contenido.....	iv
Lista de figuras.....	xii
Lista de tablas.....	xvi

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación y contexto de la tesis.....	1
1.2. Objetivos de la tesis.....	4
1.3. Objetivos específicos	5
1.4. Alcance.....	6
1.5. Estructura de la tesis.....	6

CAPITULO 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Introducción.....	9
2.2. Sostenibilidad y construcción sostenible.....	11
2.2.1. Desarrollo sostenible.....	11
2.2.2. El concepto de la construcción sostenible y sus pilares.....	12
2.2.3. Diseño para un edificio sostenible a través de su ciclo de vida.....	15
2.3. Evaluación de la sostenibilidad en el edificio industrial.....	16
2.3.1. Planteamiento sobre la toma de decisión.....	16

2.3.1.1. Generalidades.....	16
2.3.1.2. Elementos básicos del problema de decisión.....	17
2.3.1.3. Etapas de la toma de decisión para dar solución a un problema.....	18
2.3.1.4. Construcción de los criterios de decisión.....	18
2.3.1.5. Determinación de la importancia relativa de los criterios.....	19
2.3.1.6. Métodos analíticos de toma de decisión.....	21
2.3.1.6.1. De acuerdo a la información sobre preferencias.....	23
2.3.1.6.2. De acuerdo al número de alternativas	27
2.4. La función de valor.....	30
2.4.1. Concepto y generalidades.....	30
2.4.2. Condiciones de la existencia de la función de valor.....	31
2.4.3. Selección de la forma adecuada a partir de la estructura preferencial.....	33
2.4.4. Construcción de la función de valor.....	34
2.4.4.1.Total Implied Value “methods”.....	34
2.4.4.2. Método de la bisección.....	34
2.4.4.3. Método de las diferencias iguales.....	35
2.4.4.4. Método de RIOS y YU.....	35
2.4.4.5. Método convencional.....	37
2.4.4.6. BRLT (Basic Referente Lotery).....	38
2.4.4.7. A fuzzy stochastic technique for projects selection.....	39
2.5. Selección de la mejor alternativa.....	41
2.5.1. El criterio mini-max o pesimista.....	41
2.5.2. El criterio optimista.....	41
2.5.3. El criterio de Hurwicz.....	41
2.5.4. El criterio de Savage.....	42

2.5.5. El criterio de Laplace.....	42
2.5.6. El criterio del valor esperado.....	42
2.6. Herramientas Existentes para la evaluación multicriterio.....	43
2.6.1. Herramientas a nivel general.....	43
2.6.1.1. Metodología PRES II MULTIEPERTO.....	43
2.6.1.2. Generic Multi-attribute Analysis System (GMMA).....	44
2.6.1.3. TOMASO.....	45
2.6.1.4. Expert choice.....	45
2.6.1.5. Super decisión software.....	46
2.6.1.6. A multicriteria decisión model to compute optimal treatment packages.....	46
2.6.2. Herramientas en el entorno sostenible.....	46
2.6.2.1. BREEAM.....	48
2.6.2.2. GB Tool.....	48
2.6.2.3. GB Tool Español.....	48
2.6.2.4. LEED.....	48
2.7. Síntesis del estado del conocimiento.....	49

CAPÍTULO 3: MARCO CONCEPTUAL. ANALISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO INDUSTRIAL SOSTENIBLE.

3.1. Introducción.....	51
3.2. Decisión a tomar y alternativas a estudiar.....	53
3.2.1. Decisión a tomar.....	53
3.2.2. Alternativas a estudiar.....	55
3.3. Análisis (Modelo).....	57
3.3.1. Eje de requerimientos.....	57
3.3.1.1. Descripción del despliegue del árbol de requerimientos.....	60

3.3.1.2. Indicadores. Base de la medición.....	61
3.3.2. Eje de componentes.....	62
3.3.3. Eje del ciclo de vida o del horizonte temporal.....	63
3.4. Evaluación (metodología).....	64
3.4.1. Ponderación para requerimientos, criterios e indicadores.....	66
3.4.2. Parámetro de respuesta de la alternativa i respecto a un indicador.....	72
3.4.2.1. Medida probabilística de la alternativa i respecto al indicador j	72
3.4.2.2. Riesgo total de la alternativa i respecto al indicador j.....	73
3.4.2.3. Precauciones del parámetro de respuesta de al alternativa i	74
3.4.3. Construcción de la función de valor.....	75
3.4.3.1. Definición.....	75
3.4.3.2. Características de la función de valor.....	77
3.4.3.3. Parámetros que determinan la ecuación de valor.....	81
3.4.3.4. Función de valor a partir de un grupo de usuarios.....	82
3.4.3.5. Precauciones de la función de valor.....	82
3.4.4. Cálculo del valor de las alternativas.....	83
3.4.4.1. Cálculo de valor a nivel de indicadores.....	83
3.4.4.2. Cálculo de valor a nivel de criterios.....	84
3.4.4.3. Cálculo de valor a nivel de requerimientos.....	84
3.4.5. Cálculo de la alternativa óptima.....	85
3.4.6. Análisis de sensibilidad de los resultados.....	86
3.4.6.1. Sensibilidad de la evaluación de las alternativas respecto a la cantidad de indicadores, criterios o requerimientos.....	86
3.4.7. Recomendaciones y toma de decisión.....	89
3.5. Control.....	90

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS VARIABLES PARA LA TOMA DE DECISIÓN EN EL EDIFICIO INDUSTRIAL.

4.1. Introducción.....	91
4.2. Análisis.....	92
4.2.1. Descripción del árbol de requerimientos.....	95
4.2.1.1. Plano medioambiental.....	95
4.2.1.1.1. Consumo de energía.....	95
4.2.1.1.2. Utilización de materiales reciclados.....	96
4.2.1.1.3. Uso de materiales locales.....	97
4.2.1.1.4. Gestión de residuos.....	97
4.2.1.2. Requerimiento económico.....	98
4.2.1.2.1. Costes.....	98
4.2.1.2.2. Financiación.....	99
4.2.1.3. Requerimiento estético.....	99
4.2.1.3.1. Calidad de la edificación.....	100
4.2.1.3.2. Integración urbana.....	101
4.2.1.4. Requerimiento social.....	101
4.2.1.4.1. Integración con el entorno social	102
4.2.1.4.2. Calidad en el ambiente interior... ..	102
4.2.1.5. Requerimiento funcional.....	103
4.2.1.5.1. Constructibilidad.....	104
4.2.1.5.2. Movilidad.....	104
4.2.1.5.3. Modificabilidad y flexibilidad.....	105
4.3. Creatividad.....	105
4.4. Evaluación.....	106

4.2.1. Estimación de pesos.....	106
4.2.2. Respuesta de la alternativa y función de valor del indicador	107
4.4.2.1. Energía en proceso de fabricación.....	107
4.4.2.2. Consumo energético previsto.....	110
4.4.2.3. Uso de materiales reciclados.....	112
4.4.2.4. Uso de materiales fácilmente reciclables.....	115
4.4.2.5. % de materiales usados o extraídos del lugar.....	116
4.4.2.6. % de reciclaje de los residuos de construcción y demolición.....	117
4.4.2.7. Coste de ejecución.....	118
4.4.2.8. Coste de mantenimiento.....	122
4.4.2.9. Valor Presente Neto.....	122
4.4.2.10. Tasa Interna de Retorno.....	123
4.4.2.11. Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta.....	125
4.4.2.12. Factor forma.....	126
4.4.2.13. Grado de adaptabilidad al entorno.....	127
4.4.2.14. Nivel de adaptación social del proyecto respecto a terceros	127
4.4.2.15. Nivel de adecuación de los servicios auxiliares para el personal.....	128
4.4.2.16. Confort térmico.....	128
4.4.2.17. Confort acústico	130
4.4.2.18. Confort lumínico.....	131
4.4.2.19. Grado de simplicidad del proceso constructivo.....	132
4.4.2.20. Grado de adecuación al proceso productivo.....	132
4.4.2.21. Facilidad de enlace con el exterior.....	133
4.4.2.22. Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio.....	133
4.4.2.23. Facilidad de ampliación respecto al edificio y al terreno.....	135

CAPÍTULO 5. MARCO INFORMÁTICO AMIGABLE

5.1. Introducción.....	137
5.2. Generalidades.....	138
5.3. Estructura de la herramienta.....	140
5.3.1. Pantalla de presentación.....	140
5.3.2. Sección 1: Datos de entrada.....	140
5.3.3. Sección 2: Definición del alcance.....	142
5.3.4. Sección 3: Definición del árbol de requerimientos.....	144
5.3.5. Sección 4: Evaluación.....	146
5.3.5.1. Evaluación a nivel de indicadores.....	147
5.3.5.2. Evaluación a nivel de criterios.....	155
5.3.5.2. Evaluación a nivel de requerimientos.....	156
5.3.6. Sección 5: Resultados.....	158
5.4. Aplicaciones de la herramienta.....	160
5.5. Limitaciones.....	161
5.6. Futuros avances de la herramienta.....	161

CAPÍTULO 6. CASO PRÁCTICO: ESTUDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA TERMINAL Y REPARACIÓN DE AUTOBUSES.

6.1. Introducción.....	163
6.2. Estudio Para la construcción de una terminal de autobuses.....	163
6.2.1. Descripción del problema.....	163
6.2.2. Planteamiento para la solución del problema con aplicación de la metodología.....	168
6.2.2.1. Análisis.....	168

6.2.2.2. Creatividad.....	171
6.2.2.3. Evaluación.....	172
6.2.2.3. Control.....	201

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. Introducción.....	202
7.2. Conclusiones generales.....	203
7.3. Conclusiones específicos.....	204
7.3.1. Conclusiones acerca del estado de conocimiento.....	204
7.3.2. Conclusiones acerca del marco conceptual.....	204
7.3.3. Conclusiones acerca de la caracterización de las variables del edificio industrial...	205
7.3.4. Conclusiones acerca del marco informático amigable.....	206
7.3.5. Conclusiones acerca de la aplicación de la metodología y herramienta en un caso práctico	206
7.4. Futuras líneas de investigación.....	207
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	209

ANEXOS

ANEXO A.	Proceso analítico de jerarquización (A.H.P)
ANEXO B.	Método ELECTRE
ANEXO C.	Herramientas Multicriterio en el entorno sostenible
ANEXO D.	Criterios de selección.
ANEXO E.	Sistemas de apoyo a la decisión.
ANEXO F.	Aplicación informática de la herramienta

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1. Diagrama del ciclo de vida
- Figura 2.2. Visualización gráfica del método de las distancias.
- Figura 2.3. Metodología PRES II MULTIEXPERTO
- Figura 3.1. Niveles de decisión
- Figura 3.2. Tipo de decisión
- Figura 3.3. Ejemplo de la concatenación de las decisiones
- Figura 3.4. Proceso de toma de decisión para el edificio industrial
- Figura 3.5. Visualización del alcance del proyecto
- Figura 3.6. Esquema del árbol de requerimientos
- Figura 3.7. Eje de requerimientos para el edificio industrial
- Figura 3.8. Despliegue del árbol de requerimientos
- Figura 3.9. Los componentes del edificio industrial
- Figura 3.10. Las fases y procesos del ciclo de vida
- Figura 3.11. Diagrama de evaluación
- Figura 3.12. Asignación de pesos en cada nivel de jerarquía
- Figura 3.13. Respuesta de la alternativa con varias funciones de probabilidad
- Figura 3.14. Ascendencia o descendencia de la función
- Figura 3.15. Indicador con 2 puntos de mínima satisfacción
- Figura 3.16. Redefinición del indicador
- Figura 3.17. Elección de puntos de mínima y máxima satisfacción
- Figura 3.18. Formas que puede adoptar la función de valor.
- Figura 3.19. Función de valor a partir de un grupo de decisores
- Figura 3.20. Inconvenientes de los puntos de mínima y máxima satisfacción.

- Figura 3.21 Curva que refleja la dilución de indicadores, criterios o requerimientos.
- Figura 4.1. Función de valor para el indicador $I_2C_1R_1$.
- Figura 4.2. Función de valor para el hormigón reciclado.
- Figura 4.3. Función de valor para el acero.
- Figura 4.4. Función de valor para el indicador $I_1C_3R_1$.
- Figura 4.5. Función de valor para el indicador $I_1C_4R_1$.
- Figura 4.6. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$.
- Figura 4.7. Función de valor para el indicador $I_2C_2R_2$.
- Figura 4.8. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_3$.
- Figura 4.9. Función de valor para el indicador $I_2C_1R_3$.
- Figura 4.10. Función de valor para el indicador $I_1C_2R_4$.
- Figura 4.11. Función de valor para el indicador $I_1C_3R_5$.
- Figura 5.1. Pantalla de presentación del programa.
- Figura 5.2. Datos bases sobre la información del proyecto.
- Figura 5.3. Características sobre la localización y el tipo de industria.
- Figura 5.4. Elección de componentes
- Figura 5.5. Elección del diagrama del ciclo de vida.
- Figura 5.6. Definición del plano de requerimientos.
- Figura 5.7. Definición de criterios.
- Figura 5.8. Definición de indicadores
- Figura 5.9. Diagrama de los componentes claves de la evaluación.
- Figura 5.10. Valoración de las alternativas
- Figura 5.11. Pasos de la valoración de las alternativas
- Figura 5.12. Los botones de ayuda.
- Figura 5.13. Construcción de la función de valor.

- Figura 5.14. Elección de los parámetros de la función de valor.
- Figura 5.15. Asignación de valor para una alternativa específica.
- Figura 5.16. Ponderación a nivel de indicadores.
- Figura 5.17. El vector pesos y el índice de consistencia
- Figura 5.18. Valor integrado a nivel de indicadores
- Figura 5.19. Selección de los planos a evaluar
- Figura 5.20. Selección de resultados
- Figura 5.21. Representación de resultados mediante un diagrama de redes.
- Figura 6.1. Distribución en planta de la Terminal de autobuses
- Figura 6.2. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente cimentación.
- Figura 6.3. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente estructura.
- Figura 6.4. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente cerramiento.
- Figura 6.5. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente cubierta.
- Figura 6.6. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente pavimento.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Otros métodos de asignación de pesos
Tabla 2.2.	Tabla comparativa de métodos comerciales para asignación de pesos.
Tabla 2.3	Métodos empleados en la evaluación de acuerdo a la información de preferencias
Tabla 2.4.	Métodos empleados en la evaluación de acuerdo al número de alternativas.
Tabla 2.5.	Métodos para la construcción de la función de valor.
Tabla 2.6.	Síntesis del estado del conocimiento y aportaciones.
Tabla 3.1	Escala de Saaty (1980)
Tabal 3.2.	Matriz de decisión [A]
Tabla 3.3.	índice de aleatoriedad
Tabla 3.4.	Eje Porcentajes que reflejan la dilución de indicadores.
Tabla 4.1.	Árbol de requerimientos del edificio industrial
Tabla 4.2.	Lista de chequeo para el edificio industrial.
Tabla 4.3.	Descripción del plano ambiental
Tabla 4.4.	Descripción del plano económico
Tabla 4.5.	Descripción del plano estético
Tabla 4.6.	Descripción del plano social
Tabla 4.7.	Descripción del plano funcional.
Tabla 4.8.	Libro lógico de componentes para el edificio industrial
Tabla 4.9.	Cantidades de los diferentes elementos constructivos (kg)
Tabla 4.10.	Energía consumida por materiales de construcción durante la fabricación (Kwh/kg).
Tabla 4.11.	Energía consumida por materiales de construcción durante la fabricación (MJ/kg)
Tabla 4.12.	Energía incorporada en los materiales de un edificio

Tabla 4.13.	Ratios propuestos para el cálculo del consumo energético previsto.
Tabla 4.14.	Respuesta del indicador $I_2C_1R_1$
Tabla 4.15.	Valores de referencia para la función de valor del indicador $I_1C_2R_1$
Tabla 4.16.	Respuesta de cada componente para el indicador $I_1C_1R_2$ en diferentes unidades
Tabla 4.17.	Respuesta de cada componente para el indicador $I_1C_1R_2$ normalizadas en m ² del proyecto.
Tabla 4.18.	Puntos de mínima y máxima satisfacción para el indicador $I_1C_1R_2$
Tabla 4.19.	Respuesta para el indicador factor forma
Tabla 4.20.	Temperaturas estimadas para el confort térmico en el lugar de trabajo.
Tabla 4.21.	Valores recomendados para confort acústico en el lugar de trabajo.
Tabla 4.22.	Valores recomendados para confort lumínico en el lugar de trabajo
Tabla 4.23.	Valores de referencia para determinar la facilidad de desmontaje de elementos constructivos del edificio.
Tabla 6.1.	Árbol de requerimientos para la construcción de la Terminal de autobuses
Tabla 6.2.	Alternativas para elegir la construcción de la Terminal de transportes
Tabla 6.3.	Propuestas de precios y cantidades por las empresas concursantes
Tabla 6.4.	Indicadores asignados a cada componente
Tabla 6.5.	Matriz de decisión, cálculo del vector propio e índice de consistencia
Tabla 6.6.	Ponderación para el árbol de requerimientos de las alternativas A y B
Tabla 6.7.	Respuesta de Alternativa A para el indicador $I_1C_1R_1$
Tabla 6.8.	Respuesta de Alternativa B para el indicador $I_1C_1R_1$
Tabla 6.9.	Respuesta de Alternativa A para el indicador $I_1C_2R_1$
Tabla 6.10.	Respuesta de Alternativa B para el indicador $I_1C_2R_1$
Tabla 6.11.	Respuesta de Alternativa A para el indicador $I_1C_4R_1$
Tabla 6.12.	Respuesta de Alternativa B para el indicador $I_1C_4R_1$
Tabla 6.13.	Respuesta de Alternativa A y B para el indicador $I_1C_1R_2$

- Tabla 6.14. Respuesta de Alternativa A y B para el indicador $I_1C_1R_3$
- Tabla 6.15. Respuesta de Alternativa A y B para el indicador $I_1C_2R_3$
- Tabla 6.16. Respuesta de Alternativa A y B para el indicador $I_1C_1R_5$
- Tabla 6.17. Respuesta de Alternativa A y B para el indicador $I_1C_3R_5$
- Tabla 6.18. Valor del indicador $I_1C_2R_1$ para la alternativa A y B
- Tabla 6.19. Valor del indicador $I_1C_1R_1$ para la alternativa A y B
- Tabla 6.20. Valor del indicador $I_1C_2R_1$ para la alternativa A
- Tabla 6.21. Valor del indicador $I_1C_2R_1$ para la alternativa B
- Tabla 6.22. Valor del indicador $I_1C_4R_1$ para la alternativa A
- Tabla 6.23. Valor del indicador $I_1C_4R_1$ para la alternativa B
- Tabla 6.24. Valor del indicador $I_2C_1R_2$ para la alternativa A
- Tabla 6.25. Valor del indicador $I_2C_1R_2$ para la alternativa B
- Tabla 6.26. Valor del indicador $I_1C_1R_3$ para la alternativa A
- Tabla 6.27. Valor del indicador $I_1C_1R_3$ para la alternativa B
- Tabla 6.28. Valor del indicador $I_1C_2R_3$ para la alternativa A
- Tabla 6.29. Valor del indicador $I_1C_2R_3$ para la alternativa B
- Tabla 6.30. Valor del indicador $I_1C_1R_5$ para la alternativa A
- Tabla 6.31. Valor del indicador $I_1C_1R_5$ para la alternativa B
- Tabla 6.32. Valor del indicador $I_1C_3R_5$ para la alternativa A
- Tabla 6.33. Valor del indicador $I_1C_3R_5$ para la alternativa B
- Tabla 6.34. Cálculo de valor a nivel de indicadores para las alternativas A y B.
- Tabla 6.35. Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa A
- Tabla 6.36. Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa B
- Tabla 6.37. Cálculo de valor a nivel de requerimientos para la alternativa A
- Tabla 6.38. Cálculo de valor a nivel de requerimientos para la alternativa B

- Tabla 6.39. Valor de la alternativa A.
- Tabla 6.40. Valor de la alternativa B.
- Tabla 6.41. Sensibilidad de pesos para la alternativa A
- Tabla 6.42. Sensibilidad de pesos para la alternativa B
- Tabla 6.43. Respuesta de las alternativas A y B.
- Tabla 6.44. Características de la función de valor para la alternativa A
- Tabla 6.45. Características de la función de valor para la alternativa A
- Tabla 6.46. Cálculo de valor a nivel de indicadores para la alternativa A y B
- Tabla 6.47. Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa A
- Tabla 6.48. Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa B
- Tabla 6.49. Cálculo de valor a nivel de requerimientos para la alternativa A
- Tabla 6.50. Cálculo de valor a nivel de requerimientos para la alternativa B
- Tabla 6.51. Cálculo de la alternativa óptima para el componente estructura alternativa A
- Tabla 6.52. Cálculo de la alternativa óptima para el componente estructura alternativa B

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN Y CONTEXTO DE LA TESIS

Para llevar a cabo el análisis y diseño de un edificio, se valoran las "*condiciones más desfavorables*" con el fin de conseguir el diseño óptimo. Estas condiciones desde el punto de vista técnico son examinadas en profundidad (el desarrollo tecnológico siempre ha estado centrado a aspectos como el comportamiento de las estructuras y la caracterización de materiales) (SEOPAN, 2000), no obstante, por la gran variabilidad e incertidumbre asociada a los proyectos constructivos, el estudio desde otras perspectivas (ambiental, social, funcional, estético) no se tiene en cuenta con la suficiente exactitud o bien, no se incluyen para su análisis.

Como consecuencia se presentan carencias en el edificio a nivel de diseño e insuficiencias respecto a su funcionamiento a lo largo del ciclo de vida que repercuten directamente en la generación de una cantidad importante de residuos, en los costes generados por el deterioro prematuro de los materiales, en mayores consumos energéticos, en la energía utilizada para proveerlos de los servicios necesarios y en la energía contenida de los materiales utilizados (aproximadamente el 50%) etc. Estos efectos resumen básicamente la no integración de los vocablos de construcción y desarrollo sostenible al sector.

A continuación se presentan algunas estadísticas de la actividad respecto a esta problemática (Alavedra et al 1998; López , 2001)

- Los edificios consumen entre el 20 y el 50% de los recursos físicos de su entorno, teniendo especial responsabilidad en el actual deterioro del medio ambiente, la ampliación del parque construido.
- El entorno construido, donde pasamos más del 90% de nuestra vida, es en gran medida culpable de dicha contaminación.
- Dentro de las actividades industriales la actividad constructora es la mayor consumidora, junto con la industria asociada, de recursos naturales como pueden ser madera, minerales, agua y energía. Se extrae 40% de arena, grava y piedra; 25% de madera, 16% de agua.
- En torno al 30% del consumo de energía de Europa se consume en los edificios.
- El 25% de los residuos de Europa son residuos de construcción y demolición.
- El disponer de otro tipo de infraestructuras asociadas a los edificios influye en la calidad de vida de los usuarios.

Los efectos en mención, divagan por consiguiente con el término propuesto en la cumbre de Río (1982) y el reporte Brundtland (1987) sobre "Desarrollo Sostenible" el cual se define como

"Aquel desarrollo capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, salvaguardando los recursos que nos ofrece el medio, para garantizar el acceso a los mismos de las generaciones venideras."

Según los datos mostrados anteriormente, los impactos de la contaminación atmosférica o de la contaminación por sustancias químicas son cada vez mayores provocando una sucesión de acontecimientos que se han venido desencadenando en el entorno ambiental, basta ver las catástrofes que se han acometido en este último año (Los verdes, 2005):

El Tsunami en el Índico (más de 200.000 víctimas), el Huracán Katrina (con más de 1000 muertes y el mayor coste económico de una catástrofe ambiental desde el terremoto de Kobe) y aún sin conocer su alcance total el huracán Stan en Centroamérica y el huracán Wilma (México, Cuba y Miami) dejando grandes pérdidas humanas, económicas, ambientales, sociales, etc. Estos acontecimientos por tanto, suponen un modelo de desarrollo insostenible sobre la economía y la naturaleza.

Por otro lado, la edificación industrial es un sistema complejo, sus diferentes formas y tipologías hacen que no se pueda particularizar un diseño único que supla los deseos del proyecto y del entorno. Adicionalmente características como cargas derivadas del proceso productivo o del flujo de materiales, rápidos cambios tecnológicos que implican flexibilidad para futuras adaptaciones, la accesibilidad, la movilidad, el consumo energético, el desarrollo de la actividad comercial, etc. (Heredia,1981) hacen que se defina también una clase particular de construcción precisando así, de un estudio pormenorizado de este tipo de edificación y de los procesos que a esta atañen. A continuación se desarrollan con más detalle las características antes expuestas.

- Las fabricaciones industriales son infinitas, cada una precisa de un proceso y unos determinados medios para su producción lo que implica que existan diferentes formas y tipologías del edificio industrial. En los edificios residenciales, sin embargo, las actividades en el espacio interior siempre están orientadas a proporcionar alojamiento a los residentes y fijar las condiciones de cada estancia.
- Aparte de las cargas derivadas del proceso productivo o del flujo de materiales se consideran las cargas producidas por el transporte que se precisa para el proceso de fabricación, razón por la cual, las cargas en el edificio industrial son normalmente más relevantes que en las estructuras residenciales.
- El edificio industrial no sólo se diseña para mantener la flexibilidad de la implantación y de su operación sino se proyecta para futuras ampliaciones. La industria actual se caracteriza por rápidos cambios tecnológicos lo que conlleva a nuevas distribuciones o necesidades de expansión de la planta industrial.
- Los requisitos dimensionales, las características físicas de las materias primas y de los productos terminados, deben considerarse para que así queden correctamente dimensionadas las zonas de paso, las distancias. En pocas palabras, considerar la accesibilidad en la industria, obviamente se incluye la accesibilidad del personal.
- La movilidad, no solamente del personal hacia su lugar de trabajo o en el interior del mismo, sino el movimiento de la gran cantidad de materiales, dentro de los que podemos englobar las materias primas, productos semielaborados, productos finales e incluso el movimiento de maquinaria y de herramientas. Este movimiento supone un gran consumo energético a lo largo de la vida útil de la planta industrial.

- Al contrario que en los usos residenciales, donde el consumo de energía obedece del tipo de vivienda, en la industria obedece a la maquinaria disponible. Por otro lado, las condiciones atmosféricas en el espacio interior son también diferentes cuando hablamos de tipologías residenciales o industriales. Para usos residenciales, asegurar el confort de los ocupantes juega un papel primordial, mientras que para usos industriales, el condicionamiento del espacio interior es dado por la automatización del proceso.
- Desde el punto de vista social, la planta industrial genera riqueza, crea empleo, promueve la actividad comercial y desarrolla los alrededores.
- En algunos casos, como consecuencia de la imagen de algunas compañías, el edificio industrial tiene un alto valor estético que contribuye a aumentar el patrimonio arquitectónico de la zona.

Finalmente, un tercer aspecto para la justificación de la presente tesis es lo concerniente al campo de la gestión en el sector de la construcción. Muchos de los problemas o disfunciones según afirma (Blanca, 2001), tienen su origen en la falta de una toma de decisión durante la etapa de diseño, lo suficientemente integrada y pensada. El éxito de un proyecto no depende tan solo de la calidad de cada una de sus partes por separado, sino que estas deben estar integradas para la consecución de un fin unitario sin el cual no tiene sentido. Es importante unir otras áreas de conocimiento en orden de hacer frente a las necesidades específicas de cada proyecto (Ormazabal, 2001).

Por tanto, queda claro que aún queda mucho por avanzar en la búsqueda de un carácter integrado que sintetice las diversas vertientes del proyecto. Asimismo, queda claro es necesario profundizar en alternativas metodológicas para llevar a cabo la cuantificación de aspectos tan heterogéneos e intangibles como son los relativos a los diversos planos del proyecto.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de la tesis, se centra en la obtención de una metodología de cálculo para cuantificar y evaluar desde la perspectiva de la sostenibilidad, una edificación industrial. Adicionalmente se busca desarrollar una herramienta informática que funcione como soporte en la toma de decisión con base en el modelo anteriormente preestablecido para la etapa de diseño.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos complementarios y que ayudarán a desarrollar el objetivo principal de la misma se encuentran:

- Obtener una visión global de las herramientas existentes a nivel internacional y nacional para tener un punto de referencia de las aportaciones y mejoras que pueden hacerse en torno a la nueva metodología y herramienta que se proyectará.
- Homogenizar criterios y metodologías de evaluación existentes en el sector constructivo desde la perspectiva de la sostenibilidad.
- Evaluar la situación de la industria de la construcción Española dentro del entorno sostenible.
- Identificar los requerimientos, componentes y los diversos procesos que forman el ciclo de vida para la edificación industrial.
- Definir las características para materiales y componentes más utilizados en las construcciones industriales.
- Aportar una metodología de cálculo de tal manera que permita evaluar la edificación a lo largo del ciclo de vida, en cada uno de sus planos y para cada uno de sus componentes.
- Definir indicadores que sean fácilmente evaluables y ajustables a la realidad del sector.
- Determinar algunas cifras estadísticas en el sector para elaborar de esta manera una base de datos.
- Elaborar una herramienta informática que ayude a cuantificar las decisiones asociadas a este tipo de edificación atendiendo a los requerimientos, al ciclo de vida de los materiales y a los componentes.
- Mostrar la validez del modelo aplicándolo a casos reales en edificios industriales de reciente construcción.

1.4. ALCANCE

Cabe resaltar que la presente tesis está dirigida, fundamentalmente, a desarrollar un método que evalúe el valor de un proyecto de edificación industrial sostenible, por lo cual la caracterización de dichas variables se centra en el edificio industrial, no obstante se contempla extender la metodología hacia otras tipologías constructivas. En lo que respecta a la caracterización de dichas variables, estas son muy limitadas puesto que el objeto principal de la tesis se centra en el desarrollo de la metodología y posterior elaboración de la herramienta.

En lo que concierne al contexto de aplicación, se proyecta a futuro contrastar los resultados mediante vías alternativas tanto geográficas, metodológicas (modelos probabilistas y de inteligencia artificial) y tipológicos (edificación de servicios, oficinas, instituciones públicas).

Por otro lado, la herramienta producto de la aplicación de la base metodológica, únicamente se aplicará para la fase de diseño, no obstante a futuro, es posible que extender su utilidad a otras fases del proyecto.

Finalmente, no se trata de hacer una aportación al estado del conocimiento de la teoría general de la toma de decisión, sino más bien formular a partir de las bases expuestas por la misma, una propuesta con una tendencia práctica.

1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está estructurada en 7 capítulos, esto de acuerdo a un proceso lógico de desarrollo en base a los objetivos de la investigación.

El **capítulo uno** integra la justificación de la investigación, los objetivos generales y específicos, el alcance y la estructura de la presente tesis.

El **capítulo dos** recoge el estado del conocimiento en el que se analiza el concepto de sostenibilidad, posteriormente se examina la aplicabilidad de dicho término al sector de la construcción y en especial a la edificación industrial. A continuación, se definen las características de este tipo de edificación para terminar con los mecanismos de evaluación existentes. Como consecuencia de esta revisión, se establecerán conclusiones sobre la problemática existente y las pautas a seguir para la propuesta.

En el **capítulo tres**, se plantea la aportación de la tesis doctoral, una metodología para cuantificar el valor de un edificio industrial desde el punto de vista sostenible. Se valoran las decisiones asociadas a la construcción de estos edificios respecto a una base conceptual y matemática. Se establecen las pautas para abordar la solución del problema descrito.

En el **capítulo cuatro** se presenta la caracterización y análisis de las variables que fueron definidas en la metodología y que ahora deben ser aplicables al edificio industrial.

En el **capítulo cinco** se inicia la implementación de la metodología al entorno informático. Esta implementación sirve de base a la futura herramienta de toma de decisión.

En el **capítulo seis**, se plantea la verificación de la propuesta a partir de un caso práctico real. Este caso se basa en el estudio de la construcción de una terminal y reparación de autobuses en la zona portuaria de Barcelona.

El **capítulo siete** resume las conclusiones principales y ofrece una visión general del desarrollo de la tesis. Adicionalmente se incluyen unas recomendaciones respecto a las futuras líneas de investigación.

Para finalizar se incluyen unos **anexos** con el objeto de profundizar en alguna información adicional y a la vez crear un estado de conocimiento añadido al propuesto en el capítulo dos.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción supone un importante porcentaje de la economía de un país (en el caso de España en el entorno al 10% del P.I.B.) y es a la vez, en comparación con otros sectores industriales, uno de los ámbitos de mayor consumo de recursos naturales (madera, minerales, agua y energía) y generador de impactos ambientales.

Esto se refleja en la energía utilizada para proveer a los edificios de los servicios necesarios, en la energía contenida en los materiales utilizados en la construcción, en el consumo de agua, en el uso de productos químicos que influyen en la reducción de la capa de ozono. Según (Baldwin, 1996) los edificios son responsables de aproximadamente el 50% de la energía utilizada y de las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Debido a la repercusión de estos impactos, en la última década, el concepto de desarrollo sostenible ha cobrado mayor importancia en muchas de las actividades económicas extendidas a nivel mundial. Una prueba de ello se puede observar en el sector de la construcción, en donde se han sentado bases y creado organismos para unificar criterios y estrategias de sostenibilidad.

Estos organismos, como por ejemplo, PRESCO (Practical Recommendations for Sustainability Construction) y CRISP (Construction and City Related Sustainability Indicators) en el entorno europeo, dirigen sus esfuerzos para definir buenas prácticas ambientales, herramientas y metodologías para evaluar la sostenibilidad de un sistema constructivo, sin embargo, el enfoque de evaluación de dichos métodos y los objetivos a alcanzar tienden a diferenciar de manera significativa el contenido de uno u otro proyecto. Adicionalmente su perspectiva se encamina en la mayoría de casos al enfoque ambiental.

Con los antecedentes descritos, el presente capítulo tiene como **objetivo** conocer las diferentes metodologías y herramientas creadas para desarrollar, mejorar e innovar el diseño y la evaluación de los edificios industriales desde el punto de vista sostenible.

Para ello, en primer lugar, en aras de situar el tema, se hace un breve repaso a algunos conceptos sobre sostenibilidad aplicados al sector de la construcción y se muestran los planteamientos actuales existentes. En base al análisis, se propondrán ventajas y desventajas de los procedimientos actuales y de esta forma se fijará un punto de partida de la propuesta que se realizará para la presente tesis doctoral.

Para la comprensión del capítulo, este se estructura en los siguientes apartados:

- Conceptos sobre sostenibilidad y construcción sostenible.
- Diseño para un edificio sostenible a través de su ciclo de vida
- Evaluación de la sostenibilidad en el edificio
- Herramientas existentes para la evaluación sostenible
- Síntesis del estado del conocimiento y aportaciones.

En primer lugar se exponen los conceptos claves como “sostenibilidad y construcción sostenible”, siendo estos, el punto de partida para el desarrollo de las diferentes herramientas expuestas. En este planteamiento se incluye, por un lado, los pilares y principios básicos, mientras que por otro lado, se incluye su origen y evolución.

Con posterioridad, se hace un detallado análisis de la edificación a través de su ciclo de vida, con objeto de buscar una solución constructiva lo más adaptable a los parámetros sostenibles. Asimismo se incluye una descripción de los diferentes mecanismos desarrollados para evaluar la sostenibilidad en los edificios. Dentro de este bloque temático se incluyen temas relacionados con la teoría de decisión, puesto que las herramientas de evaluación, se basan en el uso de estas teorías y modelos matemáticos.

En un apartado posterior se describen las diferentes pautas que se han tenido en cuenta para la elaboración y desarrollo de las herramientas existentes más significativas a nivel mundial. Entre estas características se encuentran los criterios, las escalas de evaluación, los valores de referencia, las puntuaciones, plataformas de trabajo entre otros.

Por último, para terminar el estado del conocimiento, se hace una breve reseña sobre las metodologías y herramientas desarrolladas en base a la toma de decisión y adicionalmente, se muestran algunos puntos que contribuyen a la nueva propuesta.

2.2. SOSTENIBILIDAD Y CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

2.2.1. Desarrollo Sostenible: Definiciones y ámbitos

El informe de la comisión Brundtland de 1987, que acuñaba el concepto de "desarrollo sostenible" como, aquel *"que asegura la satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las propias"*, popularizó el término de desarrollo sostenible, el cual integra diferentes campos de estudio que son aplicables a varias actividades humanas y, en particular, a los impactos ambientales que se generan en el sector de la construcción.

Cinco años después, en 1992, la cumbre de Río de Janeiro se presentó como la cumbre del "desarrollo y medio ambiente" con un ánimo integrador, aprobándose la Agenda 21. Un programa con una extensa definición de acciones dirigidas a la consecución de logros en materia de desarrollo sostenible. Las acciones involucraban a distintas organizaciones y grupos tales como gobiernos, autoridades locales, compañías industriales o asociaciones sociales. En esta conferencia quedó esbozado el concepto de la siguiente forma:

"con el objetivo de establecer una alianza mundial nueva y equitativa mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los sectores claves de las sociedades y las personas, procurando alcanzar acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses de todos y se proteja la integridad del sistema ambiental y de desarrollo mundial, reconociendo la naturaleza integral e interdependiente de la Tierra, nuestro hogar;"

No obstante, dichas acciones eran de carácter general por lo que los diferentes sectores necesitaban pautas para proceder desde un enfoque sostenible. Posteriormente apareció la Agenda 21 local y el tratado de Amsterdam ó el 5º Programa de Acción ambiental de la comisión europea y otros de distintos ámbitos. En la Agenda 21 local se fomentaban medidas encaminadas a conseguir que el medio ambiente fuese el enfoque que condicionará todas las actividades locales. La idea de esta agenda era que para todas las acciones se compaginarán el desarrollo económico y el respeto ambiental.

Por su parte en 1997 el tratado de Ámsterdam estipuló que *“las exigencias de la protección del medio ambiente deberán integrarse en la definición y realización de las demás políticas de la Comunidad”*. Esta condición era indispensable para lograr un crecimiento sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Una vez se han presentado las definiciones y los entornos de aplicación del término **“Desarrollo Sostenible”**, queda claro que la sostenibilidad abarca varias dimensiones; abraza todas las facetas de la actividad humana (industria, transporte) y esta provista de acciones locales mediante el re-direccionamiento de las desigualdades que existen entre los países desarrollados y las que se encuentran en vía de desarrollo.

2.2.2. El concepto de la construcción Sostenible y sus pilares

El concepto de desarrollo sostenible, asociando el futuro de la industria de la construcción y la sostenibilidad, se introdujo en la primera Conferencia Internacional de Construcción Sostenible celebrada en Tampa, Florida en noviembre de 1994 (Kibert, 1994a). En este caso, al igual que en el desarrollo naciente de otros campos, los esfuerzos se centraron en llevar a cabo una certera y adecuada definición del concepto de sostenibilidad en construcción.

El término construcción sostenible, fue originalmente propuesto para describir la responsabilidad de la industria de la construcción en lograr el cumplimiento del término sostenibilidad. Posteriormente, Kibert (1994) propone la **construcción sostenible**, como

el crear usando un ambiente sano, empleando los recursos eficientemente en base a principios ecológicos.

mientras que Casado (1996), define la Construcción Sostenible como:

aquella que, con especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso sostenible de los recursos, prestando especial atención al impacto ambiental que ocasiona la aplicación de determinados materiales de construcción y buscando la minimización del consumo de energía en la utilización de los edificios durante su vida útil.

Tal como puede verse el concepto de Construcción Sostenible lleva implícito, la reducción de los impactos causados en los procesos de construcción, uso y derribo de los edificios, así como por el consumo de entorno urbanizado.

En paralelo con este proceso y dentro de otro marco, en el congreso de educación ambiental WWF (1993) se afirma que el término de la construcción sostenible no sólo debe

abarcar a los edificios propiamente dichos, sino que también debe tener en cuenta su entorno y la manera cómo se comportan para formar las ciudades, ampliando hacia un concepto de desarrollo urbano sostenible. El cual deberá tener la intención de crear un entorno urbano que no atente contra el medio ambiente, con recursos, no sólo en cuanto a las formas y la eficiencia energética, sino también en su función, como un lugar para vivir. Con posteridad, Lanting (1996), también se dirige hacia la reducción de los impactos ambientales causados en los procesos de construcción, uso y derribo de los edificios, así como por el ambiente Urbanizado.

Bajo estas perspectivas y teniendo en cuenta la evolución que ha tenido el enfoque de la construcción sostenible, las actuales propuestas económicas, políticas, sociales, ambientales, y técnicas contemplan el desarrollo sostenible como el pilar sobre el que deben asentarse las iniciativas empresariales. Así pues, la construcción, como sector clave de la sociedad, debe ser protagonista de esta transformación y para el cumplimiento de dicha transformación, Hill et al (1996) fundamenta su estudio en el cumplimiento de los cuatro pilares: Social, Biofísico, económico y técnico.

El pilar social de la construcción sostenible, se basa en la noción de equidad y justicia social la cual se define como la oportunidad de redistribución sobre toda la población. En la actualidad la base social de la sostenibilidad sigue estando muy poco desarrollada y explorada. A continuación se resumen sus características:

- Mejorar la calidad de vida humana adecuando el consumo de necesidades básicas y generando una igualdad en las condiciones de confort.
- Proteger y promover la salud humana a partir de una planificación adecuada y segura. La gestión en los procesos de construcción reducen el riesgo de accidentes y una acción cuidadosa del uso de sustancias peligrosas reduce las consecuencias sobre la salud humana o el riesgo de accidentes.
- Buscar y obtener una distribución equitativa de los costos sociales de construcción y buscar una compensación para las personas directa o indirectamente afectada por los costos de operación.
- Buscar la equidad intergeneracional en los costos sociales, biofísicos y financieros de la construcción actual y teniendo en cuenta las construcciones futuras.

En el Pilar Biofísico incluye los aspectos concernientes a la atmósfera, la tierra, recursos, ambiente marítimo, flora, fauna y la construcción ambiental. Las características más representativas de este pilar son:

- Reducir el uso de las cuatro fuentes genéricas usadas en construcción: energía, agua, materiales y tierra en cada una de las etapas del ciclo de vida.

- Maximizar el re-uso y reciclaje de recursos. Durante la ejecución de la obra, procesos como el reciclaje y el re-uso de aguas de lluvia, requiere la formación de los trabajadores sobre dichos procedimientos.
- Uso renovable de recursos en preferencia al uso de los no renovables. El principio puede ser aplicado a los materiales y a la energía en las construcciones.
- Minimizar la contaminación del aire, agua y tierra. Esta estrategia debe ser aplicada a todas las políticas ambientales que se tengan contempladas y deben ser aplicables a nivel global y local. Durante la ejecución de la obra como estrategia por ejemplo se puede separar una zona para el cambio de aceites de la maquinaria de tal manera que no mezcle con el agua.

Las características que se incluyen en el *Pilar Económico* son:

- Realzar la competitividad en el mercado, adoptando políticas y prácticas de avance en las aplicaciones de la sostenibilidad.
- Escoger responsablemente, proveedores y contratistas que puedan demostrar un buen funcionamiento ambiental.
- Invertir ingresos en el uso de recursos renovables con el fin de mantener la capacidad de encontrar las necesidades de futuras generaciones.

Por último, el *Pilar Técnico* describe los principios relacionados con el funcionamiento, la calidad de un edificio o su estructura y la vida útil del mismo. Las características que se tiene en cuenta para este pilar son:

- Construcción durable, confiable y funcional. La consideración técnica de la sostenibilidad, comienza con los requerimientos estructurales que sean capaces de soportar las fuerzas de la naturaleza.
- Perseguir calidad en la creación de construcción ambiental.
- Utilidad de promover la construcción sostenible. La utilidad de acuerdo a Wyatt (1994) provee una aproximación a la calidad del ciclo de vida desde las etapas de pre-diseño hasta la etapa de desconstrucción del proyecto. La utilidad acepta y reconoce que cada parte constituyente de la edificación y del sistema de edificación, tiene su propia curva de ciclo de vida y de acuerdo al comportamiento de cada una de ellas, debe tomarse las medidas necesarias (renovación, reemplazo, etc.).
- Humanizar el edificio, de tal manera que el usuario pueda controlar las condiciones ambientales internas como son confort acústico, térmico, lumínico.

2.2.2. Diseño para un edificio sostenible a través de su ciclo de vida

Tradicionalmente, los esfuerzos para la mejora en los edificios se han centrado principalmente, en la calidad global, en los costes correspondientes y el tiempo de ejecución. Ahora bien, en la actualidad la definición de "Desarrollo Sostenible" introduce un esfuerzo adicional el cual es cumplir con el objetivo principal de los edificios sin comprometer las posibilidades de satisfacción de las futuras generaciones. (Bourdeau, 1996).

Para garantizar el cumplimiento de dicha definición, es conveniente hacer un análisis previo a través de las etapas del ciclo de vida que se muestra en la figura 2.1, en aras a definir bien los objetivos y el alcance del análisis posterior.

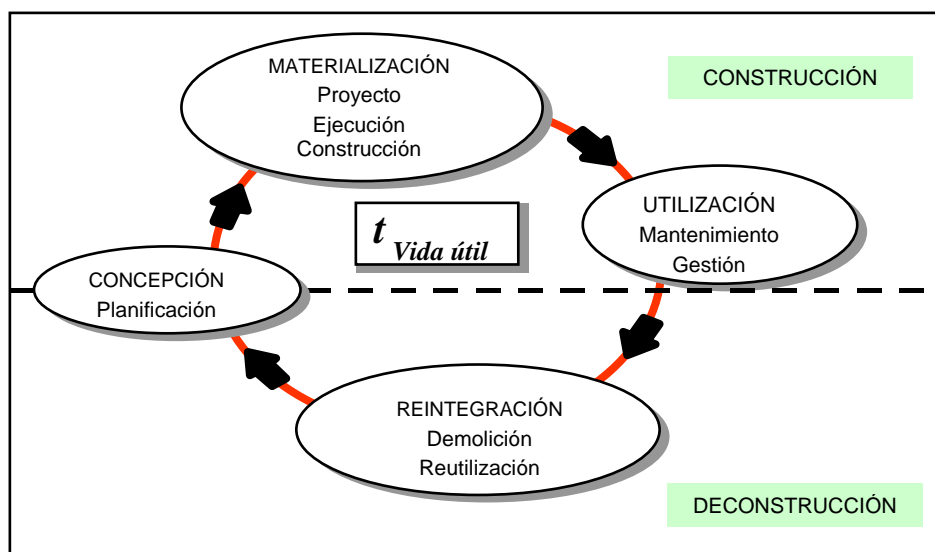


Figura 2.1. Diagrama del ciclo de vida (Aguado et al, 1997)

En la etapa de *concepción* se definen las funciones (o requerimientos) a exigir al edificio y las características del emplazamiento, por lo que los planteamientos más globales de urbanismo sostenible, además del propio edificio, tienen mucha incidencia en esta etapa.

En la etapa de *materialización*, la cual incluye tanto el proyecto como la construcción, incorporando en esta no sólo la ejecución en sí misma (teniendo presente los equipos), si no los materiales necesarios y los suministros (consecuentemente, hay que incluir los transportes asociados). Esta es la etapa sobre la que, con frecuencia, incide más el técnico y que usualmente está documentada desde diferentes puntos de vista, con mayor énfasis costes, plazos, etc, y, en menor medida, desde el punto de vista ambiental.

Una vez puesto en servicio el edificio, la etapa *funcionamiento o utilización* tiene una gran incidencia en los temas de sostenibilidad, en especial por lo que significa energía y residuos generados, así como en los costes asociados. Hay que recordar que esta etapa esta condicionada de forma significativa desde su concepción.

Para terminar el ciclo de vida, se debe tener presente la etapa correspondiente a la *reintegración*, en la que se incluye la demolición (con la gestión de los residuos y vertidos a escombrera) y la reutilización de los componentes o del conjunto del edificio. Dado que esta etapa se produce al final de la vida real de la estructura en ese ciclo, puede no ser fácil evaluar los sistemas de demolición que se producirán en el futuro, por lo que es habitual no considerar esta fase, sino que el sistema se comienza incluyendo la posibilidad de materias primas (por ejemplo, áridos reciclados) en el inicio del proceso.

Todo el ciclo viene marcado por la explicitación de la **vida útil** de la estructura, lo cual no es usual, si bien en un avance en la dirección de la sostenibilidad, parece se está planteando la incorporación de la vida útil en la revisión actual de la vigente Instrucción de Hormigón Estructural. Así pues, como resumen, cabe señalar que la sostenibilidad del edificio debe plantearse para el conjunto de las etapas que conforman del ciclo teniendo en cuenta la vida útil establecida de forma explícita. Ello no quita para que el método que se proponga pueda hacer un análisis desglosado de cada una de las etapas, siempre y cuando los límites del sistema queden bien establecidos.

2.3. EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL EDIFICIO

Para la evaluación de la sostenibilidad de un edificio existen diversas propuestas, disponiendo éstas de diverso grado de dificultad en cuanto a la implementación de las mismas. Por otro lado, algunas son aplicables en fase de proyecto y otras para la fase del edificio completamente construido. En cualquiera de los dos casos la dificultad principal consiste en seleccionar indicadores apropiados para su medición y en estructurar un mecanismo de cuantificación.

Como el objetivo de la presente tesis se centra en desarrollar una metodología para cuantificar el edificio industrial sostenible, se comenzará por dar las pautas e instrumentos existentes al respecto los cuales se basan en el uso y prácticas de toma de decisión y en los modelos matemáticos que van desde la lógica difusa hasta los modelos estadísticos.

2.3.1. Planteamiento sobre la toma de decisión

2.3.1.1.- Generalidades

La toma de decisión es un proceso en el cual una persona o grupo de personas deben escoger entre dos o más alternativas. Con frecuencia estas decisiones se convierten en soluciones de gran trascendencia por lo que es conveniente plantearlas adecuadamente. Los elementos que participan en un proceso de decisión por lo general se miden en escalas diferentes por lo que se requiere transformar estas unidades en una unidad abstracta que sea válida para todas las escalas (función de valor).

Cuando los problemas de toma de decisión se conciben en proyectos, en la mayoría de casos, son problemas multicriterio y, por tanto, la toma de decisión se enfoca desde esta perspectiva dando lugar a métodos de toma de decisiones con criterios múltiples (Multiple Criteria Decision Making (MCDM)) las cuales tiene en cuenta un conjunto de alternativas (continuas o discretas), distintos criterios o puntos de vista y la integración de diferentes factores que se logran incluir en el proceso de evaluación. En ellos se define usualmente el peso de cada criterio de forma previa lo que da pie a sus detractores a hablar de la subjetividad del planteamiento.

Los problemas de Toma de Decisión se pueden clasificar según tres puntos de vista los cuales se explican con más detalle en el apartado 2.3.6. (Aragón et al 1997)

- De acuerdo a los estados de la naturaleza: ambiente de certidumbre, incertidumbre y riesgo.
- Los criterios de decisión: Monocriterio o multicriterio.
- Las características del conjunto de alternativas: problemas continuo o discreto.

2.3.1.2.- Elementos básicos del problema de toma de decisión

El problema de toma de decisión viene definido por unos elementos o fases que se enumeran a continuación (Aragón et al 1997; Ríos et 1989):

1. Un decisor o unidad decisora: Lo conforman un conjunto de individuos cuyo interés es la solución de un problema.
2. Las alternativas o decisiones posibles: Que es el conjunto de decisiones, estrategias o posibles acciones que hay que analizar durante el proceso de evaluación y búsqueda de la mejor solución.
3. Un ambiente o contexto de la situación de decisión: Es el conjunto de características que definen la situación en lo que se refiere al mundo exterior.
4. Criterios: Este concepto engloba objetivos, atributos que se consideran relevantes en un contexto decisional. El objetivo indica el camino en la que el decisor debería concentrarse. El atributo mide el grado de alcance o cumplimiento de ese objetivo. Para cada alternativa se definen unos atributos que permiten definir la consecuencia de la decisión.
5. Solución eficiente: Un conjunto de soluciones es eficiente cuando está formado por soluciones factibles, tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otros de los atributos.

2.3.1.3.- Etapas de la toma de decisión para dar solución a un problema

- Identificación y diagnóstico del problema: Es la situación que se desea resolver mediante la selección de una de las alternativas de las que se dispone. Estas alternativas serán evaluadas mediante la evaluación de criterios establecidos de manera que se permitan conocer las ventajas e inconvenientes incorporados en cada una de ellas.
- Definición del objetivo: Son las necesidades e intereses que se identifican para mejorar una situación existente. Los objetivos serán establecidos por el grupo decisor involucrado.
- Identificación de criterios: Son las dimensiones que afectan significativamente a los objetivos y deben expresar las preferencias de los implicados en la toma de decisión.
- Generación de soluciones alternativas: Son propuestas factibles a partir de las cuales se podrá alcanzar el objetivo general.
- Evaluación de alternativas: Es la fase de valoración de cada una de las distintas alternativas a la luz de los diferentes criterios. Se miden los distintos atributos los cuales permiten expresar el grado de satisfacción que cada alternativa alcanza para cada criterio.
- Evaluación de la decisión: consiste en la selección de la mejor solución de todas las tenidas en cuenta.

2.3.1.4.- Construcción de los criterios de decisión

Una selección adecuada de criterios constituye la base fundamental de la toma de decisión ya que un planteamiento incongruente puede llegar a invalidar el proceso. Por su parte, Keeny et al (1976 - 1993) sugiere la construcción de una jerarquía de objetivos como medio para la definición de los criterios que se deben tener en un problema decisional. Esta jerarquía consiste en especificar los objetivos fundamentales (nivel más alto) que el decisor pretende alcanzar durante el proceso de toma de decisiones y en la subdivisión de éstos en subobjetivos de más bajo nivel ,más concretos y detallados.

Es necesario tener en cuenta que a medida que se vaya realizando el despliegue de los niveles de jerarquía se vayan cumpliendo los objetivos del nivel superior. Adicionalmente conviene hacer un análisis detallado de los objetivos de más bajo nivel para que definan de forma precisa todos los aspectos del objetivo de nivel superior asociado.

La jerarquía de objetivos depende del tipo de problema, del proyecto, del agente decisor y del nivel de especificidad que se le quiera otorgar. Por otra parte, a cada nivel se le puede asociar un atributo, que cuantifica el grado de cumplimiento del objetivo correspondiente.

Un atributo se define como la medida que indica el grado con que el correspondiente objetivo es alcanzado. De acuerdo con Aragonés *et al* (1997) se le pueden atribuir dos propiedades:

- **Precisión** la cual hace alusión a la adaptación del valor para expresar o medir el grado del cumplimiento asociado.
- **Medible** para que el atributo sea posible ser medido con alguna escala de tipo conocido

Durante el proceso de toma de decisión se presenta un alto grado de subjetividad por lo que es recomendable no introducir escalas subjetivas para ciertos atributos que lo requieren. Para confrontar esta situación a veces es posible utilizar atributos indirectos esto es, reflejar el grado en el cual un objetivo asociado se alcanza pero no es una medida directa de este objetivo, sino que mide indirectamente el logro del objetivo.

Como el problema de la toma de decisiones multicriterio consiste básicamente en construir una relación de preferencia global para un conjunto de alternativas evaluadas utilizando varios atributos, existen diferentes métodos que ponderan el grado de importancia o peso que cada criterio tiene respecto a la agregación final. A continuación se exponen algunas técnicas para asignar pesos.

2.3.1.5. Determinación de la importancia relativa de los criterios

La determinación de la importancia relativa de los criterios puede hacerse de diversas formas tales como: asignación directa de pesos, asignación de pesos por una matriz de dominación, asignación de pesos en una jerarquía de objetivos y otros.

La **asignación directa de pesos** se puede realizar directamente mediante un grupo de trabajo o un individuo. Para ello se establece una escala que determina el grado de importancia de los criterios, en la que cada experto asigna un peso a cada criterio según su apreciación y, posteriormente, se calcula el peso definitivo de cada criterio calculando el valor medio de los valores asignados por los expertos a cada uno de los criterios.

En la **asignación de pesos por una matriz de dominación** se establecen comparaciones binarias entre criterios de forma que si el criterio *i*-ésimo domina al criterio *j*-ésimo se les asigna el valor de 1 y 0 respectivamente. Para este método se construye una matriz criterios – criterios de forma que se compara la importancia de cada criterio de la fila *i*-ésima con todos los demás. La suma de los valores de la fila *i*-ésima indicará el orden del criterio *i*-ésimo en la ordenación final. Como el resultado se da en una escala ordinal el paso a seguir es asignar un valor numérico a cada criterio. Para ello es necesario convertir esta escala ordinal en una escala intervalo, por ejemplo, a la mayor puntuación asignar una escala de 100 e ir disminuyendo sucesivamente.

La **asignación de pesos en una jerarquía de objetivos** se realiza cuando se ha establecido una jerarquía de objetivos. La misma se inicia por el nivel de mayor complejidad descendiendo progresivamente hacia los niveles de menor complejidad. El objetivo del nivel más alto tiene un valor de 1, los siguientes niveles se les asignan dos pesos: el peso relativo dentro del nivel correspondiente y el real que se obtiene de multiplicar dicho peso por el nivel inmediatamente superior.

Además de las metodologías expuestas anteriormente existen **otros** mecanismos de ponderación que se basan en asignar pesos, tal como se muestra en la tabla 2.1, en la que se incluye alguno de ellos.

Autores	Descripción determinación pesos
Bana e Costa (1986)	En este método el objetivo del decisor es seleccionar la acción que genera menos conflicto entre varios actores que expresan diferentes niveles de aceptación de la importancia relativa de los criterios de evaluación (pesos) y que el decisor quiere tener en cuenta.
Solomy y Dombi (1986)	Proponen un método interactivo para la determinación de pesos. Únicamente requiere comparaciones ordinales por parte del decisor. Los juicios se pueden formular en forma de desigualdades lineales que restringen el conjunto de pesos factibles y valores umbrales.
Golany y Kres (1993)	<ul style="list-style-type: none"> • Métodos basados en el vector propio: Análisis jerárquico de procesos (AHP) • Métodos extremos: Dentro de estos caben citar: mínimos cuadrados directos, mínimos cuadrados ponderados, mínimos cuadrados logarítmicos, y valores absolutos mínimos.
Sen y Yang (1994)	Describen un método de determinación de pesos mediante un proceso iterativo que utiliza información preferencial mínima. Se plantea una comparación binaria entre criterios y se utiliza un procedimiento sistemático para adquirir y representar la información de las preferencias, de manera que los atributos se pueden asignar inicialmente sobre las bases de un conjunto de comparaciones. Este método se denomina Minimal Pairwise Comparison (MIPAC).

Tabla 2.1. Otros métodos de asignación de pesos

De la asignación de pesos se puede concluir que hay gran variedad de metodologías, entre las cuales se encuentra el **AHP (Analytical Hierarchy Process)** y que también además de asignar pesos se puede considerar como una metodología estructurada de toma de decisión. Dado que en este planteamiento no se precisa una asignación de pesos a priori, sino que esta es una consecuencia y, que por otro lado, la definición de prioridades se hace a través de una evaluación por pares, planteamiento este admitido en el ámbito científico, a lo largo del desarrollo de esta tesis se utiliza el AHP como herramienta de evaluación.

En la tabla 2.2. se muestran las características del AHP respecto a otros métodos de uso comercial que incluye una comparación en parámetros como la complejidad de cálculo, la inversión en tiempo, su fiabilidad y el alcance de dichos métodos respecto a los proyectos que se evalúan.

Técnica	Complejidad de cálculo	Inversión de tiempo	Fiabilidad	Alcance
Análisis Multicriterio	Sencilla	Mínima	Baja	Pequeños Proyectos
Utilidad Multi-atributo	Compleja	Máxima	Media	Pequeños y medianos proyectos
Electre III	Compleja	Máxima	Media	Medianos y grandes proyectos
A.H.P.	Compleja	Máxima	Alta	Medianos y grandes proyectos

Tabla 2.2. Tabla comparativa de métodos comerciales para asignación de pesos

2.3.1.6. Métodos analíticos de toma de decisión

Para el proceso de toma de decisión, se han desarrollado multitud de metodologías y técnicas que se abordan desde distintas perspectivas. Dentro de ellas se encuentran métodos de evaluación y decisión multicriterio que no consideran la posibilidad de encontrar una solución óptima sino en función de las preferencias del agente decisor y de objetivos pre-definidos (usualmente conflictivos), el problema (Ávila, 2000; Ríos et al 1989; Aragonés et al 1997; Keeney et al ,1993) se centra en:

- Seleccionar la o las mejores alternativas
- Aceptar alternativas que parecen “buenas” y rechazar aquellas que parecen “malas”
- Generar una ordenación “ranking” de las alternativas consideradas

Estas metodologías pueden agruparse en dos grandes grupos, por un lado, de acuerdo a la información sobre las preferencias del decisor y, por otro lado, según el número de alternativas. En la tabla 2.3. y 2.4 se exponen, respectivamente, algunas de estas metodologías junto con sus características, para con posterioridad explicar algo más

TÉCNICA	CARACTERÍSTICAS	METODOLOGÍAS
Información nula sobre las preferencias del decisor	Se presenta porque o bien el decisor no acepta los axiomas de existencia de la función de valor o por que aceptándolos es difícil su construcción. El flujo de información va desde el analista hasta el decisor	Ponderaciones Restricción Simplex
Información parcial sobre las preferencias del decisor	Las relaciones atributos – objetivos pueden ser tan sencillas que se identifican ambas variables, por otra parte, el conjunto de alternativas es discreto. El flujo de información va desde el decisor hasta el analista	Secuencial funciones de valor vectorial Aproximación interactiva del conjunto eficiente Lexicográfico Basados en distancias Programación por metas y de compromiso Satisfacientes
Información en dos sentidos. Métodos Interactivos.	Se basa en evitar la construcción de la función de valor en todo su campo de existencia y buscar una solución que utilice solo información local respecto a las preferencias del decisor. En lugar de actuar con un escenario fijo en todo el proceso de solución, se tienen escenarios diferentes en una serie de etapas en donde el analista presenta una solución provisional al decisor y el decisor expresa su opinión sobre ella	ZIONTS – WALLENIUS / STEM Sucedáneo de las tasas de intercambio MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) ARIADNE / SEMOP Sumas Ponderadas Interactivas Visual Interactivo Geoffrion, Dyer y Feinberg Surrogate Worth Tradeoff

Tabla 2.3. Métodos empleados en la evaluación de acuerdo a la información sobre preferencias

TÉCNICA	CARACTERÍSTICAS	METODOLOGÍAS
Infinito continuo	Si el conjunto de alternativas es infinito, se suelen aplicar aproximaciones basadas en optimización, en la que se supone que los distintos objetivos pueden ser expresados en un denominador común mediante intercambios	Programación por metas y programación por compromiso
Infinito Discreto	Incluye casos con número pequeño de alternativas y varios criterios. Se suelen denominar decisiones con multiatributos. El punto de partida es una matriz en la que un elemento i representa una cierta valoración de la decisión	Métodos de agregación: <ul style="list-style-type: none"> • <u>Directos</u> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Teoría Utilidad multiatributo (MAUT) • <u>Jerárquicos</u> A.H.P. / A.N.P. Métodos basados en relaciones de orden como métodos de superación: <ul style="list-style-type: none"> ✓ ELECTRE ✓ PROMETHEE ✓ TODIM ✓ TOPSIS
Finito Discreto	La decisión se basa en las diversas características o atributos de las alternativas respecto a los criterios de decisión relevantes. Se les denomina "Decisión Multicriterio Discreta"	Métodos de la decisión Multiobjetivo

Tabla 2.4. Métodos empleados en la evaluación multicriterio de acuerdo al número de alternativas

2.3.1.6.1. De acuerdo a información sobre preferencias

De acuerdo a la información que sobre preferencias tenga el decisor, estos métodos pueden agruparse en tres modalidades (ver tabla 2.3):

- Técnica en la que la información es nula sobre las preferencias
- Técnica en la que la información es parcial sobre las preferencias del decisor
- Técnica en la que la información es completa y la información es en ambos sentidos

La **Técnica en la que la información es nula sobre las preferencias** del decisor se presenta porque o bien el decisor no acepta los axiomas de existencia de la función de valor, o porque aún, aceptándolos, puede ser difícil y laboriosa la construcción de la citada función. El problema por tanto se puede enfocar desde otras perspectivas (Ríos, et 1989): modificar axiomas para introducir funciones de valor vectoriales, mantener la idea de la función de valor escalar pero construyéndola sólo localmente y llegar en etapas sucesivas a la optimización mediante los métodos llamados interactivos (se explican en apartados posteriores) o introducir otras ideas que pueden estar ligadas con la función de valor. Dentro de esta técnica se encuentran las siguientes metodologías: *Método de las ponderaciones*, *Método de las ε restricciones* y *el método simplex*.

Estos métodos se basan en la generación de un conjunto eficiente de soluciones. La estrategia de este tipo de problemas es elegir una caracterización conveniente del conjunto eficiente, adoptar una forma de variación de los parámetros que participan en la caracterización y resolver los diferentes problemas. El inconveniente de este tipo de problemas es que en general no se obtendrá todo el conjunto, pues el conjunto de variación de parámetros es infinito. Por tanto, se tratará de escoger un subconjunto suficientemente rico del conjunto paramétrico de tal manera que se obtenga un conjunto representativo del conjunto eficiente sin hacer excesivo gasto computacional.

Con el número de puntos del conjunto eficiente corresponde al decisor elegir entre ellos. Esta elección la puede realizar a través del conjunto de Pareto el cual pone de manifiesto el interés de llegar a métodos numéricos muy rápidos de obtener puntos eficientes por una parte y por la otra estudiar métodos de reducción de la dimensión del conjunto eficiente.

La **Técnica en la que la información es parcial sobre las preferencias del decisor** abarca problemas en que las relaciones atributos – objetivos pueden ser tan sencillas que se identifican ambas variables y por otra parte, el conjunto X (de decisiones) es discreto. El flujo de decisión va desde el decisor hasta el analista. Los métodos que abarca esta técnica son: *Método Secuencial de las funciones de valor vectorial*, *método lexicográfico*, *método basado en*

distancias, método de programación por metas y programación por compromiso, métodos satisficentes.

El problema principal en este planteamiento (Ríos et 1989) está en la dificultad práctica de construir una función de valor (v), ya que en la mayoría de casos el decisor no puede o tiene dificultades serias para dar la información necesaria para su construcción. La idea de estos métodos para encontrar la solución es reducir progresivamente el conjunto eficiente, para ello es necesario establecer una estructura jerárquica de objetivos pues mediante la ascensión a través del mismo se reduce la dimensión y por tanto el conjunto de soluciones eficientes. De esto se deduce que se requieren resultados que permitan construir una función (de valor vectorial) que represente la ascensión en la jerarquía y que relacione los conjuntos eficientes en dos etapas sucesivas.

- Método Secuencial de las funciones de Valor Vectorial

Este método vale para un número finito o infinito de decisiones, tiene en cuenta las preferencias del decisor con hipótesis muy amplias y va reduciendo el conjunto de decisiones óptimas compatibles con el sistema de preferencias del decisor en pasos sucesivos en el que puede ir precisando sus preferencias al considerar criterios más estrictos. De esta manera se reconoce como un método interactivo.

El proceso comienza cuando el decisor no está satisfecho con las preferencias entonces él está dispuesto a dar más información, lo que podría permitir la ascensión de un escalón en la jerarquía de objetivos, construyendo de nuevo la función y el conjunto de alternativas posibles, si nuevamente no está de acuerdo vuelve y repite el proceso otorgando más información hasta llegar al nivel superior de la jerarquía con lo que el decisor es capaz de elegir una alternativa óptima o bien ya no puede dar más información.

- Método Lexicográfico o método de optimización secuencial

Creado por Debreu durante los años cincuenta requiere que el decisor ordene por importancia los objetivos considerados en el problema. Una solución preferida bajo este enfoque se define como aquella que maximiza el mayor número de objetivos posible, comenzando con el más importante y descendiendo en la jerarquía establecida. La desventaja de este método es que el decisor debe fijar el orden de importancia previamente por lo que debe tener gran cantidad de información sobre el problema. Esto es difícil pues en algunos casos no está claro cuál es el objetivo más importante, de allí la complicación en asignar prioridades.

Hay variantes de este método en el que después de maximizar el objetivo más importante, el segundo se maximiza pero restringiendo el primero mediante la asignación de un porcentaje. Los otros objetivos se fijan de la misma manera hasta llegar a evaluar todos y cada uno de ellos.

- Método basados en distancias

Este método se basa en aceptar el mejor o el máximo de acuerdo a una distancia la cual de alguna forma refleja la solución más preferida de tal manera que se desvíe menos de las metas o valores deseados. Si se consideran soluciones que no son factibles se debe tomar como se muestra en la figura 2.2. la distancia más próxima a un vector de metas (z^{\wedge}) que se establece en base a los objetivos (z). Como la distancia que mide la desviación no es única la solución dependerá por tanto de la distancia que se tome así como del punto z' fijado por el decisor.

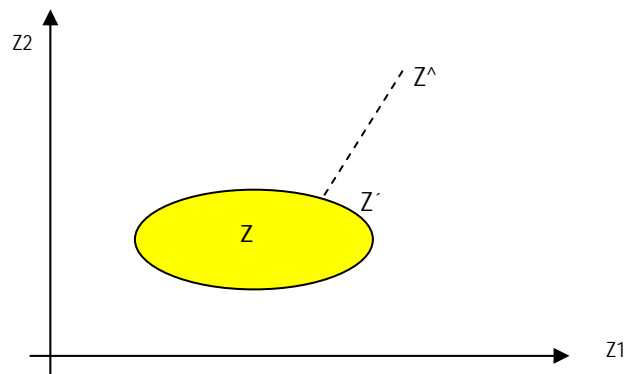


Figura 2.2. Visualización gráfica del método de las distancias

- Método de programación por metas y programación por compromiso

La programación por metas fue propuesta por Charnes et al 1961. Este método requiere que el decisor determine metas para los objetivos que se desean alcanzar y una solución preferida se define como aquella que minimiza la desviación a las metas propuestas. Aquí se transforma el problema a un problema lineal. Se introducen variables de desviación por exceso y defecto respectivamente del objetivo de su meta. Este método se puede considerar como un método de distancias en que éstas se miden como en una ciudad cuadrículada por manzanas de casas.

En relación al método de programación por compromiso fue introducido para problemas continuos pero luego aplicada a problemas discretos. Lleva a los conceptos de solución y conjunto de compromiso, y que luego Zeleny la combinó con la noción de ideal desplazado, como una técnica interactiva para reducir el conjunto de soluciones de compromiso hasta llegar a la "mejor" solución de compromiso.

- Métodos satisficentes

Este método se basa en axiomas realistas dentro de la toma de decisión. Incertidumbre respecto a las consecuencias de cada alternativa, información incompleta respecto a las

consecuencias de cada alternativa e imposibilidad por parte del decisor de captar y procesar la complejidad y toda la información existente.

Este método no se basa, como los anteriores, en encontrar un objetivo óptimo sino en un objetivo de satisfacción. Aquí un conjunto satisfaciente S se define tal que su resultado satisface la decisión y de esta manera siente que ha alcanzado una solución óptima.

El objetivo de los métodos interactivos en los que la **Técnica en la que la información es completa y la información es en ambos sentidos** consiste en buscar una solución que utilice información con respecto a las preferencias del decisor. El proceso se basa en que el analista presenta una solución provisional al decisor y este por su parte expresa su opinión sobre ella, a consecuencia de lo cual se vuelve a comenzar o se concluye.

La idea de esta solución es introducir la noción de decisión de "pareto satisfaciente". Se fija un nivel de satisfacción por parte del decisor del cual se obtiene una solución con la que se designa la solución de pareto más próxima al nivel de satisfacción fijado desde un comienzo. Si tal solución no es aceptada por el decisor, se supone que este pasa a un nuevo nivel de satisfacción mediante un operador G . El proceso continua hasta que el decisor obtiene una solución que esta dispuesto a aceptar y la cual llena el nivel de satisfacción esperado. Los métodos que incluyen esta técnica son: *Zionts – Wallenius, Stem, sucedáneo de las tasas de intercambio, MACBETH, ARIADNE, SEMOP, Sumas ponderadas interactivas, visual interactivo* entre otros.

- Método de ZIONTS-WALLENIIUS

Desarrollado por Zionts et al (1976). El método utiliza una función de valor implícita que constituye un orden de preferencia del decisor y que es una función lineal de las funciones objetivo. Este método supone que hay un espacio de decisiones X que es convexo y definido por restricciones lineales al igual que las funciones objetivo. Aquí la solución preferida está constituida por uno de los puntos extremos de X . Inicialmente el decisor debe elegir un conjunto de pesos para formar la ponderación lineal de los objetivos, que por aplicación del método de las ponderaciones generará un punto extremo eficiente (Ríos et 1989). Dicho punto puede no ser aceptado por el decisor por tanto el proceso continúa con la presentación de nuevos puntos hasta que el decisor muestre su conformidad.

- Método de STEM

El objetivo del método es hacer mínima la distancia a la solución ideal mediante modificaciones de este criterio derivadas de las afirmaciones del decisor sobre las soluciones obtenidas. El método es valido para problemas continuos y discretos. Se asignan sucesivamente pesos a las distancias de las soluciones, que se van obteniendo iterativa mente al punto ideal.

- Método sucedáneo de las tasas de intercambio

Propuesto por Haimés et al (1974). El método se basa en funciones de valor implícita. El decisor determina tasas de intercambio entre pares de objetivos y no asigna valores de forma directa a cada uno de ellos. El método tiene dos fases: Una primera en que genera el conjunto eficiente o parte de él, que se utiliza para que a partir de la interacción del decisor sobre sus preferencias en ese conjunto se puedan determinar las funciones de intercambio; en la segunda, se selecciona del conjunto de soluciones eficientes, antes generado, aquella que sea más preferida.

- Método de las metas satisficentes

El método se basa en fijar unos niveles o metas para los objetivos que se consideran aceptables. En cada paso del método se fija aquella función objetivo cuya meta sea la menos satisficente, y se considera el problema de programación, que consiste en maximizar la citada función objetivo sujeta a las restricciones del problema más las que se obtienen de imponer que los demás objetivos superen las metas fijadas anteriormente por el decisor (Ríos et al 1989).

- Método ARIADNE

Es un método propuesto por Goicochea, A. (1991). Calcula a partir de un modelo lineal, los valores máximo y mínimo posibles de cada alternativa en base a los pesos obtenidos por programación lineal y a partir de la información de preferencias otorgada por el decisor.

- Método MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique)

Es un método desarrollado por Bana et al (1994). Mide el grado de preferencia de un decisor sobre un conjunto de alternativas. Este método construye una función criterio en base a la preferencia local, es decir, que los juicios del decisor conciernen únicamente a un punto de vista fundamental. Posteriormente determina los parámetros relacionados con la información entre criterios (pesos) en la fase de agregación.

2.3.1.6.2. De acuerdo al número de alternativas

Si el conjunto de **alternativas es infinito**, se suelen aplicar aproximaciones basadas en optimización, en la que se supone que los distintos objetivos pueden ser expresados en un denominador común mediante intercambios. Dentro de esta clasificación se encuentran los *métodos de programación por metas y programación por compromiso*.

Para un **número finito discreto** pequeño de alternativas y varios criterios, se suelen denominar técnicas de decisiones con multiatributos (Este tipo de problemas también se

denominan compensatorios). El punto de partida es una matriz en la que un elemento *i* representa una cierta valoración de la decisión. Estos métodos se diferencian sobre la base de si las ventajas de un determinado atributo o criterio pueden ser intercambiadas por las desventajas de otro atributo o, si no es posible este intercambio. Una estrategia de elección es compensatoria si los intercambios de logros entre atributos (trade-offs) están permitidos. Dentro de estas técnicas se encuentran los *métodos de agregación* y los *métodos basados en relación de orden*.

- Métodos de agregación

Consisten básicamente en la aplicación de procedimientos matemáticos para sintetizar los valores obtenidos por cada alternativa respecto a todos los criterios considerados en el análisis. Los valores obtenidos pueden referirse tanto a las puntuaciones de las alternativas respecto de algún criterio, como a la utilidad que reporta el puntaje obtenido en dicho criterio. (Flamet, 1999). Dentro de estos métodos de agregación existe otra clasificación

- Métodos directos dentro del cual se incluyen *metodologías como la Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT)*
- Métodos Jerárquicos: Dentro de estos se encuentra el *A.H.P. (Analytical Hierarchy Process)* y el *A.N.P. (Analytical Network Process)*. Estas metodologías fueron desarrolladas por (Saaty, 1985). El A.H.P. involucra todos los aspectos concernientes a la toma de decisión: Modela el problema a través de una estructura jerárquica, utiliza escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, sintetiza los juicios emitidos y entrega un ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos. (Arancibia et al 2003).

Esta metodología propone una manera de ordenar el pensamiento analítico, de la cual se destacan tres principios básicos: el principio de la construcción de jerarquías, el principio de establecimiento de prioridades y el principio de la consistencia lógica. (Para mayor detalle del método leer el anexo A).

El A.N.P. por su parte, provee un esquema para entrar juicios y medidas. Estos juicios se derivan de una escala de prioridades previamente establecida. Adicionalmente se hacen unas comparaciones por pares para obtener prioridades. El A.N.P. se divide en dos partes. La primera es un control de jerarquía o de red de objetivos y criterios que controlan las interacciones del sistema bajo estudio. La segunda corresponde a muchas sub-redes que pertenecen a cada criterio. El A.N.P. ha sido aplicado a una gran variedad de decisiones: marketing, medicina, entorno social, político y muchos otros.

Aunque muchos problemas de decisión son mejor estudiados a través del A.N.P., se hace deseable comparar resultados obtenidos con el A.H.P. respecto al tiempo en que se obtienen los resultados, al esfuerzo empleado en emitir juicios y a la relevancia y exactitud de los resultados.

- Métodos basados en relación de orden, entre los que se enmarcan los métodos de superación

Estos métodos se refieren a la comparación de dos alternativas respecto a todos los criterios mediante el uso de relaciones binarias. Este incluye las siguientes metodologías de uso frecuente: *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *TODIM*, *TOPSIS* (Flamet, 1999).

PROMETHEE (Preferente Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)

Desarrollado por Brans et al 1985. Consiste en la construcción de relaciones de superación valorizadas, incorporando conceptos y parámetros que poseen alguna interpretación física o económica fácilmente comprensibles por el decisor. PROMETHEE hace uso abundante del concepto de seudocriterio (diferencia de puntaje de dos acciones respecto a algún criterio. Se produce un umbral de indiferencia) ya que construye entre cada par de acciones ordenadas a y b , $\pi(a,b)$, tomando en cuenta la diferencia de puntuación que esas acciones poseen respecto a cada atributo. La valuación de esas diferencias, pueden realizarse mediante seis funciones de valor posibles y que son utilizadas de acuerdo a las preferencias del decisor, quien además debe proporcionar los umbrales de indiferencia y de preferencia asociados a estos pseudo criterios.

ELECTRE

Pertenece a la familia de métodos basados en relaciones de superación. Aquí se decide sobre la determinación de una solución que sin ser óptima puede considerarse satisfactoria o bien se determina una jerarquización de las acciones, alternativas bajo análisis. Este método fue desarrollado por la escuela francófona (Francia, Bélgica, Suiza). En la actualidad han sido desarrollados los procedimientos ELECTRE I,II,III,IV,IS y ELECTRE TRI. (Para mayor información ver el ANEXO B)

TODIM (Tomada de Decisión Interactiva Multicriterio)

Desarrollada por Gomes et al 1992. Tiene en cuenta la toma de decisión bajo riesgo. El método prescribe una acción a través de una priorización de todas las alternativas. El riesgo asociado a cada alternativa será un valor adimensional, en la medida en que no se prefiera un objetivo sobre los restantes, es decir que se respeta la multidimensionalidad del problema de decisión. Los riesgos parciales asociados a una

alternativa determinada, pueden obtenerse fácilmente a partir de las preferencias de los expertos en el caso de criterios cualitativos o mediante los cálculos obtenidos con los criterios cuantitativos.

TOPSIS (Technique for Order Preference by similarity to Ideal Solution)

Es la denominada metodología de programación por compromisos (explicada en el apartado 2.3.6.1.2). Es utilizada para identificar soluciones que se encuentran lo más cerca posible a una solución ideal aplicando para ello alguna medida de distancia. Las soluciones así identificadas se denominan soluciones compromiso y constituyen el conjunto de compromiso.

Durante el desarrollo del apartado 2.3.1.6. se han considerado una gran variedad de metodologías aplicables a los problemas de toma de decisión multicriterio. Algunos de estos métodos se basan en la construcción de la función de valor en la cual se realizan suposiciones más o menos consistentes con las preferencias del decisor. Ya que los problemas más conocidos se fundamentan en dicha teoría, a continuación se pasa a explicar sus generalidades y sus mecanismos de funcionamiento.

2.4. LA FUNCIÓN DE VALOR

2.4.1. Concepto y Generalidades

Numerosas son las definiciones que existen sobre la función de valor, (León, 1993) la define como un incremento de beneficio en magnitud de un atributo con respecto a otro. (Aragonés et al 1997) establece que la función de valor debe reflejar las preferencias del decisor a partir de un valor que es una escala en reales. Gal, Stewart, Honne la describen como la modelación de las preferencias del decisor en diferentes niveles. (Ríos et al 1989) la define como la traducción del sistema de preferencias del decisor dentro de una escala con valores en \mathfrak{R} (reales).

Al recapitular las diferentes concepciones que se tienen sobre la función de valor, se puede concluir que su objetivo básico es transformar la importancia de los atributos o variables (reflejada en un número) a una escala común entre ellos.

Este sistema de preferencias puede enmarcarse bajo dos situaciones: una en el cual se conocen los valores de cada criterio con certeza asociado a su alternativa. En este caso la función se denomina "Función de Valor" y otra en el cual los criterios se modelizan mediante variables aleatorias asociadas a cada alternativa. Para este caso la función se denomina "Función de Utilidad" (Aragonés et al, 1997).

Como las funciones de valor solamente brindan información sobre las preferencias del decisor, es esencial que se satisfagan dos propiedades (Gal et al 1999)

- Transitividad: En una situación estática las preferencias pueden ser transitivas
- Comparabilidad: Bajo el contexto de la decisión, el decisor debe ser capaz de comparar entre dos opciones o ser indiferente entre las mismas. Si dos condiciones se satisfacen entonces es posible determinar una función de valor tal que:

$$\begin{array}{ll} A \succ B & V(A) > V(B) \quad A \text{ es preferente a } B \\ A \sim B & V(A) = V(B) \quad A \text{ es indiferente a } B \end{array}$$

Adicionalmente se deben: Verificar las condiciones de existencia de la función de valor, seleccionar la forma adecuada a la situación de la decisión, construir tal función a partir de la estructura preferencial revelada por el decisor y contrastar la coherencia de tal representación de las preferencias.

2.4.2. Condiciones de la existencia de la función de valor

Para verificar las condiciones de existencia de la función de valor, se exponen algunos conceptos que sirven de soporte para la posterior comprensión de este apartado

- Como no se pueden comparar las magnitudes del atributo z_i con los atributo z_j para $i \neq j$ puesto que cada uno de los criterios reflejan unidades totalmente diferentes (Keeney et al 1976) se necesita una función de valor que relacione los valores de los atributos con cada una de las alternativas x . Esto es: $z_1(x), \dots, z_n(x)$. Esto significa que una alternativa se prefiere a otra cuando el valor asociado a la primera es mayor que el valor asociado a la segunda (si la preferencia es en sentido maximizador).
- Dos puntos cualquiera z y z' son comparables si y solo si ocurre una y sólo una de las siguientes situaciones:

$$\begin{array}{ll} z \text{ es indiferente a } z' & (z \sim z') \\ z \text{ se prefiere a } z' & (z \succ z') \\ z \text{ es menos preferida que } z' & (z \prec z') \end{array}$$

- Las relaciones binarias introducidas por v son: preferencia estricta $\{\succ\}$ e indiferencia estricta $\{\sim\}$, las cuales tienen las siguientes propiedades:

$$\{\succ\} \text{ es un orden débil (asimetría y negativamente transitiva)}$$

$\{\sim\}$ es una relación de equivalencia (reflexiva, simétrica y transitiva)

Aclarados los conceptos que definen características de la función de valor se presentan a continuación tres teoremas YU (1985) y Rios et al 1989 que establecen las condiciones de existencia de la función de valor

Definición. Sea \succsim una relación binaria sobre Z . Entonces $A \subseteq Z$ es \succsim -denso en Z si y solo si cualquier $z_1 \sim z_2$ con z_1 y z_2 pertenecientes a Z pero no a A , existe un z en A tal que $z_1 \succ z$ y $z_2 \sim z$.

Teorema

Existe una función de valor v sobre Z para la relación $\{\sim\}$ si y sólo si:

- i) $\{\sim\}$ sobre Z es un orden débil y
- ii) Existe un subconjunto numerable de $\{Z \sim\}$ que es \succsim -orden denso en $\{Z \sim\}$ con $\{Z \sim\}$ el conjunto de todas las curvas de isovalor de v en Z y $z_1 \in a \sim$ la relación definida sobre $\{Z \sim\}$ tal que $a \sim, b \sim \in \{Z \sim\}$, $a \sim \succsim b \sim$ si y sólo si $a \succ b$ o $v(z_1) > v(z_2)$ para cualquier $z_1 \in a \sim$ y $z_2 \in b \sim$. La relación \succsim es un orden estricto sobre $\{Z \sim\}$.

Teorema (Fishburn)

Suponer que Z es un conjunto rectangular de \mathfrak{R}^N y que se cumplen las siguientes condiciones:

- i) $\{\succsim\}$ sobre Z es un orden débil
- ii) $z_1 \geq z_2$ (nótese que $z_1 \neq z_2$) implica $z_1 \succ z_2$ (dominancia)
- iii) Si $z_1 \succ z_2$ y $z_2 \succ z_3$ existe $\alpha, \beta, 0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1$, tal que $\alpha z_1 + (1 - \alpha) z_3 \succ z_2$ y $z_2 \succ \beta z_1 + (1 - \beta) z_3$

Entonces existe una función de valor v sobre Z para $\{\succsim\}$

Teorema (Wold-Debreu)

Suponer que Z es un conjunto rectangular de \mathfrak{R}^N y que se cumplen las siguientes condiciones:

- i) $\{\succsim\}$ sobre Z es un orden débil estricto
- ii) $z_1 \geq z_2$ (nótese que $z_1 \neq z_2$) implica $z_1 \succ z_2$ (dominancia)

iii) si $z_1 \succ z_2$ y $z_2 \succ z_3$ existe $\lambda \in [0, 1]$ tal que $\lambda z_1 + (1 - \lambda)z_3 \sim z_2$

Entonces existe una función de valor $v: Z$

2.4.3. Selección de la forma adecuada a partir de la estructura preferencial revelada por el decisor

Una vez se aplique la existencia de la función de valor, la forma de la estructura preferencial revelada por el decisor se basa en la dependencia o independencia de los atributos.

- Si algún atributo z_i no es independiente de los otros el decisor utiliza un modelo de función de valor general (explicado en detalle en el apartado 2.4.4.1.)
- Si cada atributo no es independiente del conjunto complementario el decisor utiliza el modelo de descomposición parcial; por ejemplo $v(z) = F(z_1, \dots, v_1(z_1), \dots, z_n)$
- Si no se verifican las condiciones de independencia preferencial mutua el decisor utiliza el modelo de descomposición total $v(z) = F(v_1(z_1), \dots, v_n(z_n))$
- Si se verifican las condiciones de independencia preferencial mutua el decisor utiliza el modelo aditivo $v(z) = v_1(z_1) + \dots + v_n(z_n)$

De acuerdo a las precedentes verificaciones de independencia o dependencia de los atributos se construyen las diferentes tipologías de funciones de valor o utilidad (según sea el caso) que a continuación se explican

2.4.4. Construcción de la función de valor

Construir una función de valor no es trabajo fácil y en especial en el caso de que haya interdependencia entre los atributos. No obstante, se han creado sin número de metodologías que reflejan las preferencias del decisor como se muestra en la tabla 2.5.

A continuación se hace una recapitulación de las metodologías existentes junto con un análisis de las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Se incluyen métodos para el caso de la función de valor con certidumbre y para el caso de incertidumbre.

CONSTRUCCIÓN FUNCIÓN DE VALOR	
FUNCIÓN DE VALOR CON CERTIDUMBRE	Total Implied Value Method (NCIC)
	Método de la Bisección
	Método de las diferencias iguales
	Método de Rios y YU <ul style="list-style-type: none"> • Método de función de valor general • Método de funciones de valor aditivas <ul style="list-style-type: none"> ○ Método de la sucesión estándar o de la sierra ○ Método de graduación directa ○ Método del punto medio
FUNCIÓN DE VALOR CON INCERTIDUMBRE	Método convencional
	BRLT (Basic Referente Lottery Tickets)
	A fuzzy logic Stochastic Technique for projects selection

Tabla 2.5. Métodos para la construcción de la función de valor

Función de valor con certidumbre

2.4.4.1. Total Implied Value" Methods : NCIC (Nontraditional capital Investment Criteria)

Creada por Norris et al 1995. La construcción de la función de valor se hace expresada en términos monetarios. Esta tiene en cuenta beneficios y costos respecto a una alternativa base. Para construir la función se comparan los incrementos de valor para cada una de las alternativas en un atributo específico con respecto a una alternativa base. Los incrementos de valor estimados se grafican versus el valor de los actuales niveles de funcionamiento de tal manera que se obtenga una función de valor implícita "implied value function (IVF)" El eje de las abscisas corresponde con valores cuantitativos en caso de ser atributos medibles con sus respectivas unidades.

En este caso, la función se utiliza además de ordenar las alternativas, identificar una selección de las mas preferidas, seleccionar la más preferida, se usa para corroborar la consistencia de los juicios del emisor.

2.4.4.2. Método de la Bisección

Creado por Pfanzagl (1968). De acuerdo al procedimiento explicado por (Leon, 1993) para construir la función inicialmente se debe identificar la peor y la mejor magnitud en el atributo

(para ello se puede o bien elegir entre dos de nuestras propias alternativas o establecer dos anclajes externos, aunque siempre conviene que se siga el mismo criterio en todos los atributos).

Posteriormente se debe asignar el valor de 0 a la menor y 100 a la mayor de las alternativas en el atributo en estudio

Luego debe definir qué magnitud del atributo produce un valor medio en la función de valor. Ese valor puede ser cualquier valor entre el máximo y el mínimo. Se le asigna un valor de 50. Una vez establecidos estos valores se debe repetir el proceso para encontrar los cuartiles, esto es, los X_i cuyos valores son intermedios entre 0 y 50 y entre 50 y 100.

Con estos valores, se deben representar las magnitudes del atributo (abscisas) y sus correspondencias según la función de valor. Después se traza la curva suavizada que une todos los puntos de la función.

Para la elaboración de esta función, solamente se necesitan tres puntos. A partir de allí, podemos obtener los valores cuando tenemos muchas alternativas.

Ventaja – Desventaja: El método es relativamente simple y rápido, pero exige al decisor un mayor compromiso con la obtención de los valores para el atributo. Es un método sin probabilidades y sin incertidumbres.

2.4.4.3. Método de diferencias iguales (León,1993)

Se basa en la técnica de la diferencia Standard (Krantz, Luce, Suples y Tversky). En este método se valora la indiferencia entre magnitudes lo que supone un grado más en la capacidad del decisor para discriminar los beneficios asociados a los cambios de magnitudes de la variable (atributo) en estudio.

Este consiste en determinar la diferencia de cantidades más pequeña con significado, a partir del valor más bajo (X_0) de la variable (X_1-X_0). El siguiente paso consiste en establecer otra diferencia por encima de la anterior (X_2-X_1) cuyo beneficio sea similar al producido en la primera diferencia. Estas diferencias se repiten sucesivamente hasta que se alcance la cantidad máxima de la variable en estudio. A partir de estos valores, se construye la función de valor deseada.

Ventaja: Siempre se define un mínimo y un máximo. Es más confiable por la precisión de los datos proporcionados por el decisor.

Desventaja: No siempre el decisor tiene claros los valores ni la precisión que se necesita para este caso.

2.4.4.4. Metodología de RIOS y YU

Rios et al 1989 y Yu 1985 proponen cuatro modelos para construir la función de valor dependiendo de la estructura preferencial revelada por el decisor (ver apartado 2.4.2)

- Modelo de función de valor general

Este modelo se basa en dos apartados: Uno es la construcción de superficies de isovalor o indiferencia. El otro es la construcción, propiamente dicha, de la función de valor a partir de las superficies de isovalor.

La idea básica de la superficie de isovalor es que se parte de un punto (z_1, z_2) y se da un incremento h_1 a z_1 y se obtiene, por consulta al decisor, el incremento negativo $-h_2$ de la otra variable z_2 , de modo que sea

$$(z_1, z_2) \sim (z_1 + h_1, z_2 - h_2)$$

Este cociente h_2/h_1 se llama tasa de intercambio o sustitución entre z_1 y z_2 . Por pasos sucesivos se va obteniendo la curva de isovalor y mediante un ajuste a un tipo de curva fijado, obtenemos la curva buscada.

Ventaja: Se va comprobando la consistencia de las preferencias expresadas por el decisor variando los puntos iniciales y los incrementos.

- Modelo de funciones de valor aditivas

Existen tres métodos para las funciones de valor aditivas (Rios et al 1989, Keeney et al 1976; Yu, 1985).

- Método 1 de la sucesión estándar (de Luce-Tukey) o de la "sierra"

El método consiste en asignar a x_0, y_0 los mínimos de x, y poniendo $v_x(x_0)=0, v_y(y_0)=0$. Luego elegir un nivel x_1 tal que $v_x(x_1)=1$ (es decir, elegimos una unidad para la escala de x). Posteriormente se debe pedir al decisor que fije y_1 tal que $(x_1, y_0) \sim (x_0, y_1)$. Con esto se tiene: $v_x(x_1) + v_y(y_0) = v_x(x_0) + v_y(y_1)$, o sea $1 = v_y(y_1)$ (es decir, y_1 es la unidad para y). Se sigue con el mismo procedimiento para x_2 hasta obtener la escala de x por la función $v_x(x)$. Análogamente se construye la $v_y(y)$ y, en consecuencia, la $v(x, y) = v_x(x) + v_y(y)$

La construcción de puntos intermedios en la escala es inmediata y permite hacer nuevas comprobaciones.

Ventaja: Se pueden tener comprobaciones de consistencia en relaciones como:

$$(x_2, y_0) \sim (x_0, y_2) \leftrightarrow v_x(x_2) + v_y(y_2)$$

- o Método 2: Método de graduación directa

El decisor asigna directamente un valor numérico a $v(z_i)$ para cada valor particular de la variable z_i . Esto es más fácil de realizar si z_i es discreta y tiene sólo unos cuantos estados distintos. En caso de que z_i sea continua se debe considerar un intervalo mínimo y máximo al cual se le asigne un valor de 0 y 1 respectivamente. Posteriormente, mediante interpolación lineal obtener $v(z_i)$ o también mediante estimación subjetiva directa de algunos valores para $v(z_i)$.

Desventaja: Método subjetivo

- o Método 3: Método del punto medio

Este método parte de considerar el intervalo $[z_a, z_b]$ limitado por el mínimo y el máximo de z . Si se tiene que z^1 es el punto medio entre z_a y z_b y la preferencia del decisor es la misma entre $z_a - z^1$ y $z^1 - z_b$ obtenemos :

$$v(z^1) - v(z_a) = v(z_b) - v(z^1)$$

$$v(z^1) = \frac{1}{2}(v(z_a) + v(z_b))$$

Ahora si se supone que $v(z_a) = 0$ y $v(z_b) = 1$ de la ecuación anterior, resulta $v(z^1) = 0.5$. Análogamente, se obtienen a partir de z_a y z^1 el punto $z_{0.25}$ tal que $v(z_{0.25}) = 0.25$.

Una vez determinadas las escalas individuales y validado el modelo aditivo

$$V(z) = \sum \lambda_i v_i(z_i) \quad (\sum \lambda_i = 1)$$

Se trata de determinar las constantes λ_i ($i=1, \dots, N$). Para esto basta considerar $N-1$ pares de puntos indiferentes y establecer las correspondientes ecuaciones. Esta idea de obtener las constantes mediante un número suficiente de ecuaciones obtenidas igualando el valor en pares de puntos indiferentes se extiende a otros modelos.

Función de valor con incertidumbre

2.4.4.5. Método Convencional (configuración simple de la función de utilidad)

Cuando existen probabilidades, riesgo e incertidumbre, se usan para construir las funciones de valor y en este caso particular de utilidad, las "loterías". Una lotería es un suceso probabilístico. En la función de utilidad se plasma la actitud del decisor con respecto al riesgo.

Algunos autores (Keeny et al 1976) argumentan que esta técnica es la mejor ya que reflejan la valoración de beneficios por parte del decisor. Otros argumentan (Von Winterfeldt et al 1986) que los errores de medida y las diferencias observadas entre los distintos procedimientos de construcción son mayores que las diferencias mismas entre función de valor y de utilidad, prefiriendo por tanto, la función de valor por su simplicidad de cara al tipo de tarea exigida al decisor.

La construcción de esta función a partir del método convencional se inicia estableciendo un rango de valores de utilidad. Posteriormente se determina la utilidad cuya "utilidad" es 0.5. Se hace la siguiente suposición de forma general:

$$\text{Si } U(X_i, 1) = U(X_{\text{sup}}, P_j) \text{ entonces } U(X_i) = P_j$$

Otra forma construir la función de utilidad es:

- Definir X^* que es la mejor alternativa posible en rango
- Definir X_* que es la peor alternativa posible en rango
- Asignar valores convenientes $U(x^*) = 1$; $U(x_*) = 0$
- Conducir a la recolección de datos para encontrar X_i y p Nota= $U(x_i) = P$ Generalmente $p = 0.5$
- Repetir, substituyendo nuevo X_i en lotería, cuantas veces se desee $X_2 = (X_1, 0.5; X)$

2.4.4.6. BRLT (Basic Referente Loterry Tickets)

Desarrollado por Raiffa (1968). Consiste en definir la mayor (X^*) y la peor (X_*) de las alternativas disponibles en el atributo en estudio. Construir la lotería: $(X^*, P; X_*, 1-P)$; es decir: puede ocurrir X^* con una probabilidad de P , o en caso contrario ocurrirá X_* con una probabilidad de $1-p$. Luego elegir un X_i magnitud de la variable que deseamos conocer su utilidad. Puede ser directamente una magnitud correspondiente a una de las alternativas. Mediante sucesivas preguntas y respuestas con el decisor, cambiando los valores de p , debe establecerse la siguiente relación:

$$X_i > (X^*, P_{\text{máx}}; X_*, 1 - P_{\text{máx}})$$

donde $P_{\text{máx}}$ es el máximo valor de p para el cual el decisor sigue prefiriendo ($>$) la magnitud X_i segura. Con similar procedimiento determinar

$$X_i < (X^*, P_{\min}; X^*, 1 - P_{\min})$$

donde P_{\min} es el mínimo valor de p para el cual el decisor sigue prefiriendo ($<$) la lotería de la cantidad segura X_i . Determinado el intervalo (P_{\min}, P_{\max}) preguntar directamente al decisor por el valor P_i incluido en el intervalo para el cual su preferencia entre la cantidad segura y la lotería se hace indiferente. Finalmente se debe calcular la utilidad de X_i estableciendo como extremos que $U(X^*)=0$ y que $U(X^*)=100$.

$$U(X_i, 1) = P_i(X^*) + (1 - P_i)U(X^*)$$

La ventaja de estos métodos es que presenta de manera formal una situación incierta. La desventaja es que es difícil saber la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

2.4.4.7. A fuzzy stochastic technique for projects selection

Desarrollado por Wong et al 2000. Los pasos que sigue este método son:

- Especificar atributos para la evaluación: hacer un listado de atributos
- Obtener estimaciones de expertos para los atributos: Para atributos inciertos, los expertos consideran subjetivamente el valor optimista y el más pesimista. Estos valores proveen un intervalo de probabilidades en números reales, esto es, $(P_x < a$ o $P_x > b)$. Para atributos cualitativos se escalan de acuerdo a las preferencias del decisor.
- Determinación empírica de las funciones de utilidad: Se han desarrollado significativas teorías para el uso de modelos de utilidad y se resumen básicamente en el trabajo de Keeny et al 1993 en el que básicamente la utilidad o la función puede ser aditiva o multiplicativa. Aquí, para cada atributo, una función es especificada. Un método en el que se especifica la utilidad de la función es "certainty equivalent method" en donde las decisiones se obtienen preguntando al decisor sobre loterías y más específicamente sobre probabilidades. Aquí se otorga al mejor valor una utilidad de uno y al peor un valor esperado 0. Una vez se asignan estos valores y después de más preguntas el decisor admite un valor indiferente entre recibir una cantidad determinada o la lotería.

A partir de este número se puede obtener una utilidad igual al valor esperado para este número: (0.5). Con el mismo procedimiento, se obtiene la utilidad entre el peor valor y el que ahora resulta indiferente. Igualmente el mejor valor y el indiferente. Con estos valores se siguen creando hipotéticas loterías entre los nuevos valores que se obtienen. Al final, la forma de la función de utilidad depende de los juicios de subjetividad.

Comúnmente, las funciones de utilidad son expresadas matemáticamente en términos exponenciales, logarítmicas o polinómicas (Ang et al 1984)

- Representación "difusa" de la utilidad de atributos: Para la representación de la utilidad numérica de "fuzzy (L-R)" se usan tres valores: el peor, indiferente y el mejor. La función se define mediante :

$$\mu M(x) = \begin{cases} L[(m-x)/\alpha] & x < m, \alpha > 0 \\ 1 & x = m \\ R[(x-m)/\beta] & x > m, \beta > 0 \end{cases}$$

donde L y R son funciones monótonas decrecientes, m es el valor medio de M y α y β son extensiones a la izquierda o derecha respectivamente. Cuando estas extensiones son cero, M es un número no existente.

- Determinar el peso para los atributos: No todos los atributos son igual de importantes.
- Derivación de la función de utilidad. Una vez se obtienen los pesos y el número Fuzzy L-R para cada atributo, es necesario substituirlo en el modelo agregado de utilidad para obtener la función de utilidad. Para este caso se utilizan los modelos aditivos y multiplicativos mencionados desde un comienzo.

$$T_A = \sum_{i=1}^n w_i U_i(X_i)$$

$$T_A = \frac{1}{K} \prod_{i=1}^n [K w_i U_i(X_i) + 1] - 1$$

donde K es una constante que es una solución de

$$1 + K = \prod_{i=1}^n (1 + K w_i)$$

y tiene que ser encontrada iterativamente

- Comprobación del dominio estocástico: El mayor defecto de la función de utilidad es que no puede ser usada en el caso en que dos o más alternativas tengan cerca sus puntuaciones por tanto hay que realizar comprobaciones del dominio estocástico. El dominio estocástico es el análisis de la distribución de probabilidades sin especificar si la media o la varianza es el parámetro considerado. En el caso del número fuzzy (L-R) la

probabilidad acumulativa puede ser aproximada por una distribución triangular donde L , H y M son el mínimo, el máximo y el más probable. La desventaja también es el conocimiento de las funciones de probabilidad

Como **conclusión** de este apartado, la metodología que se propone se basa en **funciones de valor de aditivo** pues además de verificar las condiciones de independencia preferencial mutua entre atributos, implica menos esfuerzo y gran rigor científico.

2.5 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

Existen diferentes mecanismos, para la elección de una alternativa dentro de un conjunto de resultados. Con cada mecanismo o criterio, la selección que se realice es diferente. Este cambio se debe a que los diferentes criterios representan distintos comportamientos de los decisores a la hora de decidir.

A continuación se muestran los distintos métodos sistemáticos expuestos por (Cañabate, 1997) que ayudan a elegir la mejor alternativa.

2.5.1. El criterio mini-max o pesimista

Se aplica cuando el decisor es enemigo de correr riesgos y quiere minimizar sus posibilidades de pérdida. Para este método se elige el peor de los resultados que se obtengan de cada una de las alternativas. Esto es, calcular los resultados mínimos de cada alternativa y luego buscar a qué alternativa pertenece el máximo de entre los mínimos.

2.5.2. El criterio optimista

Al contrario del criterio anterior, el decisor tiene una visión optimista. Es un criterio apropiado cuando no existen resultados muy adversos y el decisor necesita a toda costa, un gran éxito ya que un éxito medio no le proporciona gran utilidad (Cañabate, 1997). Para la metodología se elige la alternativa que tenga el mejor resultado posible de entre todos los posibles. Se elige el máximo de cada alternativa y se escoge aquella que le corresponde el máximo entre los máximos.

2.5.3. El criterio de Hurwicz

Este criterio se basa en los dos anteriores. Propone una escala de 0 a 1 donde 1 es un criterio optimista y 0 un criterio pesimista. A partir de esta escala se construye un nuevo

resultado ponderando el peor y el mejor de cada alternativa. Se escoge el máximo entre los resultados ponderados. Este criterio depende básicamente del índice de optimismo del decisor.

2.5.4. El criterio de Savage

Este criterio se basa en que el decisor elige el resultado de la alternativa que menos arrepentimiento le puede provocar, en el peor de los casos, por no haber elegido otras mejores. Se aplica una tabla de arrepentimientos a partir de la tabla de consecuencias esto es, para cada pareja alternativa, se calcula el arrepentimiento restando el resultado correspondiente del mejor resultado posible para ese estado entre todas las alternativas posibles.

2.5.5. El criterio de Laplace

Este criterio también selecciona lo mejor que puede pasar o lo peor que puede pasar. Pondera los distintos resultados que se pueden obtener con cada alternativa y compone así un resultado promedio en base al cual se decide. Este criterio se plantea cuando los decisores desconocen por completo las posibilidades por tanto consideran probabilidades iguales.

2.5.6. El criterio del valor esperado

Se basa en estimar unas probabilidades para el conjunto de resultados posibles. Con esta información adicional, se puede calcular un resultado promedio más preciso que el que se obtuvo con el criterio de Laplace puesto que en su cálculo se ha introducido información disponible sobre las posibilidades de cada evento. La desventaja de este método son las probabilidades subjetivas y no se puede estar seguro de su fiabilidad, sin embargo, es la mejor estimación de la que se dispone y sin lugar a duda es mejor que aplicar el criterio de Laplace.

De los métodos antes expuestos se puede concluir que todos presentan inconvenientes a la hora de seleccionar el mejor resultado. Los criterios pesimista, optimista, y Hurwicz utilizan únicamente una porción de la información disponible además de restringirse a los puntos extremos lo que los convierte en modelos irreales. Por otra parte, el criterio de Hurwicz es más próximo a la realidad pero igualmente, desprecia parte de la información.

Si se analiza el criterio de Savage este utiliza más la información en tanto que compara los resultados de cada alternativa con el mejor de los resultados posibles. El criterio de Laplace utiliza toda la información disponible y con ella se maximiza el beneficio promedio que se puede esperar con cada alternativa.

Estos criterios pueden ser adecuados cuando la incertidumbre del decisor acerca del suceso incierto es absoluta. Sin embargo, este caso raramente ocurre. Los decisores suelen

poseer a menudo algún tipo de información, aunque sea escasa, sobre las posibilidades de que suceda uno otro estado de la naturaleza.

Para la metodología que se plantea, se propone un criterio propio de selección que se basa en la elección de la menor distancia con respecto a un óptimo o valor referencia (se explica con detalle en el apartado 3.4).

2.6. HERRAMIENTAS EXISTENTES PARA LA EVALUACIÓN MULTICRITERIOS

Sentadas las bases sobre la toma de decisión y caracterizadas cada una de sus etapas, se explica a continuación, la aplicación de dicho métodos multicriterio a las diferentes herramientas que se han creado en varios campos: medicina, economía, agricultura, construcción, etc. Respecto a este último sector, los puntos de decisión más estudiados son la selección del contratista y el modo de contratación. La selección del diseño ha sido la menos tratada al ser un problema más amplio y complejo que los citados anteriormente (Ormazabal, 2001).

A continuación se exponen las características principales de las herramientas que se han creado a nivel general y aquellas herramientas que se han creado en el entorno sostenible siendo este nuestro punto de interés.

2.6.1. Herramientas a nivel general

Actualmente existen en el mercado varios paquetes informáticos dedicados a la Decisión Multicriterio discreta como lo son el AIM, ELECTRE, PROMLAC, MCView, entre otros. Específicamente para el caso del AHP, se encuentran productos comerciales como: HIPRE 3+, Expert Choice y Criterium.

Muchos de ellos presentan interfases amigables para el usuario y ofrecen completos resultados y análisis de sensibilidad. Algunos de ellos permiten bajar de Internet demostraciones gratuitas. A continuación se exponen algunas de las herramientas desarrolladas en este ámbito.

2.6.1.1. Metodología PRES II MULTIEXPERTO

Desarrollada por Aragonés et al 1997. Es una metodología aplicable dentro de las técnicas de ayuda a la Toma de Decisión Multicriterio donde se plantea un conjunto de alternativas discreto y finito. La metodología se desarrolla bajo el diagrama expuesto en la figura 2.3. donde el decisor previamente, asigna un peso a cada criterio mediante la importancia de

cada criterio respecto a los demás. Posteriormente asigna a cada alternativa unos valores que indican el nivel de satisfacción que esa alternativa alcanza para cada uno de los criterios.

Con los resultados de esta metodología, se consigue información de tal manera que sirva de ayuda a la resolución del problema de decisión. No se debe extraer la conclusión de que los resultados obtenidos son una verdad absoluta por lo cual, en un informe final se debe analizar la coherencia o incoherencia de los resultados obtenidos y se deben tener en cuenta las circunstancias y los factores que hayan influido en la metodología empleada.

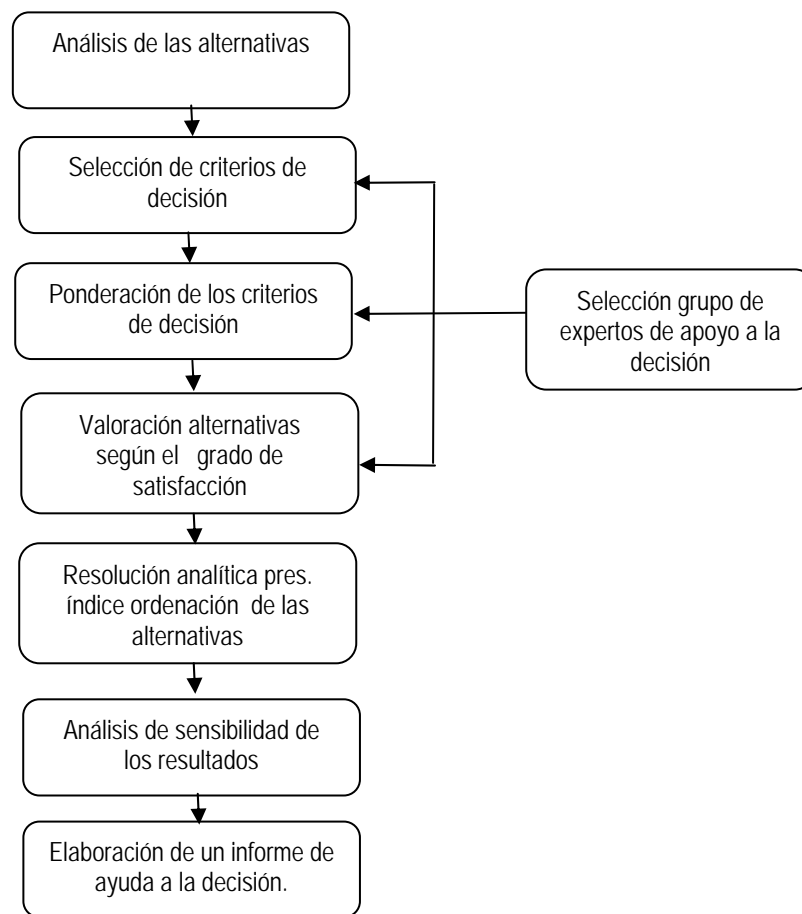


Figura 2.3. Metodología PRES II MULTIEPERTO

2.6.1.2. Generic Multi-Attribute Analysis System (GMAA).

The GMAA es un sistema de soporte de decisión basado en el modelo de utilidad multiatributo aditivo. Es un sistema elaborado en la facultad de informática de la Universidad Politécnica de Madrid por Antonio Jiménez Martín (Jiménez, 2003). Este método se organiza en cuatro pasos:

- Estructuración del problema: Incluye la construcción de una jerarquía de objetivos y la especificación de los atributos para poder evaluar las alternativas consideradas.
- Modelización de las preferencias: La asignación de preferencias implica la asignación de las funciones de utilidad y la importancia relativa de los criterios que se utilizarán posteriormente para la evaluación de las alternativas mediante una función de utilidad multiatributo.

Para asignar funciones de utilidad se basa en dos métodos: el método de los *fractiles* y el método de las *loterías extremas*. Para estos métodos en lugar de determinar un único valor para cada cuestión probabilística, los decisores pueden proporcionar un recorrido o rango.

- Evaluación de alternativas: Utiliza las bases conceptuales de independencia aditiva de (Keeny et al 1993). Adicionalmente incluye los pesos medios normalizados y las consecuencias
- Análisis de sensibilidad: Si el decisor modifica un peso medio normalizado o un extremo de un intervalo normalizado de pesos, una utilidad o una consecuencia, el sistema tiene en cuenta como se propagan estos cambios a través de la jerarquía de objetivos y automáticamente recalcula la utilidad global de cada alternativa y la nueva ordenación

2.6.1.3. TOMASO (Technique for Ordinal MultiAttribute Sorting and Ordering)

Herramienta multicriterio que considera varios puntos de vista y el uso de la integral "choquet" para realizar la ponderación. No considera como todos los métodos los modelos de agregación. Para calcular dicha integral necesita información sobre la alternativa que debe ser bien conocida. Las generalidades del método son:

- Modificación de la evaluación normal en puntajes normalizados.
- Definición de prototipos y asignación de cada uno de las clases.
- Evaluación por medio de la integral de Choquet resolviendo programas lineales o cuadráticos.
- Cálculo de los límites numéricos de las clases.
- Análisis de los resultados.

2.6.1.4. Expert choice

Es un programa comercial que trabaja en ambiente Windows y DOS, es de fácil uso y sirve como mecanismo de derivación de consensos participativos. Los componentes básicos que lo conforman son:

- Estructuración: Es un módulo que ayuda a los tomadores de decisión a identificar y organizar los elementos del problema en cuestión.
- Construcción directa del Modelo: Se ingresa la información respecto a los objetivos, criterios, subcriterios y alternativas.
- Comparación por pares: Hace parte del proceso de evaluación. Aquí se comparan dos elementos respecto a un tercero. En este apartado se obtienen las prioridades de los elementos comparados.
- Síntesis: Se resumen las prioridades obtenidas por los componentes del modelo y se entrega el orden resultante para las alternativas. El programa tiene una opción de reportes de gran utilidad para documentar el proceso.
- Análisis de Sensibilidad: En esta opción se permite analizar y observar gráficamente que tan sensible es el orden resultante de las alternativas a cambios que se hagan en la importancia de los criterios del modelo. El modelo presenta 5 opciones graficas para llevar a cabo el análisis de sensibilidad: Dinámico, Gradiente, Performance, Bi dimensional, Diferencia.

2.6.1.5. Super decision software

Este es un software usado para la toma de decisión con dependencia y retroalimentación. Este implementa la metodología del ANP con muchas adiciones como a menudo

2.6.1.6. A multicriteria Decisión Model to compute optimal treatment packages under constraint conditions

Modelo creado por Gass et al 1999. Esta herramienta informática se desarrolló para optimizar "packs" de tratamientos médicos bajo restricciones de compatibilidad respecto a la persona. La formulación matemática se basa en minimizar y maximizar un problema, usando el principio de entropía y la lógica difusa con el fin de conservar las restricciones respecto a la compatibilidad de la persona. Este es un modelo verdaderamente flexible.

2.6.2. Herramientas en el entorno sostenible

Hasta la fecha son varias las propuestas existentes para establecer una evaluación de la sostenibilidad del edificio. Unos métodos son sencillos de aplicar y otros bastante más complejos y difíciles.

A pesar de los inconvenientes provistos y gracias a las crecientes transformaciones y cambios de los mecanismos de evaluación, se han desarrollado una gran variedad de herramientas para la edificación, estructuradas de tal manera que algunas de ellas pueden ser herramientas de comparación o fuente de información de productos (nivel 1), ser herramientas de diseño o de soporte de decisión (nivel 2), o bien, ser aquellas que evalúan por completo la edificación (nivel 3) (Trusty 2001).

Estas herramientas han sido desarrolladas desde distintas perspectivas y de acuerdo a las necesidades del país de origen. Cubren diferentes actividades, escalas temporales, niveles espaciales y categorías (ambientales, económicas, sociales e institucionales).

Las categorías asociadas con dichos métodos han ido evolucionando, aunque algunas de ellas, han centrado su atención a el entorno ambiental operativo de la edificación lo que dificulta por completo no solo el análisis a través del Ciclo de vida si no el análisis de las mismas, de allí, que gran parte de las herramientas presenten la dificultad de establecer los componentes adecuados para globalizar y encaminar de manera certera los criterios y categorías antes mencionadas (Finch, 1992).

Las herramientas desarrolladas en el entorno sostenible emergieron desde comienzos de los 90 con la aparición de BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), de tal manera que el desarrollo y aplicación de estos, han provisto una considerable experiencia teórica y práctica a través de la década. En la industria de la construcción, estos cambios están referidos específicamente (Cole,1998) a:

- Gestión de la edificación por la organización y consecución de la información, funcionabilidad y operabilidad.
- Identificación de procesos y sucesos para la optimización de los mismos.
- Conocimiento de Estándares: para dar una referencia del mecanismo de funcionamiento, respecto al entorno de las otras edificaciones.
- Ofrecer información de la estructura ambiental, para el diseño de nuevos edificios y en renovación a fin de proveer referencias para que el equipo de diseño pueda formular efectivamente estrategias de diseño (bases de datos).

En el anexo C, se hace una descripción detallada de las herramientas que se han generado en el entorno sostenible. A continuación se enuncian tres herramientas comerciales dirigidas a evaluar la sostenibilidad de edificios, esto con el fin de establecer las coincidencias y divergencias respecto al modelo que se propondrá.

2.6.2.1. BREEAM

Método de evaluación medioambiental para diseño de nuevas oficinas. Tiene como objetivo establecer criterios para obtener un buen rendimiento medioambiental de los edificios a través de una valoración creíble, independiente y objetiva. Su metodología se ha extendido en sucesivas versiones a edificios comerciales, nuevas viviendas residenciales o módulos industriales.

Respecto a la edificación industrial, pretende minimizar impactos ambientales generados durante la construcción de naves industriales y almacenes. Además, pretende promover un ambiente interior saludable. Se trata la valoración del edificio y no trata en absoluto los procesos que pueden desarrollarse en su interior. La herramienta se aplica durante la fase de diseño.

2.6.2.2. GBTool

Evalúa aspectos relacionados con la sostenibilidad de edificios mediante una aplicación informática en Excel. Se estructura en cuatro niveles de cara a introducir datos y efectuar el cálculo de forma jerárquica. La evaluación del edificio se establece mediante puntuaciones cuya escala oscila entre -2 y +5 según sea un criterio insatisfactorio o por el contrario, la mejor solución técnicamente.

2.6.2.3. GBTool Español

Al igual que el GBTool, es un método y una herramienta de evaluación y etiquetado ambiental de los edificios. Esta se basa en una entradas (criterios generales), en una evaluación (ponderación) y en unas salidas (perfiles de comportamiento, ecoetiqueta). La estructura de la herramienta se plantea a través de un orden jerárquico. Se inicia por las áreas, para luego continuar con las categorías, los criterios, sub-criterios (si aplica) hasta llegar a la puntuación.

2.6.2.4. LEED

Es una herramienta que sirve como guía de diseño con el fin de establecer criterios de bienestar hacia los ocupantes de un edificio, reducir los impactos ambientales derivados de la ejecución de los mismos, todo ello sin olvidar el margen de beneficio.

Se analiza el edificio durante tres etapas (concepción, ejecución y finalización de la construcción). Este método evalúa asignando puntuaciones de 1 ó 0 dependiendo de si cumplen

o no los requerimientos técnicos indicados. Una vez asignada la puntuación para cada requerimiento, se suman el conjunto de puntuaciones obteniéndose la calificación del edificio.

2.7. SÍNTESIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

De acuerdo al estado del conocimiento expuesto a lo largo del capítulo y que se sintetiza en la tabla 2.6, se identifican dos puntos que pretenden constituir la aportación de esta tesis. Estos puntos hacen referencia a la constitución de una nueva metodología y a la construcción de una herramienta sostenible para la edificación industrial.

Esta metodología y esta herramienta se fundamentan en la toma de decisión y en el análisis de valor visto desde otra perspectiva. Con esta metodología y por ende con esta herramienta se busca no solamente definir un modo de evaluar diversas alternativas sino de estructurar un procedimiento de tal manera que se guíe al decisor en el análisis y solución de problemas en el entorno sostenible para la edificación industrial.

Respecto a la metodología son dos las aportaciones importantes que hay que destacar:

- La estimación de los pesos se hace escalonadamente para cada nivel de jerarquía de tal manera que ascendiendo en cada uno de ellos, se llega a obtener el valor final de los objetivos a evaluar. Para ello se hace uso de la metodología de decisión A.H.P. (Analytical Hierarchy Process).
- La función de valor se describe con una ecuación lo que facilita el proceso de evaluación. Los parámetros que dependen de dicha ecuación son dados por el usuario lo cual refleja directamente las preferencias de éste.

Por otra parte, del análisis de las herramientas desarrolladas hasta la fecha se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- No hay una herramienta específica dirigida al estudio de la sostenibilidad de un edificio industrial.
- Las herramientas analizadas manejan una gran cantidad de información, lo cual puede desincentivar su aplicación durante la fase de diseño.
- Las herramientas citadas se centran, fundamentalmente, en la vertiente medioambiental, habiendo muy pocas referencias a asuntos específicamente sociales.

TEMA DE ESTUDIO TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO. Caso Discreto: conjunto de alternativas pequeño y varios criterios.		
PLANTEAMIENTO	METODOLOGÍAS EN LA TOMA DE DECISIÓN	HERRAMIENTAS EN LA TOMA DE DECISIÓN
Planteamiento existente	<ul style="list-style-type: none"> • No se tiene en cuenta el tiempo • Las preferencias se modelizan a partir de una función de valor aditiva(.cuya construcción se hace difícil a pesar de existir diferentes métodos prácticos para la asignación. • La estimación de pesos se hace en un único nivel, el de los criterios(objetivo de la toma de decisión). • Algunos modelos introducen incertidumbre (método de las loterías) pero su introducción es laboriosa puesto que se necesitan probabilidades que en aplicación al sector de la construcción son de difícil recolección. • Las valoraciones de las alternativas se determinan de acuerdo al grado de satisfacción de cada criterio. • La elección de la mejor alternativa se obtiene en la mayoría de casos de las mayor puntuación obtenida en el proceso de ponderación 	<ul style="list-style-type: none"> • Las herramientas que evalúan la sostenibilidad se enfocan a los edificios residenciales, comerciales, hospitales. • Las herramientas actuales están dirigidas al entorno medioambiental. • No contemplan un sistema integrado. • No tienen en cuenta todo el ciclo de vida. • Plataforma de trabajo poco estructurado. Difícil introducción de datos. Proceso dispendioso. • Algunas herramientas tienen en cuenta la incertidumbre pero la obtención y evaluación de datos es laborioso. • La mayoría de herramientas sostenibles son herramientas que guían la decisión más no la evalúan.
Planteamiento aportación de la tesis.	<ul style="list-style-type: none"> • Se tiene en cuenta el tiempo. • Existencia de una única función matemática (función de valor) que refleja las preferencias del decisor a partir de la modificación de parámetros. Evaluación simple, fácil y rápida. • Uso de un modelo integrador: tiempo, componentes/elementos, requerimientos/funciones. • Se tiene en cuenta un umbral de incertidumbre que se refleja en la respuesta de cada alternativa respecto a un indicador específico. • Facilidad de cálculo en todo el procedimiento. • Uso de una herramienta de toma de decisión (A.H.P.) dentro de la evaluación empleada para la asignación de pesos en todos y cada uno de los niveles de jerarquía (requerimientos, criterio indicadores) • La estimación de pesos se hace en cada nivel de jerarquía de tal manera que no solamente se representa la importancia del nivel final con respecto al que tiene cada nivel en la agregación final. • Las valoraciones de las alternativas se estiman en base no solo a los criterios sino al conjunto de jerarquías. 	<ul style="list-style-type: none"> • Primera herramienta dirigida al estudio de la sostenibilidad en un edificio industrial. • Herramienta dirigida no solamente a vertientes medioambientales sino que contempla una visión más enfocada en el entorno social, económico, institucional. • Contempla la evaluación en cada una de las etapas del ciclo de vida. • Utiliza un entorno interactivo para el usuario de manera que facilita el proceso de decisión. • Es una herramienta con doble objetivo: valorar la edificación en su conjunto(puntuación final) o valorar parcialmente y hacer comparaciones a partir de alternativas propuestas.

Tabla 2.6. Síntesis del estado del conocimiento y aportaciones

CAPÍTULO 3

MARCO CONCEPTUAL. ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO INDUSTRIAL SOSTENIBLE

3.1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, las construcciones se alzaban por prueba y error y en base a la experiencia adquirida a través de los años ya que no se disponía de procedimientos ni de alternativas para llevarlas a cabo. Con el paso del tiempo y a pesar de que se fue dando lugar a construcciones más evolucionadas y con mayores posibilidades, hasta mediados del siglo XX aún era habitual dejar a juicio del diseñador la elección del tipo de solución más adecuada por falta de herramientas que dieran apoyo y soluciones de mejora a dicha decisión (Blanca, 2001).

En contraposición a este planteamiento a principios de los años sesenta surgen algunas propuestas con el fin de sintetizar y objetivizar la toma de decisión (Asimow, 1962; Jones, 1963). Desde entonces ha aparecido diversos métodos y herramientas que abordan el tema de la toma de decisiones desde diferentes perspectivas, tal y como se ha presentado en el estado del conocimiento (Aragonés et al, 1997; Ríos et al 1986; Keeney et al, 1993; Bana e Acosta et al 1992; León ,1993; Ormazabal ,2001).

Algunos de estos métodos se basan en aplicaciones jerárquicas y escalas de puntuaciones o bien en establecer matrices de valoración y ponderación (tal como se explica en el capítulo del estado del conocimiento). Básicamente se fundamentan en estimar y valorar atributos para obtener una puntuación en cada alternativa. Estos métodos se encuentran dotados de un determinado aparato matemático con variedad de planteamientos desde la estadística hasta la matemática difusa pasando por modos de cuantificación simplificada.

La mayoría de ellos se han desarrollado para la fase de diseño y se han orientado hacia las etapas iniciales del proyecto donde las mejoras y ahorros potenciales son mucho mayores. Así a manera de ejemplo en España, las modificaciones en las obras introducidas en etapas posteriores a la fase de diseño representan aproximadamente el 35% del sobrecosto (Merchán, 2000).

Respecto a las herramientas generadas en base a dichos métodos, existen en la literatura técnica una gran variedad entre las que se señalan: Building for Environmental and economic sustainable (BEES), Building Research Establishment Environmental Assessment (BREEAM), Green Building Challenge (GB Tool), LCA in sustainable arquitectura (LISA), Leadership in Energy Environmental Design (LEED), (para mayor detalle ver anexo C) etc. Todas ellas se han desarrollado con la finalidad de actuar como motor en la industria de la construcción y con el fin de crear mecanismos comunes de evaluación para diseñar y evaluar construcciones desde el punto de vista sostenible.

Ahora bien, la gran mayoría de estas herramientas se estudian casi exclusivamente desde el punto de vista ambiental, sin embargo, en algunos casos se incorporan otros puntos de vista tales como económico y social dejando de lado otro tipo de análisis como el estético, funcional, seguridad, etc. Por todo ello se hace necesario rehacer un planteamiento más global y que incorpore la posibilidad de numerosos planos de requerimientos.

En base a los antecedentes expuestos, los *objetivos* de este capítulo son los siguientes:

- Establecer una metodología para evaluar diferentes alternativas de un edificio industrial, a partir de lo que denominaremos *índice de valor*. Esta metodología se hace desde la perspectiva de la sostenibilidad, en el sentido más amplio.
- Explicar las herramientas matemáticas utilizadas que dan soporte riguroso a la metodología establecida y, así mismo, preparan las bases para la implantación de un programa informático fácil y amigable.

Para alcanzar dichos objetivos, se parte del modelo conceptual con los siguientes tres ejes: requerimientos, componentes y ciclo de vida; los cuales enmarcan los límites del sistema que se pretende abordar. A partir de estos se despliegan los criterios e indicadores (tal como se muestra con profundidad en el apartado 3.3.1.1) con los que se realiza el análisis y valoración en busca de la solución constructiva más adecuada con la sostenibilidad.

3.2 DECISIÓN A TOMAR Y ALTERNATIVAS A ESTUDIAR

3.2.1. Decisión a tomar

Tomar una decisión implica elegir entre distintas alternativas, las cuales deben tener correspondencia con los objetivos que se desea alcanzar. Dichas decisiones se toman de acuerdo a las pautas que fija el proyecto, a las preferencias y gustos del decisor, del funcionario, del político, del proyectista según sea el caso.

Cada decisión de un tema suele venir concatenada a otras que conforman una globalidad. Así en el caso del edificio industrial se puede plantear numerosas decisiones tanto previas como posteriores al propio edificio, las cuales puede ser de carácter más general (o estratégico) o de carácter más específico (o técnico). Siguiendo con el edificio industrial y, a manera de ejemplo, se llega a plantear un conjunto de decisiones, partiendo que ya se sabe el tipo de industria a considerar, tal como se muestra en el esquema adjunto:

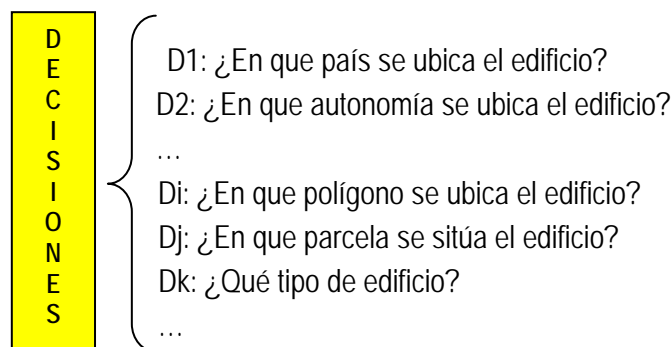


Figura 3.1. Niveles de decisión

En la figura 3.2 se presenta de forma gráfica este esquema. En la misma puede verse que cuanto más al inicio de un proceso se sitúa la decisión, la misma suele tener un mayor componente de carácter estratégico, mientras que cuanto más avanzado están los procesos las decisiones asociadas a los mismos tienen una mayor componente de carácter técnico.

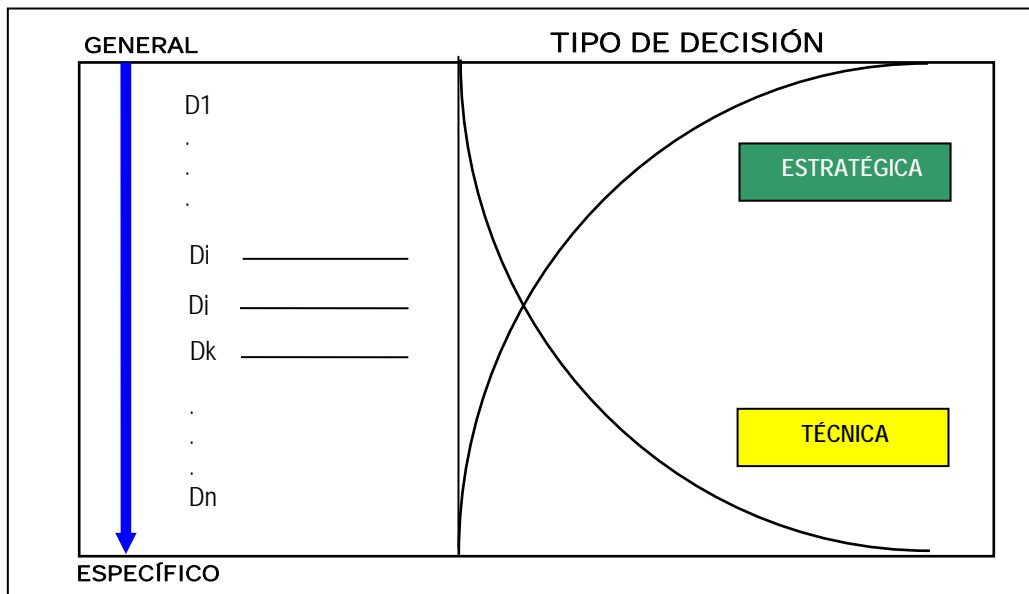


Figura 3.2. Tipo de decisión

Una manera distinta de visualizar esa concatenación de las decisiones se muestra en la figura 3.3 para una etapa específica, en la que puede verse que el resultado de la decisión de una etapa, constituye las condiciones de contorno de la decisión correspondiente a la etapa posterior.

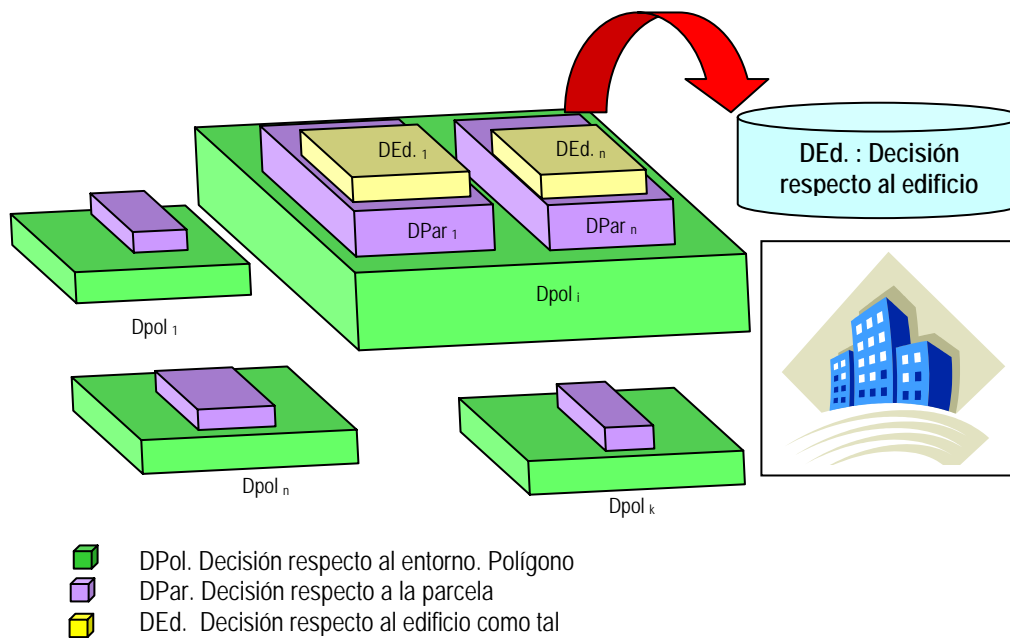


Figura 3.3. Ejemplo de la concatenación de las decisiones

Respecto a los niveles de decisión D_{pol} (decisión polígono) y D_{par} (decisión parcela) en esta tesis serán considerados como una pre-evaluación o decisiones previas puesto que la decisión que se tendrá en cuenta para el desarrollo de la misma corresponde a la **decisión D_{Ed}** , decisión respecto al **edificio como tal**.

El interés de la elección de este tipo de edificación responde a las particularidades que presenta con respecto a otro tipo de edificios como puede ser los residenciales. Las distintas formas y tipologías que se adoptan tanto para la implantación y la distribución de las diferentes actividades hace que pueda desarrollarse una variedad de procesos en su interior.

Adicionalmente, como la industria actual se caracteriza por cambios tecnológicos rápidos, conlleva a que en el edificio industrial se introduzca el criterio de "flexibilidad" para futuras adaptaciones a nuevas distribuciones o necesidades de expansión de la planta industrial.

Para finalizar este apartado cabe señalar la importancia de acotar bien la decisión que se va a tomar, ya que el desarrollo posterior del tema viene condicionado por dicha decisión.

3.2.2. Alternativas a estudiar

Una vez adoptada la decisión a tomar "**Edificio industrial**", el paso siguiente consiste en definir las posibles alternativas que pueden presentarse para su posterior evaluación. Dichas alternativas se generan durante la fase denominada de "creatividad" la cual se enmarca dentro de un proceso de toma de decisión, titulado **ACEC** (Análisis, Creatividad, Evaluación, Control), tal como se muestra en la figura 3.4. Dicho proceso es de uso común en el ámbito de la toma de decisión y en el análisis de valor.

Durante el desarrollo de este apartado se hablará en primer lugar de la fase creatividad, que como se explica en los siguientes párrafos, constituye un dato de entrada, no obstante, el proceso de toma de decisión a lo largo del capítulo se describe con el proceso lógico para su formulación, es decir Análisis, Creatividad, Evaluación y Control.

La creatividad en el ámbito de la producción industrial, tiene una entidad importante ya que de forma interactiva se puede integrar funciones (o planos de requerimiento). Ello implica la modificación de las condiciones de contorno y además, una nueva evaluación.

Esta integración de funciones o planos de requerimiento sólo es viable en el caso de un problema muy acotado, ya que en el caso de hacer un alcance muy extenso, los costes asociados, probablemente, no harían viable este planteamiento. Este es el caso particular del sector de la construcción, ya sea con relación al edificio industrial o a otro tipo de estructuras. Es por ello que en este caso, el número de alternativas posibles ya se ha acotado de entrada y hay pocas opciones de variación posterior, sin embargo, conceptualmente es posible.

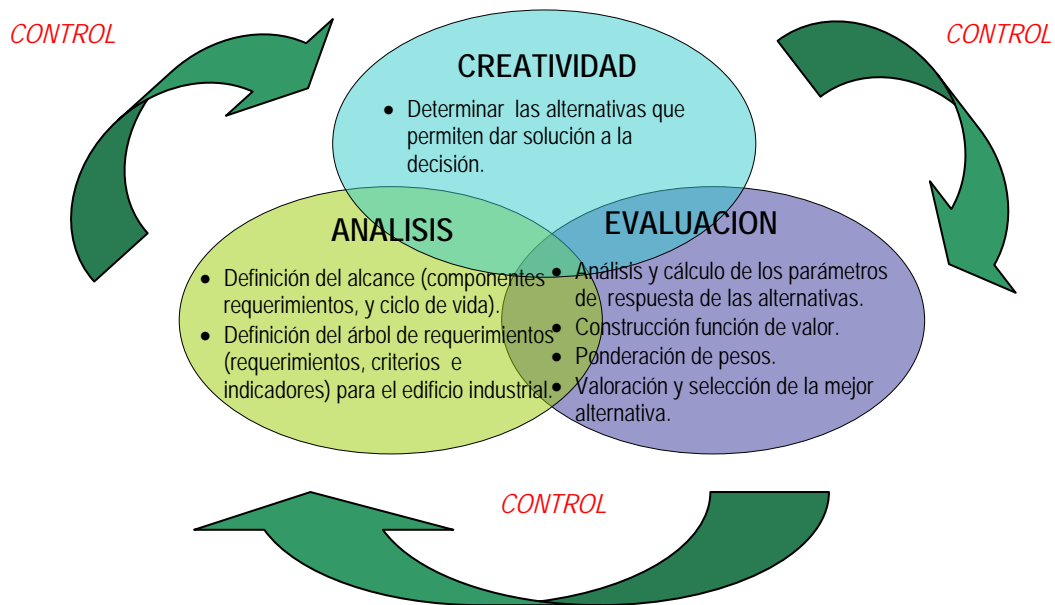


Figura 3.4. Proceso de toma de decisión para el edificio industrial

Respecto a las otras fases del proceso de toma de decisión que se muestran en la figura 3.4, en la **fase de análisis** se define el alcance u objetivos de la decisión, en la **fase de evaluación** se juzgan cuantitativamente las alternativas elegidas durante la creatividad y en la **fase de control**, se verifica el grado de cumplimiento de todos los aspectos concernientes a las fases que se han ido realizando.

En lo que concierne a la presente tesis doctoral, las alternativas que se consideran en el edificio industrial se basan en la variedad de los sistemas constructivos y en los elementos que la constituyen. Dichos elementos se determinan de acuerdo a la arquitectura del edificio ya que esta conlleva a la organización espacial relacionando la organización externa del área industrial (urbanismo) y la organización interna. En el apartado 3.3.2. se explican con detalle los elementos que conforman el eje de los componentes.

Hay que señalar que una elección inadecuada de las alternativas puede distorsionar por completo el proceso de decisión por lo que estas tienen que tener una correspondencia directa con los objetivos que se desean alcanzar.

Para finalizar este apartado cabe recordar que, la fase de creatividad, correspondiente a la generación de alternativas de un edificio industrial, se debe llevar a cabo inicialmente pues constituye un dato de entrada.

3.3. ANÁLISIS (Modelo)

El objetivo del análisis es definir las condiciones de contorno y las circunstancias que inciden en la decisión a tomar, entre las que se incluye el alcance del proyecto. En el análisis se organiza todo tipo de aspectos sin entrar a cuantificar ni a evaluar.

Para la presente tesis, esta fase de análisis se estructura en un modelo que engloba tres ejes lo cual responde a que es una fácil y práctica modelización mental de la realidad. Se visualiza esta idea porque es necesario definir un marco de referencia que permita estructurar la decisión y el conjunto del proyecto.

Los ejes que se incluyen como se representa en la figura 3.5 son: **requerimientos, componentes y ciclo de vida**. Estos ejes son independientes y tienen un paralelismo con el planteamiento de análisis de valor en el mundo de la producción industrial en los que se usan respectivamente, funciones, elementos y tiempo. Con esto no se quiere decir que un modelo sea más o menos completo, sino que para desarrollar la metodología se usó como base dicha propuesta.

La ventaja de esta concepción es que permite, por un lado, tener un enfoque general del problema a partir del planteamiento de los tres ejes y por otro lado, una perspectiva detallada en cada uno de los ejes lo que supone distintos puntos de vista del que toma la decisión.

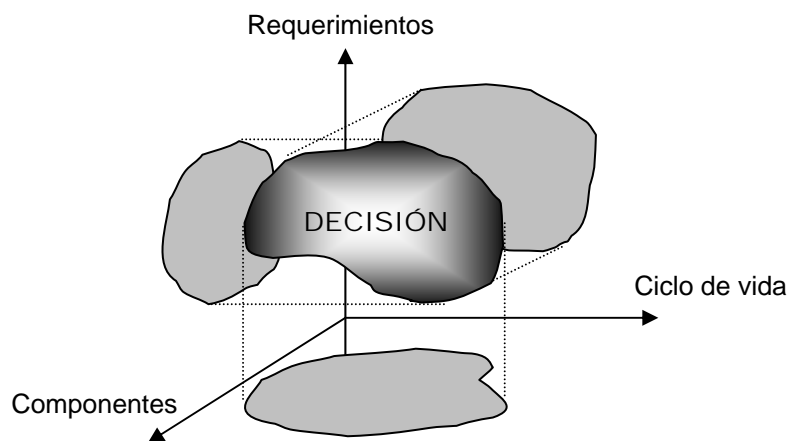


Figura 3.5. Visualización del alcance del proyecto

3.3.1. Eje de Requerimientos

El eje de requerimientos representa las características a considerar en la toma de decisión. Estas se expresan en planos entre los que se encuentran: Económico, Funcional, Medioambiental, Social, etc.

Dada su naturaleza, los requerimientos son de carácter general por lo que permite asignar a cada proyecto planos específicos de acuerdo a sus características y necesidades. Esto es, un proyecto de viviendas difiere en los objetivos que se pretenden respecto a un proyecto de obra civil por tanto, los requerimientos han de satisfacer claramente las condiciones o los niveles de prestación que requiera cada uno de ellos.

Es conveniente para su posterior evaluación, no introducir una cantidad elevada de planos puesto que se puede diluir el resultado de los más importantes. Esta explicación se desarrolla con detalle en el apartado 3.4.6.

Cada plano se estructura a su vez en niveles más específicos: criterios e indicadores. Los criterios son de carácter cualitativo y expresan una forma de agrupación. Los indicadores son elementos cuantitativos y medibles. La razón de ser de esta estructura es por un lado proporcionar organización de la información y por otro, facilitar la evaluación de la decisión.

En la figura 3.6 se observa que a cada requerimiento i se le puede asignar n criterios y a su vez a cada criterio se le puede asignar k indicadores. El número de criterios e indicadores que se conceda puede ser variable por cada requerimiento o criterio según sea el caso. Tanto los requerimientos como los criterios no son medibles directamente, sino indirectamente a través de los indicadores.

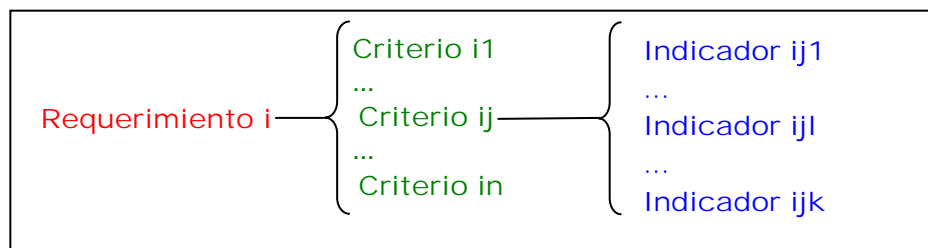


Figura 3.6. Esquema del árbol de requerimientos

Para cada decisión, la selección de requerimientos, criterios e indicadores debe ser cuidadosa y debe incluir parámetros principales que caractericen y describan perfectamente lo que se desea evaluar. De esta elección dependen unos certeros y buenos resultados. Algunos criterios de selección que corresponde mencionar son: pertinentes a la decisión, discriminantes entre alternativas, cuantificables, independientes, vigente en el ciclo de vida, precisos, claros, etc. Para mayor detalle ver el anexo D

Los requerimientos que comúnmente se incluyen desde la perspectiva sostenible y que fueron aprobados en la agenda 21 (Río de Janeiro, 1982) son el pilar medioambiental, el pilar económico y el pilar social. Para el caso de la edificación industrial se va a adoptar cinco planos que se muestran en la figura 3.7. estos son: ambiental, económico, social, estético y funcional.

La elección de estos planos responde a que se pretende darle al modelo un carácter integrado y global desde el punto de vista sostenible.

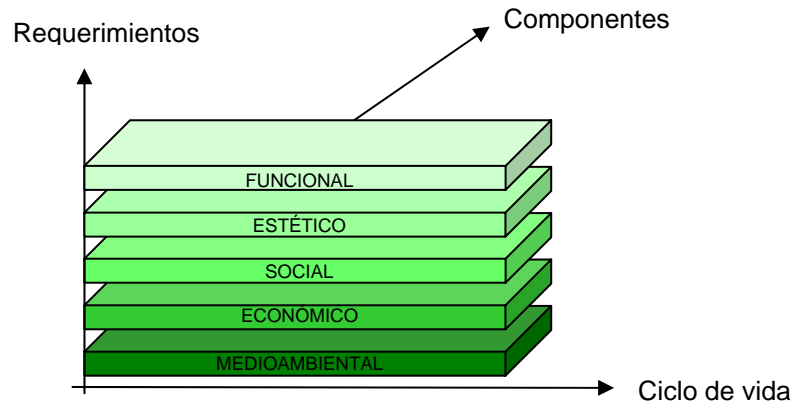


Figura 3.7. Eje de requerimientos para el edificio industrial

Cada plano se evalúa en las correspondientes etapas en las que afecte el ciclo de vida y en sus debidos componentes. A continuación se hace una breve descripción de dichos planos:

- Plano ambiental: Se evalúan posibles efectos negativos generados sobre el medio ambiente como consecuencia de una modificación en el entorno natural. Se estudian procesos como son el consumo de materias primas, el consumo de energía en fabricación, transporte y colocación, las emisiones al aire, agua o residuos sólidos generados, el reciclaje de materiales entre otras características.
- Plano económico: Describe los costes relativos generados por cada uno de los componentes en sus diferentes fases. Los costes generados en la fase de mantenimiento, en la fase de ejecución, etc.
- Plano social: Se evalúan aspectos como la aceptación social de la decisión a tomar. Se estudia aspectos concernientes a la creación de empleo, la promoción de la actividad comercial y el desarrollo de los alrededores. Adicionalmente se incluyen aspectos de seguridad y salud laboral.
- Plano estético. Evalúa la percepción de los usuarios directos (propietarios, proyectistas, trabajadores) así como de los usuarios indirectos (ciudadanos) respecto a la decisión evaluada. Los aspectos a evaluar incluyen la adaptabilidad de la edificación con el entorno, la calidad de la edificación, etc.
- Plano funcional: Describe la función que cumple el edificio en estudio y su adaptabilidad respecto a los cambios. En este plano se tiene en cuenta todo lo concerniente al diseño y a la organización para facilidad, utilidad y comodidad del posterior empleo.

Por ejemplo se incluyen aspectos como la durabilidad, la facilidad del proceso constructivo, la facilidad de los componentes frente a cambios, etc.

3.3.1.1. Descripción del despliegue del árbol de requerimientos

El objetivo del árbol de requerimientos es dar una visión global y general del problema a partir de la jerarquización y despliegue del mismo en diferentes niveles.

El árbol se puede desplegar en n niveles, de acuerdo a las preferencias del decisor, no obstante, para el desarrollo de esta tesis se van a considerar tres niveles, que son: *requerimientos, criterios e indicadores*.

En la figura 3.8 se pueden observar los tres niveles que se adoptan. En primer lugar se sitúan los requerimientos (R_i) que constituyen el nivel más general y se ubica en la parte izquierda del árbol. En segundo lugar se incluyen los criterios (C_{in}) que si bien no son medibles, representan una forma de agrupar aspectos medibles. Los criterios se asocian de acuerdo a las características del requerimiento al cual pertenece. En tercer lugar se ubican los indicadores en la parte derecha del árbol junto con su parámetro de respuesta. Los indicadores constituyen la base de medición. En el apartado 3.3.1.2. se especifican detalladamente sus características.

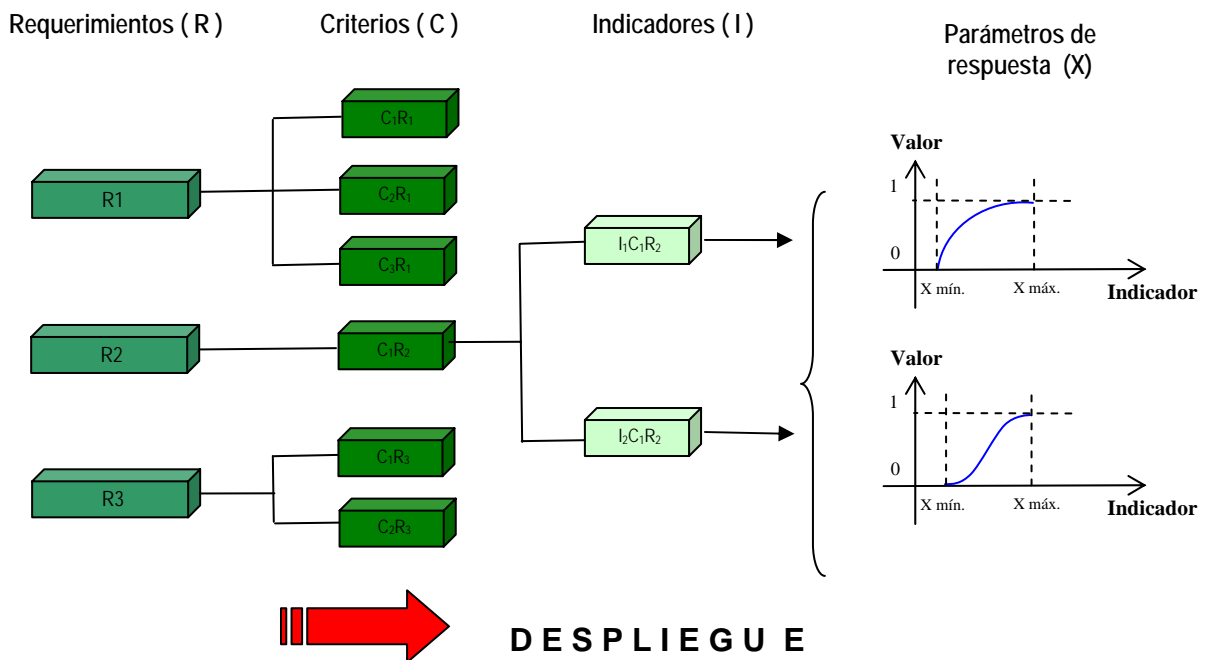


Figura 3.8. Despliegue del árbol de requerimientos

Si bien no existe un número óptimo de niveles para desplegar el árbol, se aconseja desarrollar pocos (tres ó cuatro); en primer lugar, porque cada despliegue supone un análisis matemático lo que puede dar lugar a mayor confusión y menos claridad y en segundo lugar, por que se genera un mayor esfuerzo y trabajo para la fase de evaluación sin que ello represente una mayor precisión.

En cualquier caso y de acuerdo a la modelización del problema, es posible agregar otro nivel de jerarquía. Por ejemplo, requerimientos, criterios, subcriterios e indicadores. El nuevo nivel de jerarquía corresponde a los subcriterios que define un nivel intermedio entre el nivel cuantificable como es el de los indicadores y un nivel constituido por los criterios.

3.3.1.2. Indicadores (I). Base de la medición.

El indicador es una variable (cuantitativa o cualitativa) a partir de la cual se cuantifica el valor de la alternativa. Las variables cualitativas se procesan para ser convertidas en variables cuantitativas y posteriormente ser evaluadas. Los indicadores se evalúan mediante funciones de valor que representan la transformación de las diferentes unidades de los indicadores a una misma escala. Esta función representa en el eje de las abscisas, el parámetro de respuesta del indicador (ver apartado 3.4.2) y en el eje de las ordenadas, la satisfacción por parte del decisor en una misma escala (ver apartado 3.4.3).

La definición de los indicadores al igual que los criterios es independiente de cada una de las etapas del ciclo de vida y de los componentes. Es fundamental que queden bien definidos ya que a partir de ellos se inicia la cuantificación. Se aconseja para su definición utilizar técnicas de trabajo en equipo dentro de las cuales se destacan la "técnica delphi,", "decisión conferencing", "brain storming" etc. Estas técnicas se basan en promover la creatividad a partir de un intercambio de ideas entre varios participantes con el fin de dar solución a un problema. Cada técnica utiliza un mecanismo diferente de elaboración pero el resultado final siempre es la mejora de un producto, nuevos conceptos, solución de problemas, mejora de la planificación entre otros aspectos. Para mayor detalle ver el anexo E.

Como son numerosos los indicadores que se pueden plantear, es necesario hacer un filtro pues no todos son importantes y oportunos. Para seleccionarlos principalmente se deben atender a dos criterios: que sean **pertinentes** y que sean **discriminantes**. Pertinentes para el tipo de decisión y discriminantes respecto a las alternativas. En el anexo D se exponen algunos criterios adicionales de validez para la selección de los requerimientos, criterios e indicadores.

Adicional a este filtro de indicadores, existen los **indicadores de obligado cumplimiento**. Estos son indicadores que deben responder a valores mínimos o máximos que dicta la norma los cuales no entran en evaluación una vez no hayan pasado una "lista de

chequeo” definida previamente. En el apartado 3.4.3.2 se explica la manera de evaluación y cuantificación de dichos indicadores.

Por otra parte, a cada indicador se asocian una serie de particularidades:

- Dependencia con el tipo de decisión: Si se trata de una decisión general, la clase de indicador a considerar es de tipo global o general. Si por el contrario se trata de una decisión específica, los indicadores que se consideran son indicadores concretos.
- Introducción en valores unitarios: Los indicadores deberían ser introducidos en valores unitarios (por ejemplo €/m²) para posteriormente con las cantidades propias de cada alternativa, traducirlos a valores absolutos (€). No obstante, en algunas ocasiones puede darse el caso de que no sea posible introducir el indicador en valores relativos por lo que debe tenerse presente la valoración de las cantidades de cada alternativa.
- Uso de bibliotecas: El indicador debe estar respaldado mediante el uso de unas bibliotecas o base de datos para de esta forma iniciar su cuantificación.
- Esquema de implementación: Cada indicador contempla un esquema de implementación que incluye título, descripción, modo de evaluación, notas u observaciones, bibliotecas adjuntas y cuestionarios (datos de entrada).

Aparte de las características definidas previamente, los indicadores que se evalúan se clasifican en base a dos grupos: los **indicadores cualitativos** que son aquellos que describen las características del indicador a partir de atributos. Describen opiniones, percepciones o juicios sobre algo. Este es el caso por ejemplo de un indicador estético “adaptabilidad de la edificación respecto al entorno”. Se puede calificar de buena, regular o mala. Posteriormente estos indicadores cualitativos se transforman mediante tablas descriptoras o categorías a una variable numérica.

Por otro lado los **indicadores cuantitativos** son aquellos que describen las características del indicador a partir de variables medibles. Este es el caso de un indicador económico “coste de ejecución de la obra” que viene dado por €/m² ó €.

Descrito el despliegue del árbol de requerimientos y por consiguiente sus elementos, se pasa a explicar el segundo de los ejes que define el modelo.

3.3.2. Eje de Componentes

El eje de componentes representa la forma de dividir la unidad. Por ejemplo para el caso de un edificio los componentes pueden ser la estructura, la fachada, la cubierta, etc.

Dada la complejidad que representa el edificio industrial, los componentes se clasifican en tres grandes grupos de tal manera que se conlleva a la organización espacial. Según se visualiza en la figura 3.9, estos son:

- Interfase externa: hace referencia a la interfase del edificio con el entorno. Dentro de esta interfase se ubican la distribución en planta, la explanación y los pavimentos exteriores.
- Interfase propia del edificio: Lo constituye el marco estructural y la envolvente. Dentro de esta interfase se ubica la cimentación, la estructura y forjados, los cerramientos y la cubierta.
- Interfase interna: Hace referencia a las divisiones horizontales. Se incluyen particiones e instalaciones. Esta interfase no se tendrá en cuenta dentro del alcance de esta tesis por el nivel de complejidad que representa.

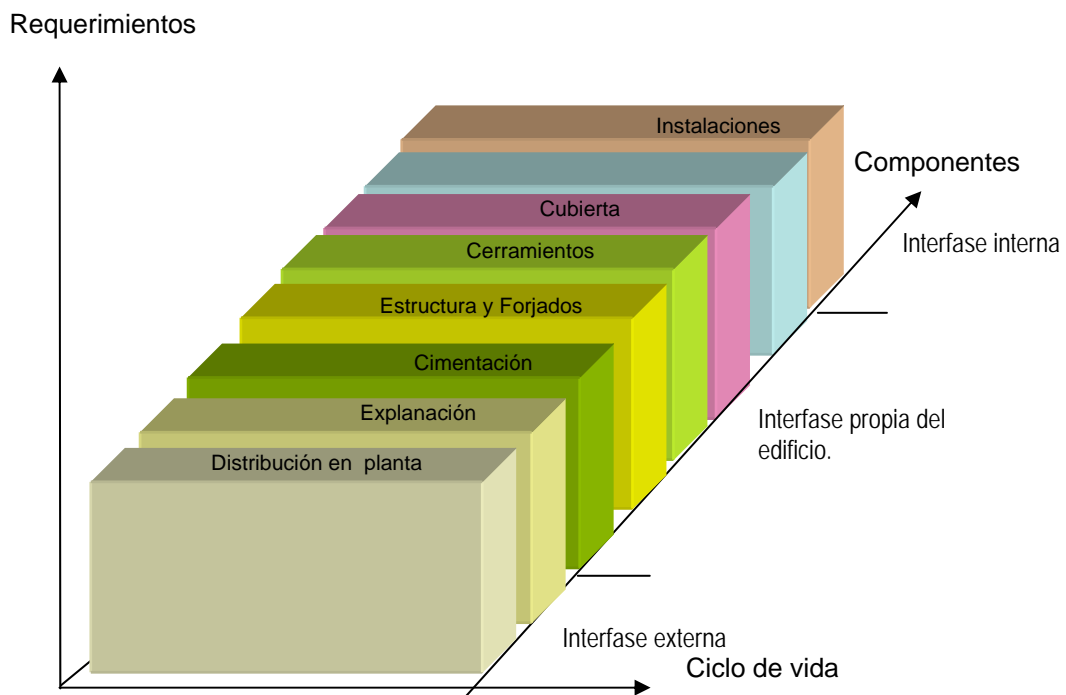


Figura 3.9. Los componentes del edificio industrial

3.3.3. Eje del ciclo de vida o del horizonte temporal (tiempo)

Este eje corresponde a la vertiente temporal del proyecto. Aquí, se concibe el ciclo de vida como un conjunto de procesos o actividades enlazados en el tiempo. En el ciclo de vida puede distinguirse un conjunto de fases de cara a modelizarlo y racionalizarlo de algún modo.

Estas fases según se aprecia en la figura 3.10 son concepción, materialización, utilización y reintegración. La concepción incorpora aspectos relacionados con la viabilidad y planificación del proyecto. La materialización se asocia a la ejecución la cual da una visión de empleo de materiales, suministros, etc. La utilización hace referencia al uso y mantenimiento durante su vida útil y la reintegración asocia aspectos como la demolición, gestión de residuos, reciclaje, etc.

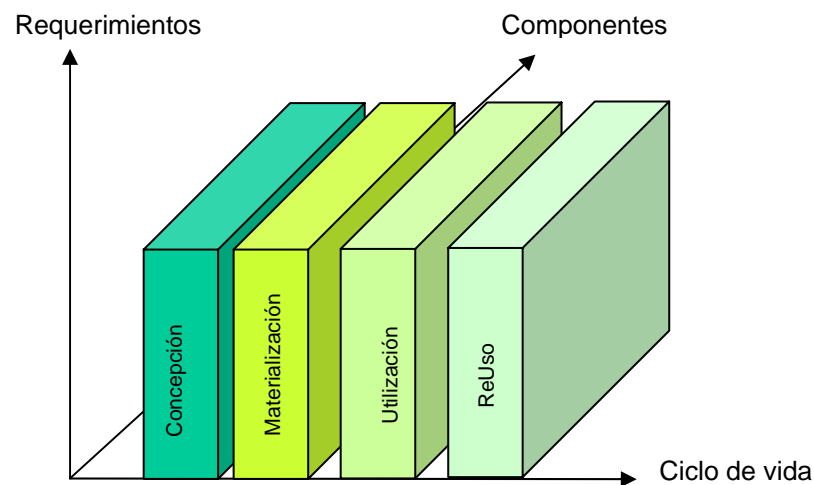


Figura 3.10. Las fases y procesos del ciclo de vida

Para terminar este apartado, los ejes antes descritos (requerimientos, componentes y ciclo de vida), pueden ser divisibles en subunidades y desplegarse de forma considerable, dependiendo del grado de concreción del análisis. No obstante, el modelo planteado para nuestro análisis, tan sólo examinará los primeros niveles de división, ya que tiene que ser una dimensión abarcable y con suficiente percepción.

3.4. EVALUACIÓN (Metodología)

El objetivo de la evaluación es obtener la cuantificación de las alternativas y en base a dichos resultados, seleccionar la mejor de ellas.

Para alcanzar dicha cuantificación, se requiere “plegar” el árbol de requerimientos definido previamente. El pliegue se inicia desde el nivel de indicadores hasta llegar a valorar el objetivo que se ha especificado en los requerimientos.

La evaluación se realiza a partir de seis etapas según el diagrama 3.11 y se explica posteriormente:

- Ponderación de indicadores, criterios, requerimientos: Etapa en que se define la importancia de cada elemento del nivel del árbol de requerimientos respecto del conjunto.

- **Parámetro de respuesta de las alternativas:** Fase que mide el funcionamiento de las alternativas respecto a un indicador de la realidad analizada en un cierto marco de referencia
- **Construcción de la función de valor:** Etapa que se encarga de unificar las distintas escalas dadas en los indicadores. Normaliza entre una escala comprendida entre 0 y 1.
- **Cálculo del valor de las alternativas:** Se cuantifica cada alternativa en base a las tres etapas expuestas: cálculo de valor a nivel de indicadores, cálculo del valor para criterios y cálculo de valor a nivel de requerimientos.
- **Cálculo de la alternativa óptima:** Etapa que selecciona la mejor alternativa.
- **Análisis de sensibilidad y recomendación de la toma de decisión:** Es aconsejable realizar un análisis de sensibilidad para extraer conclusiones respecto al comportamiento de las variables y de la confiabilidad del método.

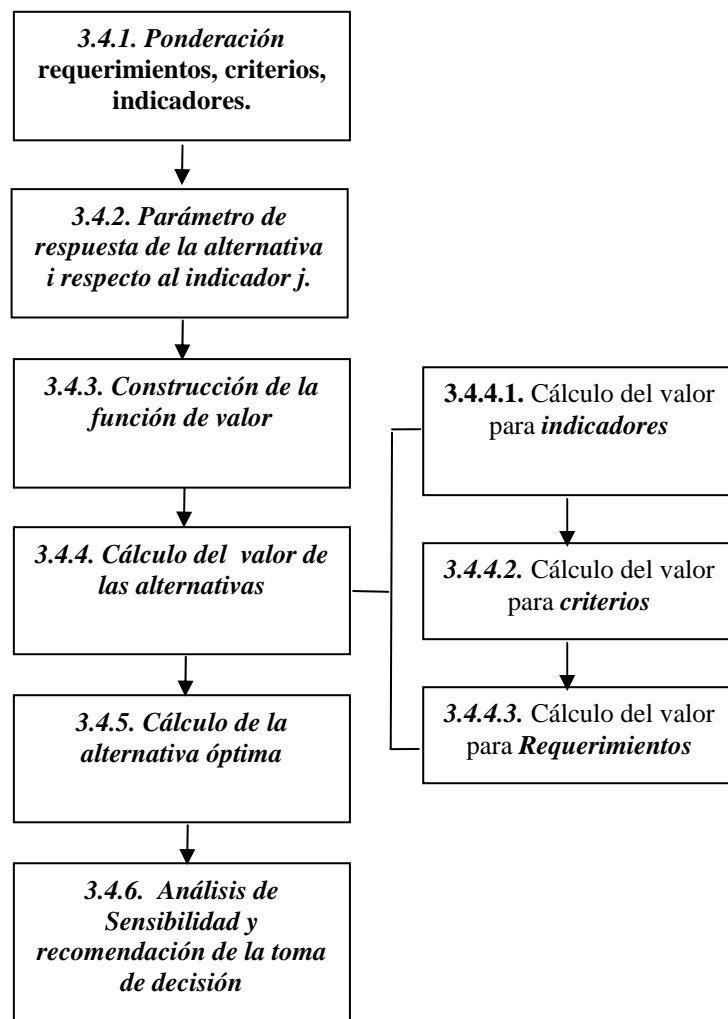


Figura 3.11. Diagrama de evaluación

3.4.1. Ponderación para requerimientos, criterios e indicadores

Como se explicó en el capítulo 2, el proceso de toma de decisión implica comparar elementos. Esto se traduce en la necesidad de realizar mediciones de tal manera que permitan establecer las preferencias entre ellos. Para determinar estas preferencias se hace uso de la asignación de pesos en cada nivel de jerarquía.

La asignación de pesos puede hacerse de manera directa o bien a través de algunos métodos existentes. Dentro de estos caben destacar: el método por matriz de dominación, el método en una jerarquía de objetivos, Minimal Pairwise Comparison (MIPAC), Matrices de escala ratio, etc. que se han explicado con detalle en el capítulo 2.

Dadas las características de nuestro planteamiento de toma de decisión: conjunto finito de alternativas, decisión basada en las diversas características o atributos de las alternativas respecto de los criterios de decisión relevantes, le son aplicables algunos de los métodos de decisión multiobjetivo. Entre estos métodos se encuentra el **método A.H.P. (Analytical Hierarchy Process, Saaty 1980)** que por sus particularidades se ajusta al modelo en desarrollo. (Para mayor detalle ver anexo A).

Las particularidades a las cuales se hace referencia son: problema configurado a través de una estructura jerárquica, utilización de una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, síntesis de juicios y orden de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos.

Partiendo de las bases establecidas por el A.H.P. se propone asignar pesos en todas y cada una de las ramas del árbol de requerimientos. Como se muestra en la figura 3.12 si se tienen n requerimientos y a su vez, a cada requerimiento se le asignan determinados criterios, la suma de los criterios de cada requerimiento es igual a la unidad y la suma en los criterios es igual al número total de requerimientos. De igual manera ocurre con los indicadores, la suma de los indicadores de cada criterio es igual a la unidad y la suma total en los indicadores es igual al número de criterios.

Esta sumatoria se entiende que se hace en el sentido vertical para, el sentido horizontal la sumatoria es distinta a este valor.

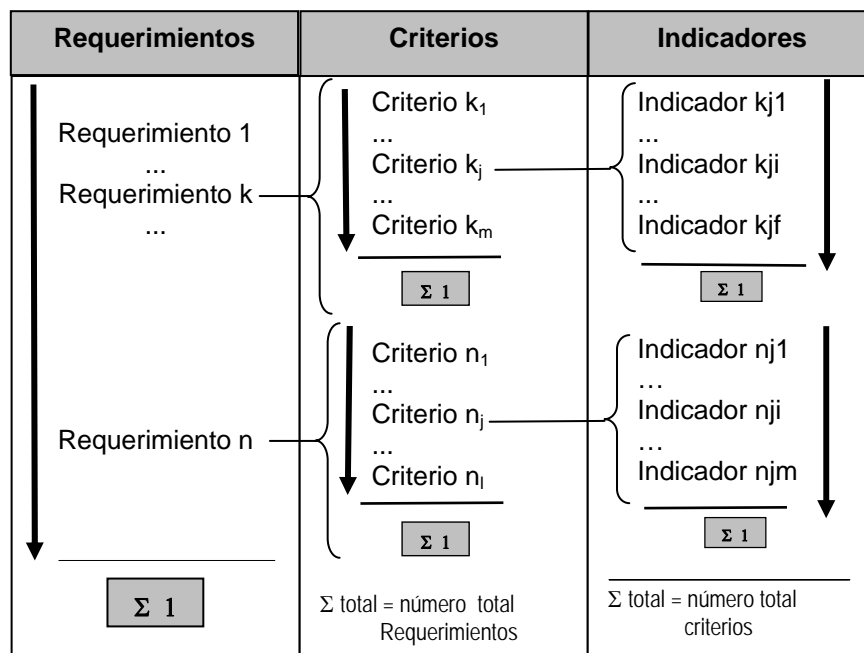


Figura 3.12. Asignación de pesos en cada nivel de jerarquía

Para asignar pesos mediante el A.H.P. se desarrollan dos etapas: La definición y construcción de la matriz de decisión y el cálculo del vector y el valor propio.

- Definición y construcción de la matriz de decisión: La matriz de decisión define las preferencias entre los distintos elementos que estemos comparando. Este proceso se hace tanto a nivel de requerimientos como de criterios o indicadores. Las preferencias se realizan a través de una comparación numérica por pares con el fin de establecer la importancia relativa de un elemento respecto a otro. La asignación numérica propuesta por (Saaty,1980) puntúa en un rango entre 1 y 9 y se muestra en la tabla 3.1 donde el vector columna i representa la preferencia con respecto al vector fila j .

Este rango se deriva del hecho que la capacidad humana esta limitada alrededor de siete unidades de información independientes más o menos 2 . De ahí que la máxima puntuación que tome la escala sea de 9. Este hecho fue primero supuesto por el psicólogo George Miller en 1950 y explicado en el A.H.P. en 1970 (Saaty et al 2003). La escala a que se hace referencia existe en el inconsciente, no está explícita y sus valores no son números exactos, lo que existe en el cerebro es un ordenamiento jerárquico para los elementos. Respecto a este ordenamiento jerárquico existe una ley logarítmica de respuesta al estímulo dada por Weber y Fechner cuya explicación puede verse en el anexo A.

ESCALA DE SAATY			
Hipótesis: i más importante que j		Hipótesis : i menos importante que j	
Escala General	Escala Verbal	Escala General	Escala Verbal
1	Igual importancia	1	Igual importancia
2	Preferencia intermedia entre 1-3	½	Preferencia intermedia entre 1 -1/1.3
3	Moderadamente más importante	1/3	Moderadamente mas importante
4	Preferencia Intermedia entre 1.3-1.5	¼	Preferencia intermedia entre 1/1.3-1/1.5
5	Más importante	1/5	Mas importante
6	Preferencia intermedia entre1. 5-1.7	1/6	Preferencia intermedia entre 1/1.5-1/1.7
7	Mucho más importante	1/7	Mucho mas importante
8	Preferencia intermedia entre 1.7-1.9	1/8	Preferencia intermedia entre 1/1.7- 1/1.9
9	Extremadamente más importante	1/9	Extremadamente mas importante

Tabla 3.1. Escala de Saaty (1980)

Es importante aclarar que las valoraciones que se asignen están ligadas a las condiciones existentes durante el momento de la evaluación. Las valoraciones propuestas por el modelo son válidas en realidad para el instante de tiempo de dichas circunstancias. Con estas valoraciones todas las comparaciones y mediciones se hacen en la misma escala y se homogenizan todas las variables que se estudian.

Las matrices de decisión obtenidas son cuadradas $n \times n$, siendo n el número de requerimientos, criterios o indicadores que se estén evaluando como se puede observar en la tabla 3.2. Por ejemplo, el elemento de comparación a_{12} representa la preferencia del elemento uno sobre el elemento dos. Adicionalmente se cumple que es una matriz reciproca porque $a_{jn}=1/a_{nj}$

Criterio i	C1	C2	.....	Ci	.....	Cn
C1	1	a_{12}	.....	a_{1i}	.....	a_{1n}
C2	$1/a_{21}$	1	.....	a_{2i}	.....	a_{2n}
.....	.....	.....	1	.....	.....	.....
Ci	$1/a_{i1}$	$1/a_{i2}$	.....	1	.....	a_{in}
.....	.....	.....	.....	.....	1	.....
Cn	$1/a_{n1}$	$1/a_{n2}$	.....	$1/a_{ni}$	.....	1

Tabla 3.2. Matriz de decisión [A]

De acuerdo con el procedimiento matemático propuesto por el A.H.P, la siguiente fase se enmarca en la obtención de prioridades y valores propios. A continuación se explican estos conceptos.

- Cálculo del vector y el valor propio. El vector propio se asocia al mayor valor propio de cada matriz de decisión y representa el ranking u orden de prioridades. Por otra parte, el valor propio es una medida de la consistencia del juicio, esto es, comprueba la correcta asignación de las preferencias. Esta consistencia implica dos características: transitividad y proporcionalidad. La primera característica indica que deben respetarse las relaciones de orden entre los elementos si $A > C$ y $C > B$ por lógica $A > B$. La segunda característica representa las proporciones entre órdenes de magnitud de estas preferencias. Por ejemplo si A es 3 veces mayor que C y C es 2 veces mayor que B, entonces A debe ser mayor que B 6 veces y este sería un juicio 100% consistente.

Debido a que nuestras estimaciones de las proporciones no son 100% consistentes (capacidad limitada de información), se admite un pequeño margen de violación o inconsistencia. Este pequeño margen se traduce a un 10% de error.

Ahora bien, para calcular el vector y el valor propio de la matriz de decisión A , es necesario recurrir a nociones básicas de matemáticas y de álgebra lineal y solucionar:

$$A * w = \lambda * w \quad (3.1)$$

donde

A = Matriz recíproca de comparación a pares, también denominada matriz de decisión.

w = Vector propio de A

λ = Máximo valor propio

El valor propio o autovalor puede ser resuelto

$$\begin{aligned} A * w - \lambda * w &= 0 \\ (A - \lambda) * w &= 0 \\ \det(A - \lambda I) &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Por otra parte para calcular el vector propio ó autovector, para cada valor propio λ_i , resolvemos la ecuación matricial

$$(A - \lambda_i I) * w = 0$$

donde w y 0 son vectores columna.

Para aplicar estos conceptos (autovalor y autovector) a una matriz de tres por tres tenemos:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & a & b \\ 1/a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{vmatrix}$$

$$\det \begin{vmatrix} 1-\lambda & a & b \\ 1/a & 1-\lambda & c \\ 1/b & 1/c & 1-\lambda \end{vmatrix} = 0$$

Al resolver para λ :

$$-\lambda^3 + 3\lambda^2 + \left(\frac{d}{1} + \frac{1}{d} - 2\lambda \right) = 0$$

donde $d = ac/b$

y el máximo valor propio viene dado por la expresión:

$$\lambda_{\max} = 1 + d + d^{-1} \quad (3.3.)$$

Ahora para calcular el vector propio se resuelve $(A - \lambda_i I) * w = 0$ obteniéndose :

$$w_1 = bd / (1 + bd + \frac{c}{d}) \quad (3.4.)$$

$$w_2 = c/d * (1 + bd + \frac{c}{d}) \quad (3.5.)$$

$$w_3 = 1 / (1 + bd + \frac{c}{d}) \quad (3.6.)$$

De esta manera quedan calculados los vectores y valores propios de la matriz de decisión. Por otra parte, si se cumple la consistencia perfecta para esta matriz de tres por tres $c = b/a$, $d=1$ y $\lambda_{\max} = 3$.

Esta consistencia por su parte, se comprueba a partir de un relación de consistencia el cual es básicamente la relación entre el índice de consistencia y el índice de aleatoriedad como se muestra en la ecuación 3.7.

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \leq 0.1 \quad (3.7.)$$

donde,

C.R.= Relación de consistencia (Consistency Ratio)

C.I. = Índice de consistencia (Consistency Index)

R.I. = Índice de aleatoriedad (Random Index)

Se recomienda que esta relación de consistencia no exceda el 10% o el valor de 0.1 para poder calificar de buena una ponderación. En caso contrario, la valoración de la matriz es inconsistente y por tanto será necesario revalorar las preferencias que se asignaron a la matriz de decisión.

Para calcular la relación de consistencia, se plantea como se dijo previamente, un índice de consistencia que se define según la ecuación 3.8 como:

$$C.I. = \frac{\lambda_{m\acute{a}x.} - n}{n - 1} \quad (3.8.)$$

Si el índice de consistencia se aproxima a cero, más conveniente es la comparación. Por otra parte se valora el índice de aleatoriedad que se describe como el máximo índice de consistencia de una matriz de decisión generada de forma aleatoria. Sólo depende del tamaño de la matriz de la manera que se muestra en la tabla 3.3.

Tamaño Matriz n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Índice aleatoriedad	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Tabla 3.3. Índice de aleatoriedad (Saaty, 1980)

Con las definiciones previamente establecidas, se obtiene el índice de consistencia y por tanto se corrobora la correcta asignación de las preferencias otorgadas por el decisor.

Una vez obtenidos los pesos mediante el método del A.H.P. se continúa con el proceso de evaluación correspondiente al parámetro de respuesta de la alternativa *i* respecto a un indicador *j*.

3.4.2. Parámetro de respuesta de la alternativa i respecto a un indicador j

Se define como la medida de funcionamiento de una alternativa en relación a los indicadores de la realidad analizada en un cierto marco de referencia. Esta medida de funcionamiento viene afectada por la variabilidad de respuestas que admite.

Su estimación se hace a partir de una medida probabilística y de una medición de riesgo según se muestra en la ecuación 3.9. El planteamiento inicial de esta ecuación parte de la propuesta por (Paez et al 1952) en la cual determina el coste generalizado mínimo para introducir seguridad en el método de los estados límite.

$$P.R.A_{i,j} = M.P.A_{i,j} + R.A_{i,j} \quad (3.9.)$$

donde,

$P.R.A_{i,j}$ = Parámetro de respuesta de la alternativa i respecto al indicador j.

$M.P.A_{i,j}$ = Medida probabilística de la alternativa i respecto al indicador j.

$R.A_{i,j}$ = Riesgo total que puede presentar la alternativa i respecto al indicador j.

3.4.2.1. Medida probabilística de la alternativa i respecto al indicador j ($M.P.A_{i,j}$)

Este término representa directamente los valores de funcionamiento de la alternativa. Generalmente son valores estadísticos que se obtienen a partir de encuestas, datos históricos, literatura, campañas de campo, etc. Por ejemplo el coste de ejecución en €/m² para una estructura metálica difiere del coste de una estructura de hormigón. Es el caso también de las emisiones de CO₂ que produce la una con respecto a la otra.

La ecuación para calcular dicho término (3.10) es función de μ que es la media de dichos resultados y σ la desviación. También es posible calcular este término sólo con valores medios.

$$M.P.A_{i,j} = \mu \pm \sigma \quad (3.10.)$$

Cuando sean pocas las estimaciones y existan valores extremos muy amplios, se recomienda suprimir los valores extremos. Se debe aclarar que esta ecuación no incluye el riesgo.

3.4.2.2. Riesgo total de la alternativa i respecto al indicador j

Este término representa la probabilidad de existencia de un riesgo inherente a la alternativa y la repercusión que tienen éstos sobre los indicadores evaluados. Este término agrupa dos expresiones como se muestra en la ecuación 3.11. La primera que representa la probabilidad de fallo u ocurrencia del riesgo y la segunda que tiene asociado las consecuencias de dicho fallo. Estas consecuencias pueden ser a nivel económico, social, etc.

$$R.A_{i,j} = \sum_{l=1}^m f_{i,j} * C_{i,j} \quad (3.11.)$$

donde,

$R.A_{i,j}$ = Riesgo total de la alternativa i respecto al indicador j

$f_{i,j}$ = Frecuencia de fallo

$C_{i,j}$ = Consecuencia o repercusión de fallo.

No obstante, el cálculo de dichos valores no resulta posible en la mayoría de casos a causa de la falta de información, por lo tanto, se hace necesario establecer un método alternativo que evalúe el riesgo cuando hay poca información.

Este método alternativo se fundamenta en la aplicación del planteamiento BETA II que consiste en basarse en tres valores estimados para cada respuesta de la alternativa. Estimar el valor de mayor éxito o más optimista (b), el de menor o pesimista (a) y el más probable (m) (Herrerías et al 1991). Con estos tres datos es posible considerar un valor medio μ (ecuación 3.12) y una desviación estándar σ (ecuación 3.13).

$$\text{Valor medio} = \mu = \left(\frac{a + 4m + b}{6} \right) \quad (3.12)$$

$$\text{Desviación Estándar} = \sigma = \left(\frac{b - a}{6} \right) \quad (3.13)$$

La ventaja de este método es que se evalúa el riesgo de la alternativa sin necesidad de conocer la distribución de frecuencias del indicador ni toda la información de la alternativa en estudio. Por consiguiente, para el desarrollo de la tesis se hace uso de este método. A continuación, se resume la ecuación que da solución a dicho planteamiento

$$P.R.A_{i,j} = M.P.Ai, j = \left(\frac{a + 4m + b}{6} \right) \pm \left(\frac{b - a}{6} \right) \tag{3.14}$$

3.4.2.3. Precauciones del parámetro de respuesta de la alternativa i respecto al indicador j

Cuando se trabajan resultados en forma de intervalo para cada una de las respuestas de las diferentes alternativas (alt. 1, alt 2.), se pueden generar diferentes funciones de probabilidad por la versatilidad de los resultados y estos pueden no distribuirse simétricamente alrededor de la media (ver figura 3.13).

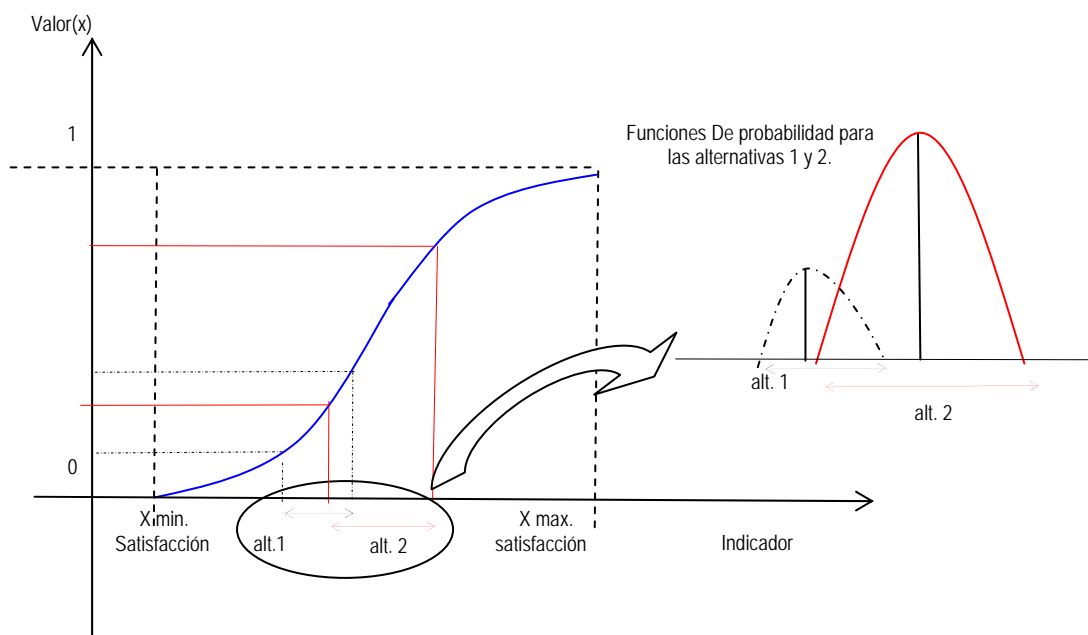


Figura 3.13. Respuesta de la alternativa con varias funciones de probabilidad

En consecuencia, se recomienda que para calcular el valor medio de dichos intervalos no basta con calcular la media aritmética a partir de sus extremos, es necesario hacer el respectivo análisis estadístico para de esta manera considerar la asimetría de la función y obtener el valor real de su media. Esta sugerencia se hace ya que puede verse distorsionada la respuesta de la alternativa en estudio y al traducir dichas medidas en la función de valor, puede resultar menos o más favorecido de lo que realmente es.

Para finalizar este apartado cabe decir que durante el desarrollo de la tesis se opta por trabajar con un valor único de respuesta y no con un intervalo. Se toma esta decisión por la facilidad de posteriormente seleccionar la mejor alternativa, no obstante, es posible considerar un rango de valor.

3.4.3. Construcción de la función de valor

3.4.3.1. Definición

Los indicadores estarán en general medidos en diferentes unidades y en algunos casos serán difícilmente comparables por ejemplo, costes de construcción (€/m²), emisiones de CO₂ (gr CO₂). Debido a ello, se hace necesario unificar dichas escalas. Esta unificación se hace a partir de una función la cual normaliza las medidas de valores a través de una escala que de acuerdo a la metodología propuesta varía entre 0 y 1. No obstante, es posible tomar valores diferentes a los sugeridos.

Debido a los inconvenientes que se han encontrado a la hora de construir dicha función (como se explica en el capítulo 2), se ha orientado a buscar condiciones para facilitar este proceso y varias propuestas han surgido al respecto (Rios et al 1989; Keeny et al 1976; Aragonés et al., 1997).

Una propuesta que actualmente se hace para facilitar esta práctica, surge en el entorno del proyecto MIVES¹ (Modelo integrado de cuantificación de valor de un proyecto constructivo sostenible. Aplicación a la edificación industrial y de servicios). Esta propuesta básicamente se enmarca en la construcción de una función a partir de una única ecuación en la que variando ciertos parámetros (que se explican con detalle en el apartado 3.4.3.2.) quedan traducidos los valores de las alternativas para cada indicador a una única escala.

La expresión de la ecuación propuesta es la que se muestra en la ecuación 3.15.:

$$v_{ind}(X_{ind}) = A + B * \left[1 - e^{-K * \left(\frac{|X_{ind} - X_{min}|}{C} \right)^P} \right] \quad (3.15.)$$

donde,

v_{ind} = Es el valor del indicador en evaluación.

A = Valor que genera la abscisa X_{min} . Para este caso $A=0$.

B = Es un factor que permite que la función se mantenga en un rango de valor entre 0 y 1. Admite que la mayor satisfacción tenga un valor de 1. La expresión que resume este factor es la expresada en la ecuación 3.16.

¹ Proyecto de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico : MAT 2002 – 04310

$$B = \frac{1}{\left[1 - e^{-K * \left(\frac{|X_{máx} - X_{mín}|}{C} \right)^P} \right]} \quad (3.16.)$$

$X_{mín}$ = abscisa que genera un valor de satisfacción igual a cero.

$X_{máx.}$ = abscisa que genera un valor de satisfacción igual a uno.

X_{ind} = abscisa que genera un valor igual a V_{ind} .

P = Define la pendiente y la forma de la curva: cóncava, convexa, lineal, en "s".

Si $P < 1$ se obtiene una curva cóncava.

Si $P > 1$ se obtienen curvas convexas o en forma de "s".

Si $P = 1$ tiene tendencia lineal.

C = Para $P > 1$ define el valor de la abscisa para el cual se produce el punto de inflexión o el punto donde la función es derivable. Se obtiene de igualar la segunda derivada a cero (ver ecuaciones 3.17 – 3.19).

K = Define el valor de la ordenada del punto C_i

$$\frac{d'v_{ind}}{dX_{ind}} = - \frac{K * \left(\frac{(X_{ind} - X_{mín})}{C} \right)^P * p * e^{-K * \left(\frac{X_{ind} - X_{mín}}{C} \right)^P}}{(X_{ind} - X_{mín}) * \left(-1 + e^{-K * \left(\frac{X_{máx} - X_{mín}}{C} \right)^P} \right)} \quad (3.17)$$

$$\frac{d''v_{ind}}{dX_{ind}} = \frac{KPe^{-K \left(\frac{X_{máx} - X_{mín}}{C} \right)^P} e^{-K \left(\frac{X_{máx} - X_{mín}}{C} \right)^P} \left(\left(\frac{X_{ind} - X_{mín}}{C} \right)^P P - K \left(\frac{X_{ind} - X_{mín}}{C} \right)^{2P} P - \left(\frac{X_{ind} - X_{mín}}{C} \right)^P \right)}{(X_{ind} - X_{mín}) * \left(-1 + e^{-K * \left(\frac{X_{máx} - X_{mín}}{C} \right)^P} \right)} \quad (3.18)$$

$$X_{ind} = e^{\left(\frac{\ln \left(\frac{P-1}{P*K} \right)}{P} \right)} * c + X_{mín} \quad (3.19)$$

3.4.3.2. Características de la función de valor

- Función creciente o decreciente

La función de valor puede ser creciente o decreciente según el tipo de indicador que se quiera evaluar. Por ejemplo, si se tiene un indicador como las “emisiones de CO₂,” se trata de un indicador con función de valor descendente, esto es, a menores emisiones se consigue una satisfacción máxima tal y como se muestra en la figura 3.14(a). Por el contrario, un indicador del tipo “tiempo de resistencia de la estructura al fuego” es un indicador con una función de valor ascendente. La máxima satisfacción se consigue con el máximo tiempo que resista la estructura según se observa en la figura 3.14(b).

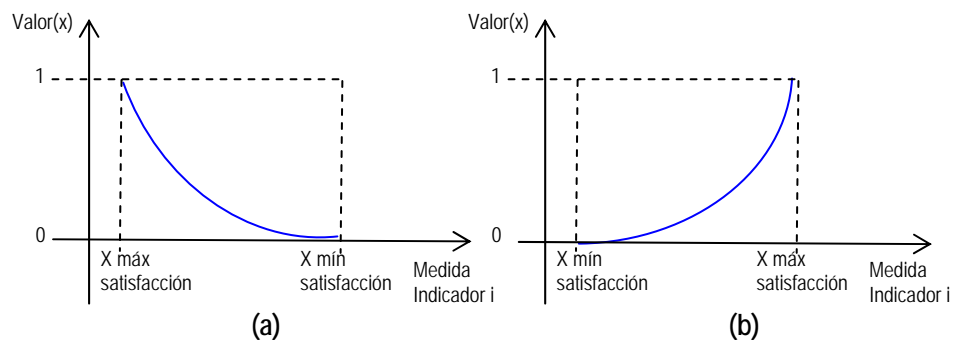


Figura 3.14. Ascendencia o descendencia de la función de valor

- Puntos de mínima y máxima satisfacción del indicador

Los puntos de mínima y máxima satisfacción definen los límites de la función de valor en el eje de las abscisas: $X_{\text{mín}}$ (la abscisa de mínima satisfacción) y $X_{\text{máx}}$ (la abscisa de máxima satisfacción). Al valor de mínima satisfacción le corresponde en el eje de las ordenadas un valor de 0 y al valor de máxima satisfacción le corresponde un valor de 1.

Puede darse el caso que existan dos puntos de mínima satisfacción y uno de máxima como se muestra en la figura 3.15. Este es el ejemplo del indicador correspondiente a la temperatura de confort. Genera mínima satisfacción cuando sus valores son temperaturas muy bajas como lo puede ser la de cero grados o por el contrario temperaturas muy altas como la de 50°. La satisfacción mayor se alcanza con un valor aproximado de temperatura de 23°.

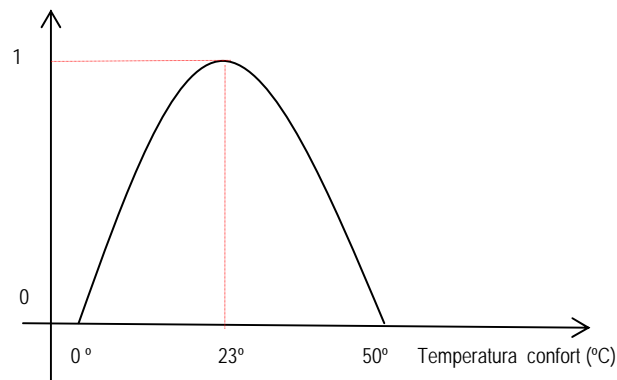


Figura 3.15. Indicador con 2 puntos de mínima satisfacción.

Para evaluar esta clase de indicador, se aconseja ajustarlo a una función creciente o decreciente dependiendo de la naturaleza del indicador. Este ajuste como se muestra en la figura 3.16 se puede hacer a partir de una redefinición del mismo. Por ejemplo definir el indicador como diferencia de temperatura respecto a la óptima para luego evaluar qué tanto se alejan los otros valores en relación a este óptimo.

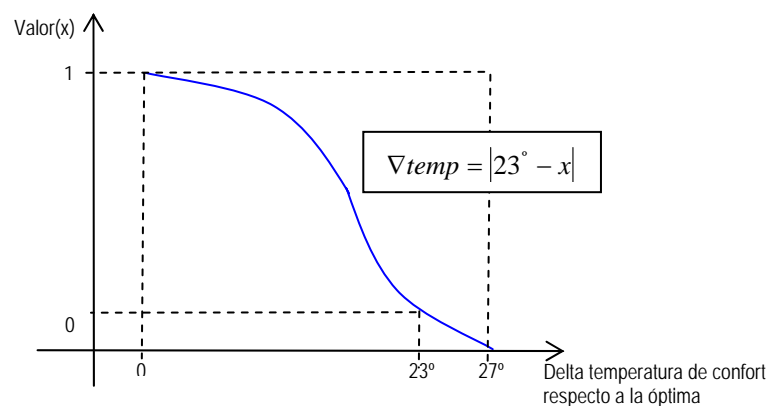


Figura 3.16. Redefinición del indicador

Para establecer los puntos de mínima y máxima satisfacción se pueden seguir tres criterios en su orden: *normativa*, *experiencia* y *el valor menos y más favorable de las alternativas que se estén evaluando*.

Normativa

Cuando el rango de valores esté determinado por normativas, automáticamente los indicadores quedan restringidos al cumplimiento de valores otorgados por las mismas o a valores menores que estén incluidos dentro del intervalo definido. Los límites que se delimiten a partir de ésta son inflexibles ya que son de obligado cumplimiento.

Estos indicadores no entran en la evaluación ya que son de obligado cumplimiento. En caso de valorarse la calificación obtenida para éstos se considerará como un incremento de valor. Por ejemplo, si se tiene el indicador "Tiempo de resistencia de la estructura frente al fuego" y su respuesta son X minutos. En el momento de hacer la evaluación el valor que le otorgará en la escala de valor no será el de $X + \Delta X$, sino únicamente el ΔX ya que el X representaría lo mínimo que debería cumplir por normativa.

Experiencia

Cuando no se tiene información para los indicadores con respecto a ninguna normativa específica, estos valores se determinan por experiencia, por datos históricos o bien por datos procedentes de la literatura. En este caso, el rango de valores es un poco más flexible que en el caso de la normativa.

Mismas alternativas

Cuando se carece de información bien sea dada por la legislación o por la experiencia, estos límites o rangos de valores se traducen en los extremos mínimo y máximo de las alternativas que se estén evaluando en ese momento para un indicador. En cada una de las alternativas se debe definir los extremos inferior y superior. Posteriormente, para cada uno de los valores obtenidos en los extremos inferiores se toma el menor de ellos al igual que con los extremos superiores. Por ejemplo si se tienen las siguientes alternativas como se muestra en la figura 3.17:

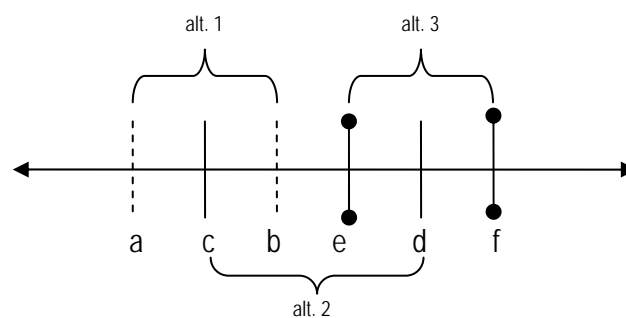


Figura 3.17. Elección de puntos de mínima y máxima satisfacción

Alternativa 1 : $[a, b]$ donde $b > a$

Alternativa 2 : $[c, d]$ donde $d > c$; $d > b$; $c > a$; $b > c$

Alternativa 3 : $[e, f]$ donde $f > e$; $f > d$; $e > c$

Decimos que el rango de valores límite mínimo y máximo queda definido por $[a, f]$. En caso de que existiese una nueva alternativa, estos valores límites podrían cambiar y en ese caso, se definiría un nuevo rango de valores.

- Forma de la función de valor

Para la función se establecen cuatro formas básicas: Cóncava, Convexa, Lineal y en forma de "s" que se deriva de la unión de las dos primeras. Se define estas tendencias ya que según Cañabate (1997) éstas representan los comportamientos más comunes de los individuos en relación a la aversión o atracción al riesgo respecto a las decisiones a tomar.

Función Convexa

Se usa cuando a partir de una condición mínima de cumplimiento, la satisfacción (valor en las ordenadas) se incrementa de manera evidente en relación con el parámetro de respuesta del indicador según se muestra en la ecuación 3.14a. Una vez se haya verificado la normativa mínima y la medida que la respuesta del indicador alcance esta satisfacción, mayor será el valor en la escala. Se debe señalar que sólo hasta cierto margen de respuesta del indicador, el valor manifiesta esta satisfacción.

Función Cóncava

Si el parámetro de respuesta del indicador (eje X) presenta un valor pequeño, su valor inicial de satisfacción (eje y) es mínimo. A medida que se incrementa la respuesta, se maximiza este valor en la escala como se muestra en la figura 3.18b. Este tipo de curvas suelen ser convenientes para indicadores de tipo económico, ambiental, temporal puesto que se busca motivar a que las alternativas se encuentren más cerca del punto de máxima satisfacción.

Función con tendencia lineal

Dicha función refleja incrementos de valor iguales a lo largo de la respuesta de las alternativas (ver figura 3.18c)

Función en forma de "s"

Esta función es una combinación de la función cóncava y de la convexa. Su incremento de satisfacción se detecta significativamente en los valores centrales, es decir, en los valores alejados de los rangos de valor mínimo y máximo en donde se refleja su menor satisfacción (ver figura 3.18d).

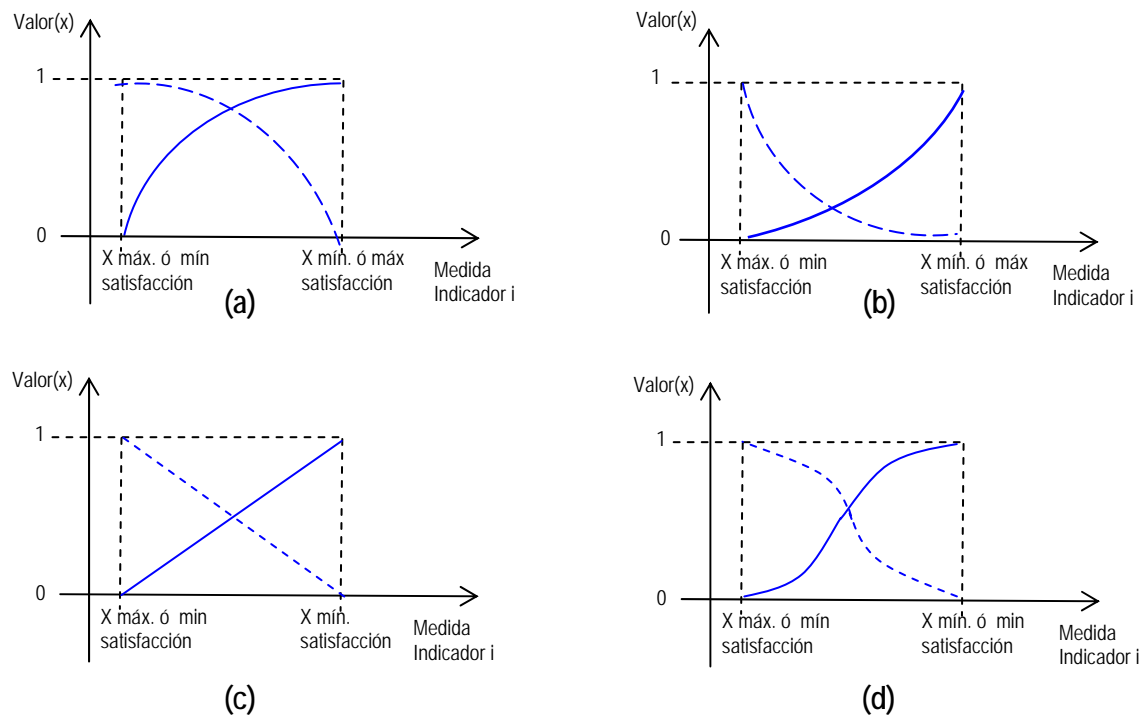


Figura 3.18. Formas que puede adoptar la función de valor (Manga, 2005)

3.4.3.3. Parámetros que determinan la ecuación de valor

La ecuación presenta un comportamiento que depende de los valores que puedan tomar las variables P_i , C_i y K_i según se explicó en el apartado 3.4.3.2. A cada variable se le puede atribuir un sentido físico lo que hace que sea más comprensible y manejable para el usuario. Esta modelización ofrece un avance respecto a las propuestas realizadas hasta el momento por Rios et al (1986) ; Keeny et al, (1993) ; Bana et al,(1994); Yu, P.,(1985).

Manga (2005) realizó un estudio sobre el comportamiento de la función respecto a la variabilidad de los parámetros que la rigen y llegó a las siguientes conclusiones:

- La ecuación varía según los valores que se asignen a las abscisas $X_{máx.}$, $X_{mín.}$ y $X_{ind.}$
- Si la función es cóncava, se recomienda que los valores que tome K_i sean mayores a 0.9 y los valores de P_i sean menores a 0.1.
- Si función es convexa, se recomienda que los valores que tome K_i sean menores a 0.1 y los valores de P_i sean mayores a 2.
- Si la función es lineal, se recomienda que los valores que tome K_i sean aproximadamente iguales a 0.5 y los valores de P_i sean aproximadamente iguales a 1.

- Si la función toma forma de "S", se recomienda que los valores que se asignen a K_i varíen entre 0.1 y 0.2. Por otra parte los valores de P_i deben variar entre 2 y 4 si se trata de una curva suave. Si por el contrario la curva es fuerte los valores que se asignan a P_i deben variar entre 4 y 10.

3.4.3.4. Función de valor a partir de un grupo de usuarios

Si se describe la función de valor a partir de un grupo de trabajo, el resultado que se genera para un indicador i , será el correspondiente al valor otorgado por cada miembro, por lo tanto, no se obtiene una única función de valor sino una familia de funciones según se muestra en la figura 3.19.

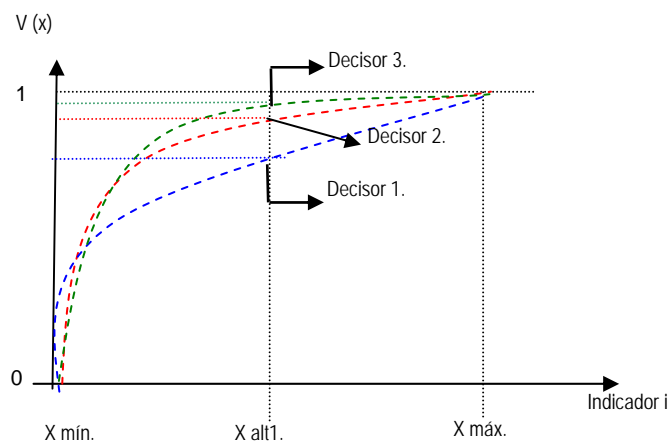


Figura 3.19. Función de valor a partir de un grupo de decisores.

De acuerdo a esta figura, a la abscisa denominada X_{alt1} le corresponden tres valores en el eje de las ordenadas, una por cada decisor. Como se obtiene tres valores es necesario determinar un valor definitivo que permita calificar cada alternativa. Para ello se propone obtener un valor medio de los tres valores o bien trabajar con un rango de valores de tal manera que a cada ordenada le correspondan dos valores: la media y la desviación estándar. Este procedimiento se hace a partir del procesamiento de datos estadísticos.

3.4.3.5. Precauciones de la función de valor

Si se incrementa la pendiente de la función de valor para una misma forma, se disminuye los valores límites del indicador en el eje de las abscisas y como consecuencia, el valor de satisfacción para una misma alternativa aumenta.

Esto se observa mejor en la figura 3.20. en donde para dos funciones de valor con límites distintos de indicador y pendientes, el valor para la alternativa (X alt1), difiere notoriamente en ambas gráficas lo cual lleva a resultados completamente distintos entre las alternativas. Para la función denominada 1, el valor que se obtiene es de 0,03 y para la Función denominada 2 se alcanza un valor aproximado de 0.7.

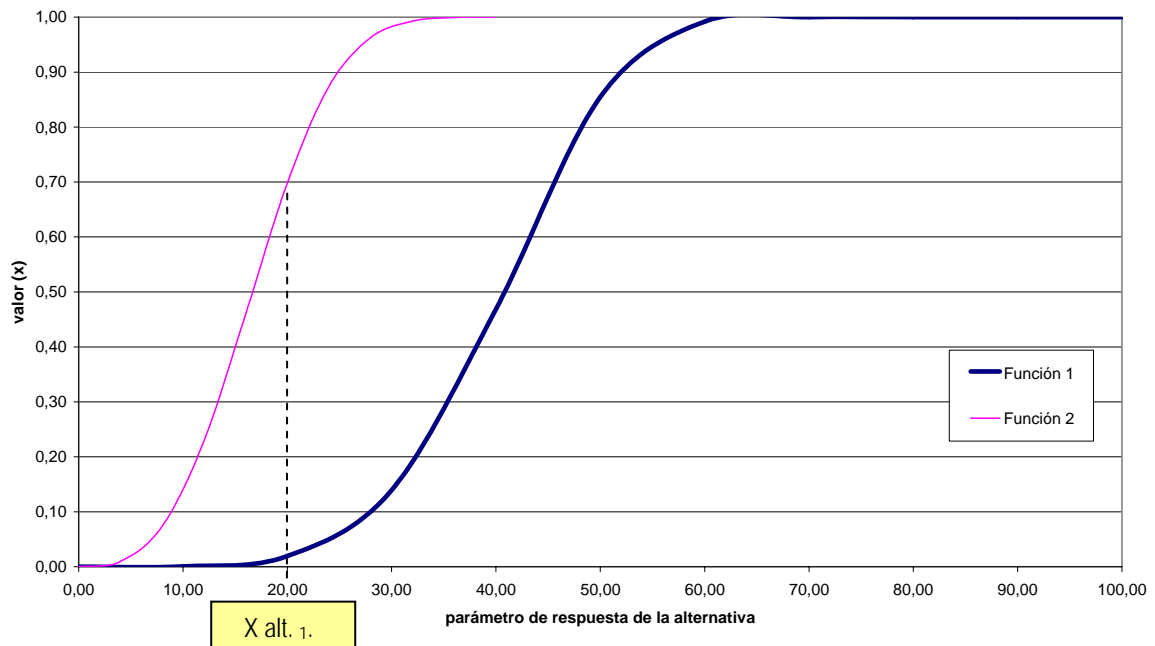


Figura 3.20. Inconvenientes de los puntos de mínima y máxima satisfacción

Para controlar dicha falta, se recomienda seguir las pautas planteadas para definir los puntos de mínima y máxima satisfacción. Estas pautas hacen referencia a los tres criterios expuestos en el apartado 3.4.3.2 (normativas que regulan al indicador, experiencia del o de los decisores y las mismas alternativas).

3.4.4. Cálculo del valor de las alternativas

Las alternativas se cuantifican escalonadamente a partir de los indicadores (rama derecha del árbol de requerimientos) hasta llegar a la parte izquierda con los requerimientos. A continuación se describe el cálculo en cada nivel

3.4.4.1. Cálculo de valor a nivel de indicadores

Para su cálculo, se aplica la función de valor por cada alternativa una vez transformados los parámetros de respuesta de dichas alternativas. Ver ecuación 3.20

$$v_{ijk}^l = v_{ind} \quad (3.20)$$

donde,

v_{ijk}^l = Valor del indicador i del criterio j del requerimiento k para la alternativa l

v_{ind} = Función de valor por cada alternativa en cada indicador.

3.4.4.2. Cálculo de valor a nivel de criterios

El cálculo a nivel de criterios se inicia a partir de los indicadores pertenecientes al mismo criterio. La calificación se hace multiplicando los valores obtenidos en los indicadores por sus correspondientes pesos como se muestra en la ecuación 3.21.

$$v_{jk}^l = \sum_{i=1}^{I_{jk}} v_{ijk}^l * w_{ijk}^l \quad \forall_i = 1 \dots I_{jk} \quad (3.21)$$

donde,

v_{jk}^l = Valor del criterio j del requerimiento k para la alternativa l.

v_{ijk}^l = Valor del indicador i del criterio j del requerimiento k para la alternativa l.

w_{ijk}^l = Peso del indicador i del criterio j del requerimiento k para la alternativa l

I_{jk} = Número total de indicadores pertenecientes al criterio j del requerimiento k.

La multiplicación y la suma ponderada se calculan mediante las fórmulas de álgebra intervalar:

- i. $[a,b] + [c,d] = [a + c, b + d]$
- ii. $K*[a,b] = [k*a, k*b]$, si $k > 0$

3.4.4.3. Cálculo de valor a nivel de requerimientos

Con el valor obtenido a nivel de criterios se calcula el valor a nivel de requerimientos. Para su cálculo se sigue las mismas pautas que con el cálculo a nivel de criterios. A cada requerimiento le pertenecen un grupo de criterios. Estos criterios después de ser multiplicados por sus respectivos pesos y sumados adecuadamente, dan lugar al intervalo de valor para el requerimiento correspondiente.

Expresado en una ecuación (3.22), el valor correspondiente para cada requerimiento queda descrito de la siguiente manera:

$$v_k^l = \sum_{j=1}^{J_k} v_{jk}^l * w_{jk}^k \quad \forall_j = 1 \dots J_k \quad (3.22)$$

donde,

v_k^l = Valor del requerimiento k para la alternativa l.

v_{jk}^l = Valor del criterio j del requerimiento k para la alternativa l.

w_{jk}^l = Peso del criterio j del requerimiento k para la alternativa l.

J_k = Número total de criterios pertenecientes al requerimiento k.

Definidos los valores a nivel de requerimientos, se inicia la selección de la alternativa óptima.

3.4.5. Cálculo de la alternativa óptima

La selección de la alternativa óptima se realiza a partir de los valores obtenidos en el nivel de los requerimientos. La mejor alternativa es aquella que obtenga el valor (v^l) más alto. Dicho valor se calcula mediante la expresión (3.23).

$$v^l = \sum_{k=1}^K v_k^l * w_k^k \quad \forall_k = 1 \dots K \quad (3.23)$$

donde,

v^l = Valor de la alternativa l.

v_k^l = Valor del requerimiento k para la alternativa l.

w_k^l = Peso del requerimiento k para la alternativa l.

K = Número total de requerimientos

Se debe aclarar que a lo largo del desarrollo de esta tesis se ha expuesto el uso de intervalos de respuesta para las alternativas, no obstante, para la aplicación de la metodología se utiliza un único valor de respuesta (como se expuso en el apartado 3.3.2.1) razón por la cual la selección sólo involucra la elección del valor más alto.

Para finalizar este apartado cabe manifestar que la elección de la alternativa óptima se ve afectada por la inclusión, exclusión ó modificación de nuevas alternativas como es de esperarse.

3.4.6. Análisis de sensibilidad de los resultados

La sensibilidad se utiliza para ver la influencia de los distintos parámetros sobre los valores de las soluciones. Este estudio siempre debe estar acorde con el sistema de decisión analizado.

Para aplicarlo a la metodología, se hará examinando los parámetros que influyen o que tienen efecto sobre la alternativa óptima. Para ello se analiza desde dos aspectos:

- Sensibilidad respecto al modelo: Se examina las variaciones de pesos a nivel de requerimientos. No se tiene en cuenta las modificaciones de pesos a nivel de criterios o indicadores pues la influencia sobre la alternativa óptima no es significativa. Al existir numerosos niveles de jerarquía, la dilución de los valores a nivel de los indicadores se va incrementando a medida que se aumenta en dicha jerarquía. Adicionalmente se analiza el efecto de la variación de los parámetros de la función de valor (P,K,C).
- Sensibilidad respecto a las alternativas: Se examina el intervalo de variación de respuesta de las alternativas.

Este análisis se hace conveniente con el fin de identificar los parámetros más importantes con lo cual se puede prestar atención al hacer las estimaciones y al seleccionar una solución que tenga buen desempeño para la mayoría de valores posibles. Adicionalmente, el proceso ayudará a estimar la fiabilidad del resultado.

3.4.6.1. Sensibilidad de la evaluación de las alternativas respecto a la cantidad de indicadores, criterios o requerimientos (I,C,R)

Un punto a tener en cuenta durante la evaluación de las alternativas lo constituye la cantidad de indicadores, criterios o requerimientos (I,C,R) que se plantean durante la construcción del árbol de requerimientos.

La cantidad de indicadores, criterios o requerimientos que de ahora en adelante particularizaremos a “elementos” quizá influya en el resultado final de la toma de decisión y posiblemente condicione dicho valor puesto que en algunos casos puede hacer significativos elementos que no tienen relevancia o por el contrario, disolver la importancia de cada uno de ellos, esto obviamente, en base a la cantidad que se considere.

Si se analiza la curva del número total de elementos respecto a los pesos (ver figura 3.21) este fenómeno de dilución salta a la vista. Como se observa en la gráfica, para un elemento principal entre diez (10), su peso constituye el 50%. Ahora, si se tienen en cuenta dos elementos principales, su peso disminuye a un 41.3%. Si por otra parte se consideran dos elementos principales pero uno ligeramente más importante que otro, la variación es de un 7% aproximadamente quedando en un 34.6%.

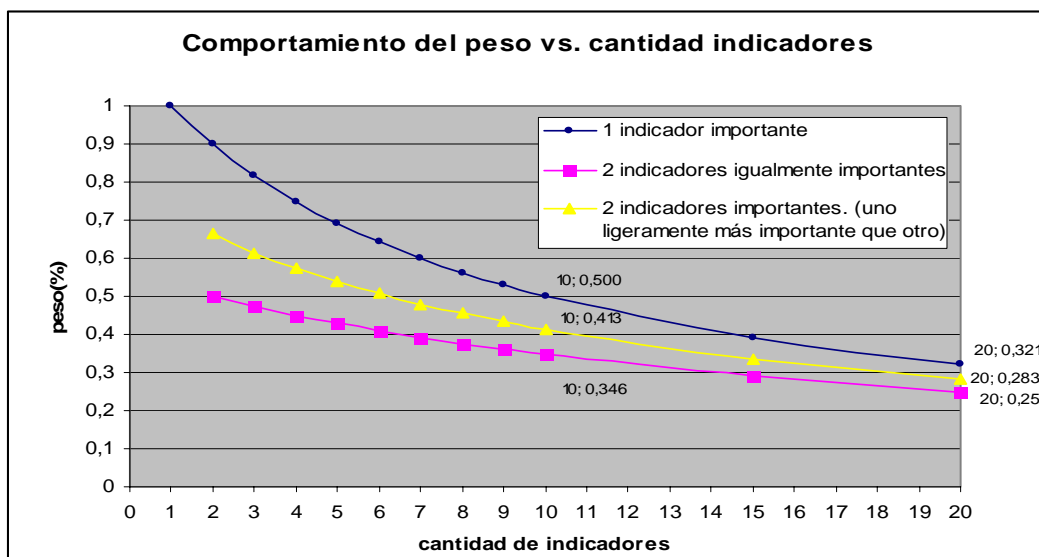


Figura 3.21. Curva que refleja la dilución de indicadores, criterios o requerimientos

Hay que resaltar que entre más elementos se tengan, menor será su importancia respecto a los nuevos que se incluyan. En la tabla 3.4. se resume el porcentaje de dilución para un grupo de 10 y 20 indicadores respectivamente

Número de indicadores, criterios o requerimientos principales	Pesos para un grupo de 10 indicadores (%)	Pesos para un grupo de 20 indicadores (%)
1 indicador principal	50	32.1
2 indicadores principales (uno más importante que otro)	41.3	28.3
2 indicadores principales	34.6	25

Tabla 3.4. Porcentajes que reflejan la dilución de indicadores

De cara a la problemática expuesta sobre la cantidad de indicadores que se debe considerar en la evaluación, y teniendo como base el principio de Pareto (si se tiene un problema con muchas causas, se puede decir que el 20% de las causas resuelve el 80% del problema y el 80% de las causas sólo resuelve el 20% del problema) se hace necesario identificar y separar los indicadores, criterios o requerimientos “importantes” de los “muchos triviales”.

Para evitar esta dilución se proponen tres metodologías que ayudan a reducir dicho fenómeno.

- Una primera propuesta que se denomina “**Método de selección indirecta**” consiste en dar pesos a los indicadores más relevantes de un grupo de indicadores en base al 100%. Los pesos antes mencionados se establecen o bien de acuerdo a unos valores de referencia o mediante el método de Saaty para que la comparación sea aun más homogénea. Por otra parte, los indicadores que no se consideran principales se agrupan de tal manera que mediante la comparación por pares (aplicación SAATY) se obtienen el restante del 100%. Con esta metodología quedan predeterminados pesos para los indicadores principales y para los indicadores secundarios o no principales.

Desventaja

Por la mezcla de dos metodologías en la asignación de pesos (A.H.P. y Asignación directa) hace que el método se convierta en un sistema mixto y por tal razón se pierda el rigor científico. Adicionalmente, con dicha metodología se puede llegar a descartar algún indicador importante dentro de la toma de decisión.

Ventaja

Como se detectan los indicadores más importantes vs. los triviales, es más fácil de establecer la relación que hay entre ellos (Principio de Pareto) de tal manera que se pueda llegar a una toma de decisión adecuada si se identifican correctamente los indicadores relevantes. Esta es una adecuación de la aplicación del principio de Pareto.

- La segunda propuesta vista desde un enfoque ingenieril, y denominada “**método de selección directa**” consiste en limitar el número de indicadores desde un comienzo. Es decir, establecer un filtro de cuáles indicadores son los que presentan una mayor aportación a la aplicación del modelo.

Desventaja

Esta selección tiene como inconveniente que es subjetiva pues en el caso de que no se adopte uno de los indicadores el valor final de la toma de decisión cambia por completo.

Adicionalmente, si no se tiene experiencia en la magnitud del valor que corresponde a cada indicador puede tener efectos contraproducentes ya que no se valorará lo que realmente se quiere.

Ventaja

Además de ser una metodología rápida, es una técnica que goza de practicidad por la reducción de tiempos y en las respuestas inmediatas que se obtienen.

- Como tercera propuesta está la metodología denominada "*método de las iteraciones*" consiste en no limitar el número de indicadores ni realizar ningún filtro previo. Inicialmente se realiza la comparación por pares de todos los indicadores sin ninguna clasificación anterior. Una vez realizada esta comparación y determinados unos pesos preliminares se hace un primer filtro de acuerdo a un criterio preestablecido. Este criterio puede basarse en dos aspectos: Fijar un porcentaje mínimo por ejemplo un 5% o bien de acuerdo al número de indicadores, establecer un porcentaje mínimo en base a estos parámetros.

Una vez realizado el primer paso de ponderación y seleccionados los indicadores que cumplan el criterio mínimo establecido, se vuelve a realizar una segunda aplicación de Saaty de tal manera que para estas ponderaciones los pesos resultantes sean lo más homogéneos posibles. Si llegado el caso en la segunda ponderación no se filtran por completo los indicadores se inicia una tercera ponderación de los mismos hasta llegar a los indicadores principales.

3.4.7. Recomendaciones y toma de decisión

Para que al final los resultados tengan alguna interpretación, hay que elaborar un informe de ayuda a la decisión. En base a los datos obtenidos, el decisor puede extraer conclusiones acerca del comportamiento de las variables que más influyen, de la confiabilidad del método y de que los resultados obtenidos, sean una aproximación certera. Algunas veces los números generan una falsa sensación de seguridad que lleva a pensar que la solución obtenida es la mejor.

Se debe por tanto, realizar un informe final en el que se analice la coherencia o incoherencia de los resultados obtenidos, se ha de tener en cuenta las circunstancias y los factores que han influido en la metodología empleada. Hay que analizar posibles sesgos que hayan podido influir en los resultados. En definitiva, ***el decisor debe conocer el grado de fiabilidad de los resultados para poder adoptar una solución final.***

3.5 CONTROL

Es la última fase del proceso de toma de decisión. Su objetivo se centra en verificar todos los aspectos que se ha ido llevando a cabo. Este control se realiza en cada una de las fases (control de producción) como en la interfase entre las fases (control de recepción).

Por lo anterior, el control tiene un carácter iterativo e implica, en una visión global, una retroalimentación de las enseñanzas obtenidas. Dichas enseñanzas serán introducidas en el siguiente ciclo (o decisión), lo que constituye un proceso de mejora continua

El control según Cañabate, (1997) además de permitir reaccionar a tiempo de situaciones no previstas, proporciona información y experiencia para posteriores tomas de decisión relacionadas o bien con la que se está ejecutando o bien con decisiones similares.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS VARIABLES PARA LA TOMA DE DECISIÓN EN EL EDIFICIO INDUSTRIAL

4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha propuesto una metodología de toma de decisión para evaluar diferentes alternativas en el edificio industrial sostenible. De cara a estructurar la validación de dicha metodología, el **objetivo** de este capítulo no es otro que el de establecer, caracterizar y analizar las variables necesarias para su adaptación y planteamiento.

Para ello se desarrollará en cada una de las etapas del modelo propuesto sus correspondientes actividades. Para la etapa de *análisis* se propondrá el árbol de requerimientos definiendo requerimientos, criterios e indicadores. Para la *creatividad* se establecerán las diferentes alternativas tipo a evaluar, para la etapa de *evaluación* se propondrán las respectivas funciones de valor en cada uno de los indicadores formulados, así como los valores correspondientes a los parámetros de respuesta de la alternativa correspondiente. Se debe aclarar que los datos formulados en este capítulo, se encuentran basados en la revisión bibliográfica encontrada en el sector, así como en estadísticas de proyectos que han sido ejecutados.

Como el objetivo de este capítulo no es entrar en la evaluación propiamente dicha, la etapa de *control* no tiene correspondencia con este apartado puesto que para su aplicabilidad se necesita una respuesta numérica para tomar las medidas correctoras correspondientes.

La obtención y análisis de resultados se comprobarán en el capítulo 6 de esta tesis con el desarrollo de un caso práctico.

4.2. ANÁLISIS

Para el análisis de la toma de decisión lo que se busca básicamente es establecer su contexto. El análisis se estructura, como se explicó en el capítulo tres, a través de tres ejes: requerimientos, componentes y ciclo de vida.

El *eje de requerimientos* define los objetivos del proyecto y se estructura en tres niveles de jerarquía: requerimientos, criterios e indicadores. Estos tres niveles conforman el "árbol de requerimientos". Cabe recordar que dicha estructura debe tener directa correspondencia con los objetivos del proyecto. Para el edificio industrial sostenible se propone el árbol compuesto por 5 requerimientos, 13 criterios y 23 indicadores los cuáles se muestran en la tabla 4.1.

Atañe aclarar que el árbol propuesto es una aproximación muy general a las necesidades en que incurre el edificio industrial. Es meramente el armazón y por tanto, es un planteamiento discutible y sensible a cambios. Al proponer el esquema general de este árbol lo que se pretende es generar futuras líneas de investigación en torno a este campo.

Si bien es sabido, actualmente existen redes internacionales como CRIPS (Construction and City Related Sustainability Indicators) que están desarrollando indicadores en el plano ambiental, económico y social, no obstante, no existe ninguna red o entidad a nivel internacional o nacional que se ocupe de desarrollar o promover aspectos estéticos o funcionales ni tampoco tipologías como la edificación industrial.

Por otra parte, para la definición del árbol de requerimientos planteado se tiene la dificultad añadida de la valoración para dichos indicadores. En la mayoría de casos la obtención de la información es inviable y especialmente, si el proyecto se encuentra en la etapa de diseño, se tienen aproximaciones de la realidad y nada específico.

En lo concerniente a este aspecto, los indicadores propuestos en este capítulo tratan por una parte de ser cuantificables fácilmente y por otro lado, tratan de cubrir y medir las necesidades existentes sin incurrir en el detalle.

REQUERIMIENTOS	CRITERIOS	INDICADORES
AMBIENTAL	Consumo de energía	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m^2)
		Consumo energético previsto (KVa/m^2)
	Utilización de materiales reciclados	Uso de materiales reciclados (%)
		Uso de materiales fácilmente reciclables (%)
	Uso de materiales locales	Materiales usados o extraídos del lugar (%)
Gestión de residuos	% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD)	
ECONÓMICO	Costes	Coste de ejecución en ($\text{€}/\text{m}^2$)
		Coste anual de operación mantenimiento (%)
	Rentabilidad de la Inversión	VPN (Valor Presente Neto) ($\text{€}/\text{m}^2$)
		TIR (Tasa Interna de Retorno) ($\text{‰}/\text{m}^2$)
ESTÉTICO	Calidad de la edificación	Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta
		Factor de forma
	Integración Urbana	Grado de adaptabilidad al entorno
SOCIAL	Integración con el entorno social	Nivel de adaptación social del proyecto respecto a terceros.
		Nivel de adecuación de los servicios auxiliares para el personal.
	Calidad en el ambiente interior	Confort térmico ($^{\circ}\text{C}$)
		Confort acústico (dBA)
		Confort lumínico (Lux)
FUNCIONAL	Constructibilidad	Grado de simplicidad del proceso constructivo.
	Movilidad	Grado de adecuación respecto al proceso productivo.
		Facilidad de enlace con el exterior
	Modificabilidad y flexibilidad	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio.
		Facilidad de ampliación respecto al terreno y al edificio.

Tabla 4.1. Árbol de requerimientos del edificio industrial

Por otra parte, en el capítulo tres de esta tesis se mencionaron los indicadores de "obligado cumplimiento" esto es, aquellos indicadores que obedecen los valores mínimos que dicta la norma. Inicialmente actúan como una pre-evaluación ya que si alguno de ellos, por ejemplo, "*tiempo mínimo de resistencia al fuego*" no cumple, no se entra a evaluar el edificio.

No basta con verificar alguno de ellos, deben verificarse todos los que se integran en la lista que posteriormente se detalla en la tabla 4.2.

Lista de chequeo para indicadores de obligado cumplimiento		
Indicadores	cumple	No cumple
Resistencia a la flexión	✓	
Resistencia a flexo(compresión)	✓	
Equilibrio global	✓	
Resistencia a la corrosión.	✓	
Resistencia a adherencia	✓	
Resistencia a cortante	✓	
Resistencia a tracción	✓	
Estabilidad frente a pandeo	✓	
Resistencia a torsión	✓	
Resistencia a punzonamiento	✓	
Resistencia a acciones laterales	✓	
Deformabilidad	✓	
Figuración	✓	
Resistencia de los grandes pesos circulantes	✓	
Radios mínimos admisibles en la vías de circulación	✓	
Resistencia de frenado	✓	
Resistencia a los efectos dinámicos producidos por las máquinas	✓	
Tiempo mínimo de resistencia al fuego	✓	
Material apto para resistir fenómenos tensionales	✓	
Existencia de juntas de dilatación	✓	
Existencia de planes de prevención de riesgo	✓	
Existencia de planes ambientales	✓	
Cumplimiento de la normativa urbanística de la zona	✓	

Tabla 4.2. Lista de chequeo para el edificio industrial

A continuación se describen cada uno de los elementos del árbol de requerimientos expuestos anteriormente. Para el caso de los indicadores (parámetro cuantificable) en esta fase correspondiente al análisis se define su objetivo, su descripción y unidad. La forma de medirlo, los límites del indicador, la respuesta de las alternativas y la función de valor, se describen en la fase de evaluación de este mismo capítulo.

4.2.1. Descripción del árbol de requerimientos

Para el caso de la edificación industrial se van a adoptar cinco planos que son: *Ambiental, Económico, Social, Estético, Funcional*. Estos planos se fundamentan en los pilares sostenibles (como se explicó en el capítulo 3) y en las necesidades del edificio industrial. A su vez cada plano está estructurado en criterios e indicadores como se detallan a continuación

4.2.1.1. Requerimiento medioambiental (R_1)

Dada la creciente sensibilidad medioambiental, se hace necesario considerar este aspecto bien sea a través de regulaciones, normativas de gestión o en mecanismos de evaluación ambiental como es el caso de la presente tesis. Para este plano se estudian posibles efectos negativos generados sobre el medio ambiente como consecuencia de una modificación en el entorno natural. Se estudian procesos como son el consumo de materias primas, el consumo de energía en fabricación, transporte y colocación, las emisiones al aire, agua o residuos sólidos generados, el reciclaje de materiales entre otras características. A continuación en la tabla 4.3 se detallan los criterios e indicadores que definen dicho plano.

REQ.	CRITERIOS	INDICADORES	NOMENCLATURA
AMBIENTAL	Consumo de energía	Energía consumida por los materiales en el proceso de fabricación (MJ/m^2)	$I_1C_1R_1$
		Consumo energético previsto (KVa/m^2)	$I_2C_1R_1$
	Utilización de materiales reciclados	Uso de materiales reciclados (%)	$I_1C_2R_1$
		Uso de materiales fácilmente reciclables (%)	$I_2C_2R_1$
	Uso de materiales locales	Materiales usados o extraídos del lugar (%)	$I_1C_3R_1$
	Gestión de residuos	(%) de reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).	$I_1C_4R_1$

Tabla 4.3. Descripción del plano medioambiental.

4.2.1.1.1. Consumo de energía (C_1R_1)

La construcción de los edificios comporta unos impactos ambientales que incluyen la utilización de materiales que provienen de recursos naturales, la utilización de grandes cantidades de energía tanto en lo que atiende a su construcción como a lo largo de su vida y el impacto ocasionado en el emplazamiento. El material fuertemente manipulado y que ha sufrido un proceso de fabricación utilizado en el campo de la construcción tiene unos efectos medioambientales muy importantes, con un contenido muy intensivo en energía (Alavedra et al 1998).

- *(MJ/m²) Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (I₁C₁R₁)*

La energía incorporada de un material incluye toda la que se necesitó en los distintos procesos necesarios para llevar el material a su lugar en el edificio: desde la extracción de las materias primas, hasta su manufactura y levantamiento; debe incluir la energía asociada al transporte (y a la parte proporcional de la infraestructura necesaria para que éste sea posible), así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarios para todos esos procesos (Woolley et al, 1997). La mayoría de esta energía proviene de la incineración de combustibles fósiles, que son limitados, una fuente de energía no renovable. Se estima que el 80% de toda la energía necesaria para producir una construcción es usada en la fabricación y transporte de materiales. Los procesos de construcción en la obra, ocupan la mayor parte del 20 % restante (Presti, 2002).

- *(KVa/m²) Consumo energético previsto (I₂C₁R₁)*

Este indicador se encuentra asociado con el consumo de energía. Su objetivo se centra en predecir los consumos energéticos de acuerdo a las cargas y demandas eléctricas adoptadas.

4.2.1.1.2.. Utilización de materiales reciclados (C₂R₁)

Una vez el material ha completado su utilización en el edificio, puede tener un uso adicional como recurso en otro proceso y puede ser reutilizado o reconvertido. Este proceso evita impactos sobre el medio ambiente y el desperdicio de energías mayoritariamente no renovables. Es sabido que en España se reciclan más del 10% de todos los residuos de construcción y demolición (RCD) que se generan.

Otra definición que puede aportarse al respecto es la extraída de la ley 10/98, " es *la transformación de los residuos, dentro de un proceso de producción para su fin inicial o para otros fines, incluido el compostaje y la biometización, pero no la incineración con recuperación de energía*"

- *(%) Uso de materiales reciclados (I₁C₂R₁)*

Indicador que evalúa el uso de materiales con contenido de reciclaje. Por ejemplo evalúa el uso de áridos reciclados, de adiciones, etc.

- *(%) Materiales reciclables. (I₂C₂R₁)*

Indicador que evalúa la cantidad de material que puede ser re-utilizado o reconvertido. Algunos desperdicios pétreos pueden ser reutilizables en las sub-bases en los pavimentos.

4.2.1.1.3. Uso de materiales locales (C₃R₁)

Si durante el ciclo de vida los materiales de construcción son cuidadosos con el medio ambiente, estos tienen un impacto reducido en la salud humana y en el entorno natural, comparados con los productos convencionales empleados para la misma aplicación.

- *(%) Materiales usados o extraídos del lugar (I₁C₃R₁)*

Este indicador mide la cantidad de materiales localmente disponibles para el proyecto. Evalúa el uso de productos que se fabriquen localmente, reduciendo los impactos medioambientales derivados del transporte y apoyando la economía local.

4.2.1.1.4. Gestión de residuos (C₄R₁)

Los residuos en la construcción se pueden generar en el proceso de ejecución, uso o demolición de la misma. Su naturaleza se debe a los materiales sobrantes durante el proceso de construcción o derribo. Las características de forma y material son variadas

En España según el Gremio de Entidades del Reciclaje de Derribos (GERD), el sector de la construcción produce 39 millones de toneladas al año. Esto significa que cada ciudadano español genera una media de 0,9 ton/año. El 60% aproximado, unos 24 millones de toneladas anuales provienen de obras de demolición y mantenimiento de infraestructuras públicas. Su composición en material pétreo, hormigón, cerámico, supera el 80% de su contenido.

El 40% restante, unos 16 millones de toneladas al año, son residuos mixtos de nueva edificación, reforma y reparación, que contienen un volumen muy importante de envases y embalajes, cartón, maderas, plásticos y voluminosos, conjuntamente con restos de otros materiales de construcción.

(%) Reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD) (I₁C₄R₁)

Es un parámetro que evalúa en porcentaje la cantidad de residuos reciclados originados durante los procesos de ejecución, uso y deconstrucción del edificio.

4.2.1.2. Requerimiento económico (R_2)

Este requerimiento medirá lo referente al coste económico que supone cualquier acción en el edificio en cada fase de su ciclo de vida. Bajo la perspectiva de la sostenibilidad, cobra importancia la coordinación de los recursos que va a consumir el edificio como por ejemplo, el consumo energético, el agua, recursos naturales, etc. A continuación en la tabla 4.4, se detallan los criterios e indicadores que definen este plano.

REQ.	CRITERIOS	INDICADORES	NOMENCLATURA
ECONÓMICO	Costes	Coste de ejecución en (€/m ²)	$I_1C_1R_2$
		Coste anual de operación mantenimiento (€)	$I_2C_1R_2$
	Rentabilidad de la Inversión	VPN (Valor Presente Neto) (€/m ²)	$I_1C_2R_2$
		TIR (Tasa Interna de Retorno) (%)	$I_2C_2R_2$

Tabla 4.4. Descripción del plano económico.

4.2.1.2.1. Costes (C_1R_2)

Es un parámetro que evalúa los costes relacionados con la realización o estudio del edificio industrial. Adicionalmente evalúa todos los gastos tangibles necesarios para llevar a cabo la obra y su mantenimiento. Se tienen en cuenta gastos como el coste de materiales, del terreno y licencias, maquinaria, instalaciones, costes por consumo de agua, gasto energético, etc.

- (€/m²) Coste de ejecución ($I_1C_1R_2$)

Con este criterio se evalúan todos los costes generados durante la construcción del edificio industrial, esto es la totalidad de los gastos necesarios para la materialización del proyecto, cubriendo ítems como, materiales, mano de obra, maquinaria, instalaciones, etc.

- (%) Coste anual de operación y de mantenimiento ($I_2C_1R_2$)

Durante la fase de uso del edificio, se producirán unos gastos de mantenimiento respecto a su funcionalidad y a la preservación de las características estéticas. Estos gastos estarán en función del coste de las reparaciones y de la frecuencia con que se tengan que llevar a cabo. El mantenimiento depende también de la tipología y solución que se adopte. Para ello se tienen presentes características como protecciones, repintados, impermeabilizados, etc.

La tendencia actual es construir edificios con costes de mantenimiento reducidos. Esto influye por ejemplo en la utilización de los edificios de cubierta plana, en los que a causa de su menor volumen construido disminuyen los gastos de calefacción, ventilación o acondicionamiento de aire, etc.

4.2.1.2.2. Financiación (C_2R_2)

Se plantea la manera en que el edificio puede costear su planeación, construcción, mantenimiento y reintegración. Para ello se basa en la disposición de créditos, subvenciones y los tiempos de retorno de dicha financiación.

- (€/m^2) *Valor Presente Neto* ($I_1C_2R_2$)

Es un parámetro que calcula el valor de una inversión a tiempo presente. El método del Valor Presente Neto es muy utilizado por dos razones, la primera porque es de muy fácil aplicación y la segunda porque todos los ingresos y egresos futuros se transforman a euros de hoy y así puede verse, fácilmente, si los ingresos son mayores que los egresos.

- (%) *Tasa interna de retorno* ($I_2C_2R_2$)

Este método consiste en encontrar una tasa de interés en la cual se cumplen las condiciones buscadas en el momento de iniciar o aceptar un proyecto de inversión. También se define como aquella tasa que está ganando un interés sobre el saldo no recuperado de la inversión en cualquier momento de la duración del proyecto.

4.2.1.3. Requerimiento estético (R_3)

Este requerimiento estudia la percepción de los usuarios directos (propietarios, proyectistas, trabajadores) así como de los usuarios indirectos (ciudadanos) respecto a la decisión evaluada. También evalúa la influencia arquitectónica del edificio industrial construido debido a diferentes factores (subjetivos) y que hacen del edificio en cuestión una construcción singular que llegue a servir incluso como imagen de la marca de la empresa.

En muchas ocasiones, la empresa propietaria promueve la construcción de un edificio con imagen corporativa de tal manera que la caracterice y le aporte un mayor prestigio. En la tabla 4.5. se especifican los criterios e indicadores correspondientes a este plano.

REQ.	CRITERIOS	INDICADORES	NOMENCLATURA
ESTÉTICO	Calidad de la edificación	Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta	$I_1C_1R_3$
		Factor de forma	$I_2C_1R_3$
	Integración Urbana	Grado de adaptabilidad al entorno	$I_1C_2R_3$
		Imagen de la marca de la empresa	$I_2C_2R_3$

Tabla 4.5. Descripción del plano estético.

4.2.1.3.1. Calidad de la edificación (C_1R_3)

Este criterio marca pautas como la modulación y elección de las proporciones correctas, la estética, etc. Una superficie o una altura inadecuada darán lugar a espacios que dificulten los flujos interiores lo que supondrá una pérdida importante de calidad o incluso inhabilitarán el uso del edificio. Adicionalmente, se consideran los materiales que componen la estructura pues de ellos también depende su propia estética.

- *Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta ($I_1C_1R_3$)*

Es un parámetro que evalúa la calidad de los materiales usados en cubierta y fachada. Evalúa la armonía del entorno con los materiales seleccionados así como la resistencia de los mismos a las sollicitaciones de carga y a las condiciones ambientales en las que se encuentra.

- *Factor de forma ($I_2C_1R_3$)*

La forma de un edificio interviene de manera directa en el aprovechamiento climático del entorno a través de dos elementos básicos: La superficie y el volumen. La superficie de la vivienda por los intercambios de calor entre el exterior y el interior de un edificio, a mayor superficie más capacidad para intercambiar calor entre exterior e interior. El volumen del edificio está directamente relacionado con la capacidad para almacenar energía. Como más volumen, más capacidad para almacenar calor.

Una manera de cuantificar la relación entre la forma de un edificio y su capacidad para intercambiar calor con el exterior es el factor de forma, que es el cociente entre la superficie del edificio y su volumen. Para climas fríos conviene un factor de forma pequeño entre 0,5 y 0,8; y para climas cálidos conviene uno grande, superior al 1,2.

Otro aspecto que interviene en el mecanismo de intercambio energético entre la vivienda y el exterior es el color de la fachada, los colores claros en la fachada de un edificio facilitan la reflexión de la luz natural y por tanto ayudan a repeler el calor de la insolación. Por contra los colores oscuros facilitan la captación solar. La orientación determina la exposición del edificio al sol y a los vientos. La orientación sur del edificio es la más favorable en los climas mediterráneos.

4.2.1.3.2. Integración urbana (C₂R₃)

Este criterio identifica el grado de adaptabilidad del edificio que se va a proyectar o construir en el entorno natural o urbano en el que se realiza la edificación.

- *Grado de adaptabilidad en el entorno (I₁C₂R₃)*

Con este criterio se evalúa el posible impacto que produce el edificio industrial en el entorno que le rodea. Lo que se pretende con este criterio es caracterizar el grado de discordancia de dicha edificación con las edificaciones presentes en el entorno o zona donde se encuentra ubicado.

- *Imagen de la marca de la empresa (I₂C₂R₃)*

Evalúa la influencia arquitectónica del edificio industrial construido debido a diferentes factores (subjetivos) y que hacen del edificio en cuestión una construcción singular que llegue a servir incluso como imagen de la marca de la empresa.

4.2.1.4. Requerimiento social (R₄)

Este requerimiento analiza aspectos como la aceptación social de la decisión a tomar. Se estudia características concernientes al desarrollo de los alrededores, la adaptabilidad del proyecto respecto a terceros, la calidad del ambiente interior. En la tabla 4.6. se muestran los criterios e indicadores asignados a este plano.

REQ	CRITERIOS	INDICADORES	NOMENCLATURA
SOCIAL	Integración con el entorno social	Nivel de adaptación social del proyecto respecto a terceros.	$I_1C_1R_4$
		Nivel de adecuación de los servicios auxiliares para el personal.	$I_2C_1R_4$
	Calidad en el ambiente interior	Confort térmico (°C)	$I_1C_2R_4$
		Confort acústico (dBA)	$I_2C_2R_4$
		Confort lumínico (Lux)	$I_3C_2R_4$

Tabla 4.6. Descripción del plano social.

4.2.1.4.1. Integración con el entorno social (C_1R_4)

Este criterio incluye aspectos concernientes a la adaptación del proyecto respecto a terceros y a la normativa urbanística. Incluye las interacciones personales con el proyecto en si y la adecuación del mismo respecto a las personas que trabajaran allí.

- *Nivel de adaptación social del proyecto respecto a terceros ($I_1C_1R_4$)*

Este indicador evalúa la armonía del proyecto respecto a la actividad constructiva, a la habitabilidad del entorno, a la seguridad, a la calidad, al uso del edificio respecto a terceros. Este parámetro se ejemplifica claramente con las plazas de aparcamiento. Si en la industria se tienen previstas plazas, los operarios no ocuparán plazas externas a la fábrica evitando así perturbaciones para los vecinos de la fábrica.

- *Nivel de adecuación de los servicios auxiliares para el personal ($I_2C_1R_4$)*

Este indicador evalúa la existencia de instalaciones auxiliares destinadas a mejorar la calidad de la estancia de las personas que trabajan en el edificio. Estas instalaciones pueden ser comedores, número de servicios y vestuarios, servicios médicos, servicios culturales entre otros. Estos se constituyen indispensables pues no solamente atienden las necesidades humanas y sociales del personal de una fábrica, sino que incluso son totalmente precisos desde el punto de vista de la eficacia de la fabricación.

4.2.1.4.2. Calidad en el ambiente interior (C_2R_4)

Este criterio visto desde el conjunto del ciclo de vida, evalúa la capacidad de dotar a sus usuarios (trabajadores) de unas determinadas condiciones ambientales en el interior del edificio como son: la iluminación, la ventilación, el confort térmico y el confort acústico. Pueden sugerirse otros condicionantes de calidad en el interior.

- (*°C*) *Confort térmico* ($I_1C_2R_4$)

Este índice mide la temperatura de confort necesaria para el edificio. La climatización del lugar debe mantener la temperatura corporal en 37°. Para calcular dicha temperatura conviene estudiarse factores como la clase de trabajo que se realiza, la ropa que usa el trabajador, la estación del año entre otros factores.

- (*dB(A)*) *Confort acústico* ($I_2C_2R_4$)

Este indicador evalúa la comodidad de los trabajadores respecto a los sonidos molestos. El amortiguamiento del ruido es elemento importante de confort. Hay que considerar los ruidos fuertes que producen dolor físico y los ruidos débiles ya que cuando son continuos pueden disminuir las facultades auditivas.

- (*Lux*) *Confort lumínico* ($I_3C_2R_4$)

El edificio debe contar con buena iluminación para un adecuado trabajo del personal. La forma y selección del edificio así como el desarrollo de sus cerramientos y cobertura se hallan grandemente influidos pues a partir de estos componentes se consigue el óptimo nivel de iluminación. Las necesidades lumínicas dependen del proceso de fabricación y de la índole de trabajo a desarrollar en cada lugar.

4.2.1.5. Requerimiento funcional (R₅)

Este plano describe la función que cumple el edificio en estudio y su adaptabilidad respecto a los cambios. En este se tiene en cuenta todo lo concerniente al diseño y a la organización para facilidad, utilidad y comodidad del posterior empleo. La tabla 4.7 muestra los criterios e indicadores asignados a este plano.

REQ.	CRITERIOS	INDICADORES	NOMENCLATURA
FUNCIONAL	Constructibilidad	Grado de simplicidad del proceso constructivo.	$I_1C_1R_5$
	Movilidad	Grado de adecuación respecto al proceso productivo.	$I_1C_2R_5$
		Facilidad de enlace con el exterior	$I_2C_2R_5$
	Modificabilidad y flexibilidad	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio.	$I_1C_3R_5$
		Facilidad de ampliación respecto al terreno y al edificio.	$I_2C_3R_5$

Tabla 4.7. Descripción del plano funcional.

4.2.1.5.1. Constructibilidad (C₁R₅)

Este criterio evalúa la afinidad del diseño del edificio respecto a la facilidad del proceso constructivo estando sujeta a todos los requerimientos necesarios para llevarla a cabo. Básicamente es la relación entre el diseño y la construcción.

- *Grado de simplicidad del proceso constructivo (I₁C₁R₅)*

Este indicador evalúa la dificultad de los procesos necesarios para la construcción del edificio atendiendo a parámetros como personas ó maquinaria necesaria. Este criterio estará relacionado con las dimensiones básicas del edificio, el tipo de materiales usados en la ejecución, las soluciones constructivas que se van a utilizar (comunes o especiales), la accesibilidad a la obra tanto de maquinaria como de los materiales.

4.2.1.5.2. Movilidad (C₂R₅)

Este criterio se refiere básicamente a la facilidad de movimiento tanto de personas como de material y productos tanto en el interior como en el exterior del edificio. La influencia de este criterio radica en el hecho que debe soportar más cargas y en hecho de que se aumenta el volumen de la planta al realizar el transporte sobre la altura de las máquinas.

- *Grado de adecuación respecto al proceso productivo (I₁C₂R₅)*

Para establecer un edificio industrial, es necesario tener conocimiento perfecto del proceso de fabricación y de la organización de la producción que se va a realizar dentro del conjunto industrial.

Adicionalmente se deben considerar características como la capacidad de producción ya que de esta depende la dimensión que ha de tener la planta industrial en cada etapa así como el tamaño de las futuras ampliaciones.

El objetivo por tanto de este criterio es utilizar el espacio (existente) de la manera más eficaz disponiendo así de medios para el máximo confort, satisfacción y seguridad personal.

- *Facilidad de enlace con el exterior (I₂C₂R₅)*

Este indicador define la adaptabilidad y facilidad del tipo de vía de circulación, para el enlace o enlaces con el exterior. Se recomienda un enlace constituido por una entrada única y una salida única que estén comunicadas directamente con las vías circulatorias principales del polígono. Adicionalmente se evalúan radios de curvatura, ancho de calzadas, pendientes, plazas de aparcamiento entre otros parámetros.

4.2.1.5.3. Modificabilidad y flexibilidad (C₃R₅)

Este criterio evalúa la posibilidad de que el edificio que se vaya a construir sea pensado para que en un futuro pueda albergar otra actividad distinta de la que para en un principio se diseñó, sin necesidad de realizar operaciones de acondicionamiento de gran importancia y teniendo en cuenta que dicho acondicionamiento sea de gran facilidad para adaptar el nuevo proceso.

- *Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (I₁C₃R₅)*

Este indicador evalúa la flexibilidad y simplicidad de desmontaje de los elementos del edificio durante el proceso constructivo, así como en la fase de deconstrucción. También evalúa todas las características del edificio que le hacen más versátil y por consiguiente, con un período de vida útil mayor debido a la posibilidad de reutilización del mismo.

- *Facilidad de ampliación respecto al terreno y al edificio (I₂C₃R₅)*

Debido a que muchos procesos industriales se quedan obsoletos en corto plazo y exigen su renovación, las plantas industriales deben proyectarse de manera que tengan la flexibilidad suficiente respecto al terreno y al edificio para poderse adaptar a estos cambios. Estos cambios se generan por innovación del producto y desarrollo tecnológico.

Bien, siendo descritos cada uno de los elementos del árbol de requerimientos, se pasa a definir el segundo eje que integra el análisis de la decisión: El *eje de componentes* que para el caso del edificio industrial se precisan de la siguiente manera: *Distribución en planta, Explanación, Cimentación, Estructura y forjado, Cerramiento, Cubierta, Pavimentos*. Las instalaciones no entran dentro del alcance de esta tesis por el análisis específico que requieren.

Para concluir la etapa de análisis, se define el *eje del ciclo de vida o temporal* que representa la variable temporal del edificio. Se incluyen cuatro fases: *concepción o planificación, construcción ó ejecución, vida útil y reintegración*.

4.3. CREATIVIDAD

Analizado el contexto sobre el cual se estructura el problema de toma de decisión, el siguiente paso consiste en definir las alternativas las cuales se enmarcan dentro de esta etapa denominada "creatividad" y que se incluye en el proceso de toma de decisión.

Se puede considerar una amplia gama de alternativas para evaluar el edificio industrial las cuales dependen de las necesidades cada proyecto, no obstante, se sugieren algunas

derivadas del libro lógico de componentes, comenzando desde la distribución en planta hasta llegar a la cubierta. La aplicabilidad que aquí se considera no se extiende mucho más allá de la que se muestra en la tabla 4.8. Para el sector de la construcción el alcance no es muy extenso por los costes que se generan, por tanto la creatividad es muy acotada.

LIBRO LÓGICO DE COMPONENTES PARA EL EDIFICIO INDUSTRIAL	
Distribución en planta	
Explanación	Excavación del terreno
cimentación	zapatas
	Vigas de cimentación
	Losa de cimentación
	Pilotes "in situ"
	Pozos de cimentación
Estructura	Metálica
	Madera
	Hormigón prefabricado
	Hormigón in situ
Cerramiento	Chapa
	Bloque de hormigón visto
	Panel de hormigón prefabricado
Cubierta	Chapa
	Deck
	Sandwich
Pavimentos	Aglomerado
	Adoquines
	Hormigón

Tabla 4.8. Libro lógico de componentes para el edificio industrial.

4.4. EVALUACIÓN

4.4.1. Estimación de pesos

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 3 de esta tesis, la evaluación comienza con la estimación de pesos en cada nivel de jerarquía del árbol de requerimientos, no obstante, esta estimación debe hacerse mediante una campaña experimental a través de un grupo de expertos (proyectistas) o bien con la información directa del proyecto.

En este caso, la asignación de pesos se mostrará en el capítulo 6 que es la aplicación práctica y las ponderaciones serán valores estimados de algunos proyectos analizados.

4.4.2. Respuesta de la alternativa y función de valor del indicador.

A continuación se exponen para cada indicador la respuesta de las distintas alternativas para los diferentes indicadores junto con la función de valor correspondiente.

4.4.2.1. Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación I_{C1R1}

- Objetivo

Disminuir el consumo energético con el fin de reducir las emisiones de CO₂ así como el consumo de recursos no renovables.

- Respuesta de la alternativa

La cuantificación de la respuesta de la alternativa se inicia con la identificación de los materiales constituyentes de los diferentes componentes constructivos. En la tabla 4.9 se exponen algunos materiales y cantidades.

Componentes		Unidad	materiales	Cantidades (kg)
Cimentación	Zapatatas	m ³	Hormigón armado	2400
	Pilotes	m ³	Hormigón armado	2400
Estructura	Metálica	Kg.	Acero	1
		Pilar	m ³	Hormigón armado	2400
	Hormigón in situ		m ³	Acero	80
		Viga	m ³	Hormigón armado	2400
	Hormigón prefabricado		m ³	Acero	150
		Pilar	m	Hormigón armado	460
	Viga		m	Acero	13
		Hormigón prefabricado	m	Hormigón armado	538
	Hormigón prefabricado		m	Acero	23
		Cerramiento	Chapa	m ²	Acero	7.5
Bloque de hormigón visto	m ²		Acero	2.3
			Hormigón en masa	267
			Mortero de cemento	50.5
Panel de hormigón prefabricado	m ²	Hormigón en masa acero Poliestireno Expandido	292.5 5.6 1.5	
Cubierta	Chapa	m ²	Acero	7.5
	Deck	m ²	Acero	7.5
			Material Bituminoso Lana de Roca	5 6
Sandwich	m ²	Acero Poliuretano	11.76 1.2	
Pavimentos		m ²	Grava Hormigón en masa Mortero de cemento	255 230 133.1

Tabla 4.9. Cantidades de los diferentes elementos constructivos (kg)

Esta tabla se obtuvo de proyectos reales, catálogos comerciales y de la base de precios del colegio oficial de aparejadores y arquitectos técnicos de Guadalajara 2002, de la base de precios del país vasco y de datos aportados por el proyecto MIVES.

Una vez identificados los materiales que constituyen cada partida, se cuantifican los consumos energéticos mediante el uso de la herramienta SIMAPRO 5 o bien a partir del uso de los valores de referencia recogidos por Vásquez (2001) y que se resumen en la tabla 4.10.

Material	Referencias (año)							
	1	2	3 (b)	4	5	6 (c)	7 (e)	8
Acero	8,06	10	7,67	7-13	7-11	13	11	14 (g)
Acero reciclado				2,5-4,17	2,5-3,3		4,7	
Acero inoxidable	3,06							15
Aislantes térmicos plásticos	1.12 kWh/m ³							
Aluminio	27,0			42-61	42-67	73	44-60	81 (g)
Aluminio en chapa	58	56						65
Aluminio reciclado	3,89			2,8-4,2	3-11			13-29
Áridos		0,01				0,02	0,04	
Asfalto (tela)							3	12
Cemento		2,2	1,8			2,4	2	
Cinc		15						
Cobre (chapa)	19,4	16		19-47	20-24	22	25	
Cobre reciclado				3-22	11-14			
Fibra de celulosa	133 kWh/m ³							
Hormigón	0,28	0,2	0,5	0,2		0,3	0,7	
Hormigón ligero		0,5						
Ladrillo cerámico	0,86	1,2		0,7-1,69		0,09	1,25	
Ladrillo silicocalcáreo		0,4					0,5	
Ladrillo tierra compactada						0,02	0,13-0,4	
Madera		0,1		1,25				
Mamostería en seco						1,4		
Plástico	45	10	2,73	22-61		2,65	20-40	21-23
poli-propilenos								20
poli-uretanos								33,3
Porcelana		6,1					7,5	
PVC								20,7
Teja cerámica plana							4,4	
Vidrio	9,19	6,0		3,6-7	3,3-8,3	7,4	5,3	22,5 (f)
Vidrio reciclado				2,8-5,6	2,8			

Tabla 4.10. Energía consumida por materiales de construcción durante la fabricación (Kwh/Kg)

Referencias. 1: [Wooley et al, 1997]. 2: [Vale & Vale, 1991] (datos de 1982). 3: [Daumal & García, 1978]. 4: [Roodman & Lenssen, 1995]. 5: [Edwards, 1999] (datos de 1998). 6: [Mazria, 1979]. 7: Estimaciones propias basadas en diversas fuentes. 8: [Estevan et alii, 1992].

Notas: a: no incluye transporte. b: no incluye transporte de materias primas ni infraestructura. c: energía de fabricación. d: incluye estabilización con cemento. e: incluye transporte local, hasta 100km, en España, por carretera o ferrocarril. f: mínimo coste para vidrio en automóviles. g: piezas mecanizadas

Estos consumos según se observa, vienen dados en kWh/kg por lo cual hay que hacer su transformación a MJ. Esta transformación se hace multiplicando cada material por los kilogramos correspondientes y enseguida hay que transformarlos de Kwh a MJ multiplicando por 3.6. (factor de conversión). Con dichos consumos se suman los materiales que conforman cada componente y se obtiene finalmente la respuesta de la alternativa.

Existen otros valores de referencia para la energía embebida en los materiales empleados la cual se muestra en la tabla 4.11. Esta referencia fue propuesta por el IDAE (Instituto para la diversificación y ahorro de energía (1999)).

Material de construcción	Energía embebida (MJ/kg)
Acero comercial (20% reciclado)	35
Acero (100% reciclado teórico)	17
Aluminio comercial (30% reciclado)	160
Aluminio (100% reciclado teórico)	23
Cemento	7
Arena	0.1
Grava	0.1
Cobre	90
Fibra de vidrio	30
Madera	3
Madera, tablero aglomerado	14
Pintura plástica	20
Pinturas y barnices sintéticos	100
Poliestireno expandido	100
Poliuretano	70
Polietileno	77
PVC	80
Vidrio plano	19
Yeso	3.3
Mortero	1.2
Hormigón H-200	1.1
Fabrica de ladrillo	2.8

Tabla 4.11. Energía consumida por materiales de construcción durante la fabricación (MJ/kg) (IDAE, 1999)

- Función de valor

Para construir la función de valor se inicia con los puntos de mínima y máxima satisfacción del respectivo indicador. Para este caso debido a la dificultad de medir la energía en el proceso de fabricación de los materiales, se encuentran pocos valores de referencia. En la literatura se ha encontrado el propuesto por (Vale et al , 1991) que se especifica en la tabla 4.12. No obstante, este valor incluye instalaciones y otros componentes que a la vista de nuestro estudio no se han tenido en cuenta por tanto el valor es muy superior a los resultados que se obtienen. Por consiguiente para nuestro caso, se toman como valores de referencia los valores obtenidos de las alternativas.

TIPO DE EDIFICIO	ENERGÍA (kWh/M ²)
Doméstico	1.000
Oficinas	5.000
Industrial	10.000

Tabla 4.12. Energía incorporada en los materiales de un edificio (Vale et al, 1991)

Ahora bien, el segundo paso para construir la función es definir la ascendencia o descendencia que se establece de acuerdo a la satisfacción que otorga el indicador. Para este indicador se propone una función decreciente porque a medida que se incrementa el valor del indicador, la satisfacción decrece pues se genera mayor consumo energético.

El tercer paso es definir la forma (lineal, cóncava, convexa, en "s"). Para este caso se sugiere una función en forma lineal porque cualquier cambio en el consumo energético genera un ahorro importante. No se muestra ninguna gráfica dado que dependen como se dijo anteriormente de los valores de la alternativa. Por otra parte los valores que se proponen para construir la función son: $P = 1$, $K = \text{aprox. } 0$ y $C = X \text{ mín.}$

4.4.2.2. Consumo energético previsto $I_2C_1R_1$

- Objetivo

Predecir los consumos energéticos de acuerdo a las cargas y demandas eléctricas adoptadas.

- Respuesta de la alternativa

La respuesta de la alternativa para este indicador se calcula en base a las siguientes relaciones propuestos por la instrucción técnica complementaria "ITC-BT-10 Previsión de cargas para suministros en baja tensión" del Reglamento Electrotécnico de BT (RD 842/2002, del 2 de agosto)

- ✓ Edificios industriales: 125 W/m² de planta
- ✓ Parcelas no especiales de polígonos industriales de 250 a 300 KW
- ✓ En función de la superficie de la parcela como se muestra en la tabla 4.13.

TAMAÑO DE LA PARCELA	CONSUMO PREVISTO
Parcelas de menos de 5000 m ²	30 – 100 KVA
Parcelas de 5000 m ² – 20000 m ²	250 KVA
Parcelas de más de 20000 m ²	1000 KVA

Tabla 4.13. Ratios propuestos para el cálculo del consumo energético previsto.

Para este indicador se recomienda calcular la respuesta de la alternativa de acuerdo al tamaño de la parcela como lo propone norma. Esto se observa en la tabla 4.14.

Tamaño de la parcela	Punto de mínima satisfacción	Punto de máxima satisfacción
Parcelas de menos de 5000 m ²	100	30
Parcelas de 5000 m ² – 20000 m ²	De acuerdo a la alternativa	250
Parcelas de más de 20000 m ²	De acuerdo a la alternativa	1000

Tabla 4.14. Respuesta del indicador $I_2C_1R_1$ (KVA)

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción de la función de valor se establecen de acuerdo a la tabla 4.14. Respecto a su pendiente, esta es una función de valor descendente. A menor consumo energético previsto, es mayor la satisfacción por que se genera menos impacto ambiental. En relación a la forma es una función de valor en forma lineal por que al igual que el indicador anterior, cualquier cambio en el consumo energético genera un ahorro importante.

A continuación en la figura 4.1, se muestra la función de valor para parcelas menores a 5000 m² puesto que este caso es el más usual en nuestro estudio. Para definir los parámetros de la función se toman valores de $P = 1$, $K = \text{Aprox } 0$. y $C = 30$.

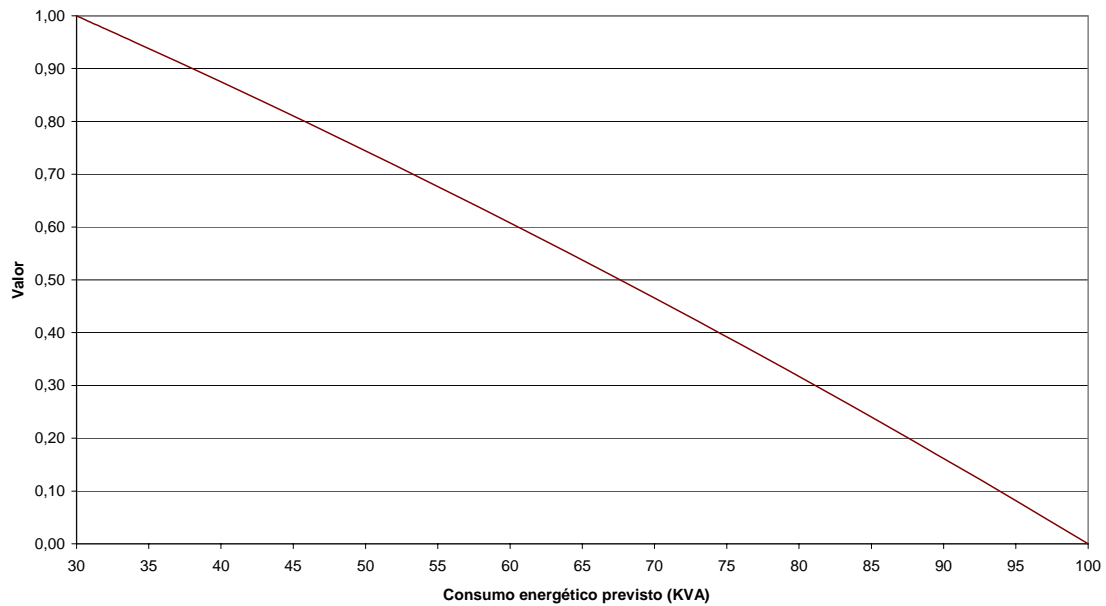


Figura 4.1 Función de valor para el indicador $I_2C_1R_1$.

4.4.2.3. Uso de materiales reciclados $I_1C_2R_1$

- Objetivo

Incrementar la demanda de productos de construcción que hayan incorporado material con contenido de reciclados reduciendo los impactos resultantes de la extracción del nuevo material.

- Respuesta de la alternativa

Se calculan los materiales de construcción que tienen alguna inclusión de reciclaje. Por ejemplo, hormigón con contenido de áridos, acero reciclado, etc. (para identificar los materiales con dicho contenido, en la tabla 4.15 se presenta un resumido listado de los mismos procedentes de la literatura (U.S. Environmental Protection Agency), Garrucho (2006).

Posteriormente se calcula la cantidad total del material que se está evaluando y luego del cociente de estas dos cantidades se obtiene el % de material reciclado por cada material. Como lo que se busca es el porcentaje de reciclado global del proyecto (lo cual incluye la evaluación de todos los materiales) se multiplican los cocientes obtenidos en cada material por un porcentaje propuesto por los evaluadores o bien, se hace una ponderación simple del número de materiales evaluados. A continuación se explican el procedimiento paso a paso para calcular la respuesta en cada alternativa.

- Cuantificar cada material utilizado (acero, hormigón, cemento madera, etc) (MU)
- Cuantificar cada material que contiene reciclado (MR)
- Dividir el total del material que tiene reciclados (MR) sobre el total de materiales utilizados (MU).

$$\% \text{ Material reciclado parcial} = \text{MR/MU}$$

- A cada cociente obtenido en el paso anterior, multiplicarlo por un porcentaje de importancia

$$\frac{\text{Material 1 (w1)}}{\text{Material total 1}} + \dots + \frac{\text{Material n (wn)}}{\text{Material Total n}} \leq 100\%$$

Material	Contenido de reciclaje	Referencia
Hormigón con árido reciclado	20 %	Instrucción de hormigón Estructural. EHE
Hormigón con adiciones de GGBS	25 %	U.S. Environmental Protection Agency
Hormigón con arena reciclada	10%	Gobierno Vasco. Abril 1998
Acero con contenido de material reciclado	90%	Reference specifications for Energy and Resource Efficiency. California Energy Commissions, Public Interest Energy Research
Aluminio con contenido de material reciclado	100%	Reference specifications for Energy and Resource Efficiency. California Energy Commissions, Public Interest Energy Research
Lana de roca	75 %	U.S. Environmental Protection Agency
Fibra de vidrio	25%	U.S. Environmental Protection Agency
Celulosa	75 %	U.S. Environmental Protection Agency
Poliestireno	20 %	U.S. Environmental Protection Agency
Poliuretano	5 %	U.S. Environmental Protection Agency
Material cerámico reciclado	77%	Reference specifications for Energy and Resource Efficiency. California Energy Commissions, Public Interest Energy Research

Tabla 4.15 Valores referencia para la función de valor del indicador $I_1C_2R_1$

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción varían en función del material evaluado. Para el caso de los más representativos las funciones de valor se muestran a continuación

Función de valor del hormigón armado

El hormigón tiene un porcentaje máximo de reciclado del 20% según la instrucción técnica por lo que los valores mínimo y máximo varían entre el 0 y el 20% respectivamente. En relación a la pendiente es una función ascendente, a mayor contenido de reciclaje mayor valor sostenible. Respecto a la forma es una función convexa porque se incentiva el uso de material reciclado. A medida que se recicle se incrementa favorablemente el valor. Los parámetros definidos para la función son: $P= 0.8$, $K = 0.8$ y $C = 10$

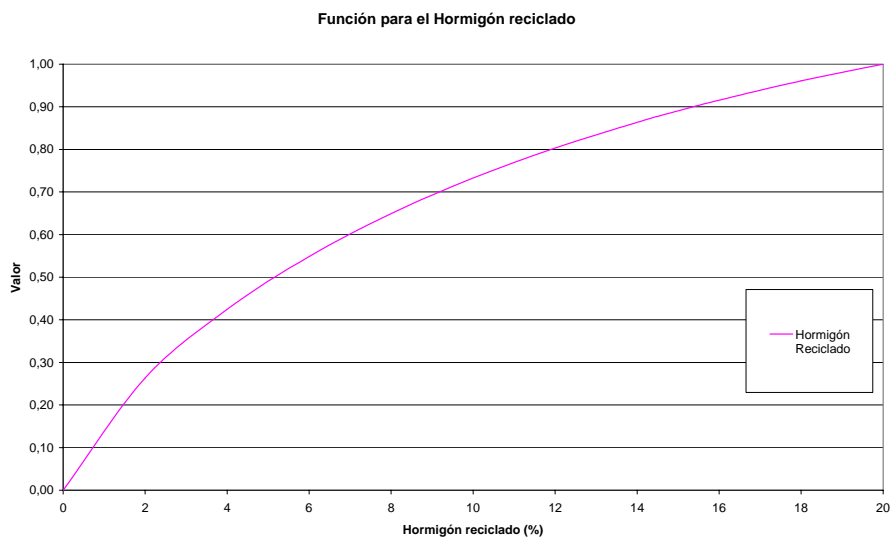


Figura 4.2 Función de valor para el hormigón reciclado.

Función de valor del acero

El acero tiene un porcentaje máximo de reciclado del 90% por lo que los valores mínimo y máximo varían entre el 0 y el 90% respectivamente. En relación a la pendiente es una función ascendente, a mayor contenido de reciclaje mayor valor sostenible. Respecto a la forma es una función convexa por que así como el hormigón se incentiva el uso de material reciclado. A medida que se recicle se incrementa favorablemente el valor. Los parámetros definidos para la función son: $P= 0.8$, $K = 0.8$ y $C = 45$

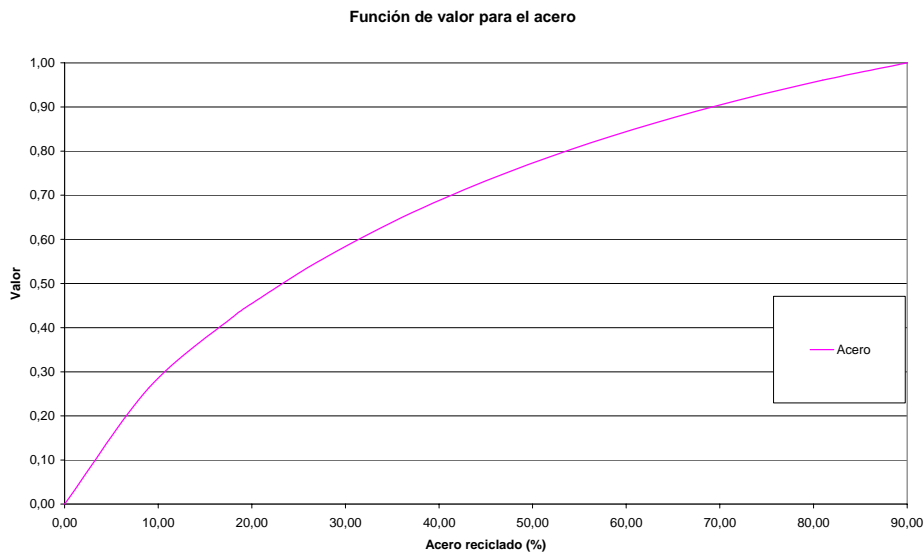


Figura 4.3 Función de valor para el acero.

4.4.2.4. Uso de materiales fácilmente reciclables (%) I₂C₂R₁

- Objetivo

Evaluar la cantidad de material fácilmente reciclable durante el proceso de construcción y derribo.

- Respuesta de la alternativa

El cálculo de la respuesta de la alternativa varía según el proyecto. Se hace a partir del desglose de las actividades de la edificación, de donde es posible prever las cantidades sobrantes de la obra al igual que su naturaleza (para ello entra en juego la experiencia del constructor o de la empresa constructora). Con estos datos se puede saber qué producto es reciclable y en qué cantidad, por tanto, la valoración se obtiene de dividir el material reciclable sobre la cantidad de material total.

- Función de valor

A este indicador corresponde una función de valor con puntos de mínima y máxima satisfacción de 0 a 100% respectivamente. Es una función ascendente y lineal por que en la medida que se pueda reciclar más, mayor será el beneficio y más sostenible será nuestra edificación. La forma depende como se explicó en el indicador anterior del incremento proporcional de beneficio en la medida de que se recicle más.

4.4.2.5. % de materiales usados o extraídos del lugar $I_1C_3R_1$

- Objetivo

Este parámetro evalúa el uso de productos que se fabriquen localmente, reduciendo los impactos medioambientales derivados del transporte y apoyando la economía local.

- Respuesta de la alternativa

Para calcular la respuesta de la alternativa, se cuantifican los materiales de construcción extraídos en el lugar y se saca un porcentaje respecto al total de material utilizado. Los pasos que se siguen son:

- Cuantificar todos los materiales utilizados (acero, hormigón, cemento, madera, etc.) (MU).
- Cuantificar los materiales que se fabrican local o regionalmente (ML)
- Dividir el total de materiales con fabricación local (ML) sobre el total de materiales utilizados (MU) para determinar sus porcentajes.

$$\% \text{ Materiales usado o extraídos del lugar} = ML/MU$$

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción varían del 0 al 100%. La pendiente de la función es ascendente, entre más material del lugar se utilice, mayor es la satisfacción que se logra. Respecto a la forma de la función se sigue una función lineal porque un aumento en material extraído del lugar, incrementa gradualmente el valor. A continuación se muestra la gráfica 4.4 correspondiente a la que se le asignaron los siguientes parámetros: $P = 1$, $K = \text{aprox. cero}$, $C = 50$.

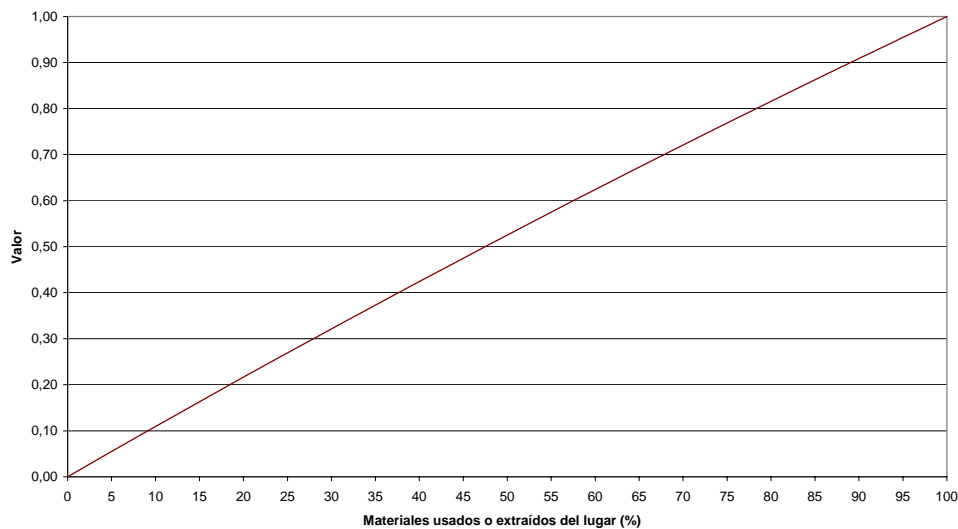


Figura 4.4. Función de valor para el indicador $I_1C_3R_1$

4.4.2.6. % Reciclaje de los residuos de construcción y demolición. $I_1C_4R_1$

- Objetivo

El objetivo es reducir y reutilizar el mayor número de residuos producidos.

- Respuesta de la alternativa

El cálculo de la respuesta de la alternativa se hace a partir del desglose de las actividades de la edificación, de esto se puede saber las cantidades sobrantes al igual que su naturaleza). Posteriormente, se divide la cantidad de este material sobrante (residuos procedentes de construcción y demolición reciclado) respecto a la cantidad de residuos producidos.

- Cuantificar todos los residuos producidos en construcción y demolición (acero, hormigón, cemento, madera, etc.) (MU).
- Cuantificar los residuos de construcción y demolición que puedan ser reciclados (MRCD)
- Dividir los residuos de construcción y demolición que pudieron ser reciclados (MRCD) sobre el total de residuos producidos (MU) para determinar sus porcentajes.

$$\% \text{ Reciclaje de los residuos de construcción y demolición} = \text{MRCD/MU}$$

- Función de valor

De acuerdo a la información existente en la literatura (GERD, 2003), en España se recicla más del 10% de todos los residuos de construcción y demolición (RCD), con lo cual, este valor constituiría el punto de mínima satisfacción. Para el punto de máxima satisfacción y de acuerdo a datos estadísticos el objetivo es alcanzar el 60% de reciclaje para el año 2006 con lo cual, nuestros límites estarían en un rango de 10 – 60%.

Respecto a la pendiente es una función ascendente, el mayor beneficio se presenta con el mayor porcentaje de reciclaje. Se aconseja que la forma de la función sea convexa, cualquier incremento de reciclado se refleja en un incremento en la escala de valor, es una función que recompensa gradualmente cualquier avance en torno al tema del reciclaje. A futuro se puede recomendar una función cóncava por que a medida que pasa el tiempo se va a convertir en una exigencia por lo cual los valores próximos al valor mínimo no deben tener gran valor en la escala de satisfacción. Los parámetros de la función son $P=0.8$, $K = 0.8$, $C = 35$

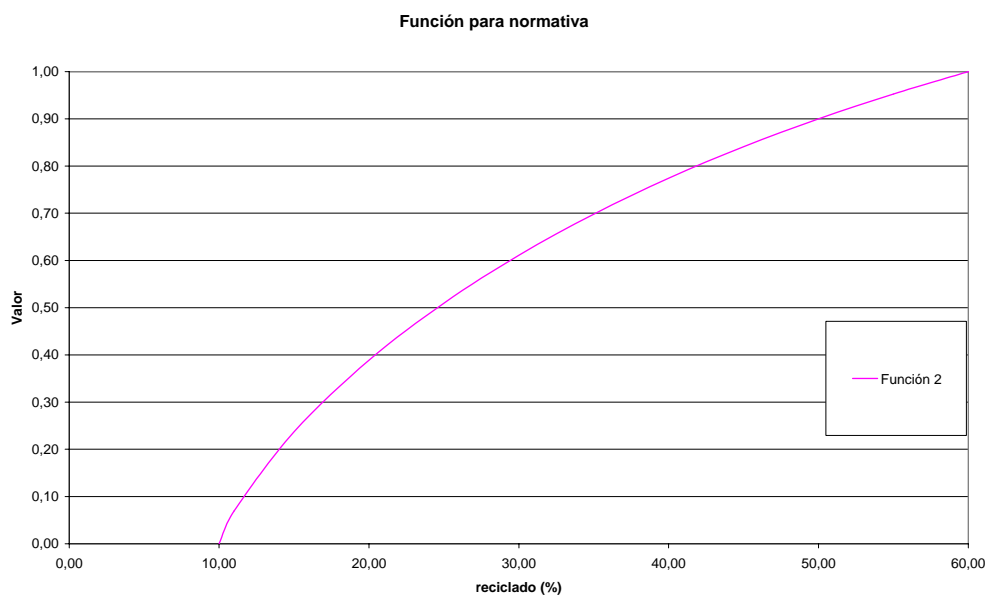


Figura 4.5. Función de valor para el indicador $I_1C_4R_1$

4.4.2.7. Coste de ejecución en ($\text{€}/\text{m}^2$) $I_1C_1R_2$

- Objetivo

Calcular el coste de materialización del edificio para cada una de sus partidas (cimentación, estructura, cerramientos, etc.).

- Respuesta de la alternativa

Con los elementos constructivos básicos del edificio, se han definido las soluciones más habituales para el caso de las edificaciones industriales. Estas soluciones tipo se encuentran recogidas económicamente en las bases de precios de la construcción, de modo que conociendo las unidades en las que se encuentran identificadas estas partidas, se puede conocer un valor aproximado del coste económico de la construcción.

Se tomaron bases de datos de distintas fuentes: ITEC (Instituto de Tecnología de la construcción de Cataluña), PREOC (Precios de Edificación y Obra Civil en España), Colegio oficial de aparejadores y arquitectos técnicos de Guadalajara 2002. A continuación se presenta la tabla 4.16. que resume los datos obtenidos para las diferentes partidas constructivas. Se debe aclarar que en algunas bases de datos no se encontraron valores de ciertas partidas económicas estudiadas.

PARTIDA ECONÓMICA		Und.	1 (€)	2 (€)	3 (€)	
Cimentación	Zapatas hormigón	m ³	100.63	-	141.02	
	Pilotes "in situ"	ml	54.39	-	64.90	
	Losa de cimentación HA 25/P/20/I	m ³	103.78	103.14	93.76	
Estructura	Metálicas (pórticos + correas)	kg	1.27	-	1.68	
	Hormigón prefabricado	Vigas	ml	102	-	101.75
		pilares	ml	80	-	65.71
	Hormigón (pilares + vigas)	M ³	61.40	-	51.66	
Cerramiento	Chapa	m ²	-	-	31.27	
	Bloque Hormigón Visto	m ²	-	-	30.47	
	Paneles de Hormigón prefabricado	m ²	-	56.67	60.46	
Cubierta	Chapa	m ²	-	12.04	16.39	
	Sandwich	m ²	-	32.83	28.53	
Pavimentos	Baldosa Hidráulica	m ²	18.41	-	20	
	Solera HM30 e=15 cm.	m ²	19.23	24.52	22.5	

Tabla 4.16. Respuesta de cada componente para el indicador $I_1C_1R_2$ en diferentes unidades

1. PREOC (Precios de Edificación y Obra Civil en España)
2. ITEC (Instituto de Tecnología de la construcción de Cataluña)
3. Colegio oficial de aparejadores y arquitectos técnicos de Guadalajara 2002

Los valores para algunas partidas no se encuentran en las mismas unidades por lo cual hay que hacer la comparación respecto a los m² del proyecto y así ver la repercusión real de cada uno de ellos. Esto se muestra en la tabla 4.17

COMPONENTES	PARTIDA ECONÓMICA	Valores estimados en €/m ² ⁽¹⁾ proyecto
Cimentación	Zapatas hormigón	12.43€/m ² -14.42€/m ²
	Pilotes "in situ"	15.8€/m ² - 13.3€/m ²
	Losa de cimentación HA 25/P/20/I	20.6€/m ² – 19.35€/m ²
Estructura	Metálicas (pórticos + correas)	174€/m ² - 128.5 €/m ² -170 €/m ² – 188.2€/m ² – 116 €/m ² – 120€/m ²
	Hormigón prefabricado	34.9€/m ² – 37.10€/m ² – 34.5 €/m ² – 38 €/m ² – 33.8€/m ² – 26 €/m ²
Cerramiento	Chapa	30 €/m ² - 46.9€/m ² – 120€/m ²
	Bloque Hormigón Visto	45.7 €/m ² – 90 €/m ²
	Paneles de Hormigón prefabricado	85 €/m ² - 90 €/m ² –108 €/m ² - 145 €/m ²
Cubierta	Chapa	12.04 €/m ² – 16.39 €/m ² - 043 €/m ²
	Sandwich	32.83 €/m ² – 28.53 €/m ² – 70 €/m ²
Pavimento	Baldosa Hidráulica	18.41 €/m ² -20 €/m ² –13.88 €/m ² – 14.07 €/m ²
	Solera HM30 e=15 cm.	19.23€/m ² - 24.52 €/m ² - 22.5€/m ² -48.5 €/m ²

Tabla 4.17. Respuesta de cada componente para el indicador I₁C₁R₂ normalizadas a los m² del proyecto

(1). Estos valores se tomaron de acuerdo a los datos promedio del mercado. En algunos casos se observa que los valores varían en extremo para un mismo componente

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción se plantean por cada componente. Dado que se obtuvieron los valores en €/m² los límites de la función se toman respecto a los valores mostrados en la tabla 4.17. Los puntos de mínima y máxima satisfacción se resumen en la tabla 4.18.

componente	Punto de mínima satisfacción (€/m ²)	Punto de máxima satisfacción (€/m ²)
Cimentación	20.6	12.4
Estructura	188	26
Cerramiento	145	30
Cubierta	80	12
Pavimentos	50	13

Tabla 4.18. Puntos de mínima y máxima satisfacción para el indicador $I_1C_1R_2$

Por otro lado para definir la pendiente se propone una función de valor descendente puesto que a menor precio, se obtiene una mayor satisfacción. Referente a la forma es posible utilizar dos funciones: o bien una función cóncava o bien, una función en forma de "s".

La primera función se propone con el fin de incentivar los bajos costes ya que a medida que se aleja del valor de máxima satisfacción el índice de valor disminuye significativamente. Es una función que es sensible a cualquier variación en el precio. Respecto a la función en forma de "s" se plantea por el contraste en precios para un mismo componente. Con esta función los valores iniciales y finales tratan de equilibrarse.

Los parámetros que se proponen para la función cóncava son: $P = 2$, $K = 0.50$. Por su parte el valor de C varía en función del componente que se este evaluando. A continuación en la figura 4.6 se muestra el gráfico para el componente estructura al que le corresponde un $C = 107$. Se tomó este componente, no obstante, se hubiese podido evaluar otro de la misma manera.

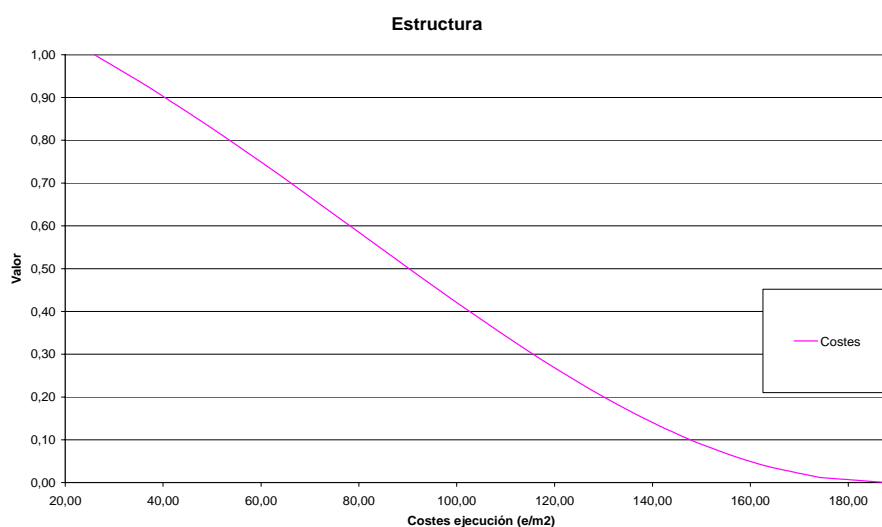


Figura 4.6. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$

4.4.2.8. Coste de mantenimiento en (€/m²) I₂C₁R₂

- Objetivo

Calcular el coste que produce el edificio durante la fase de uso

- Respuesta de la alternativa

Como existen pocos valores en el sector para calcular la respuesta de la alternativa, se recomienda cuantificarlo a partir de un porcentaje del coste total. Este porcentaje es el equivalente aproximadamente del 5% del coste total de la obra. Esto según recomendaciones de la literatura.

- Función de valor

Los puntos mínima y máxima satisfacción son función de los valores calculados para el coste total de la obra (%). La pendiente es decreciente, a menor valor mejor satisfacción ya que se incurre en un menor coste de la estructura. Respecto a la forma de la función se pueden optar por las dos tipologías expuestas en el indicador anterior, "Convexa" y en forma de "s". La razón es la misma del indicador costes de ejecución. Con la primera función se retribuye considerablemente para valores iniciales la exposición al riesgo y se penaliza con valores lejanos a este. Para la segunda función los valores son más flexibles. En los extremos hay cambio notorio de valor mientras que en el centro son valores promedios del mercado.

4.4.2.9. Valor Presente Neto (€/m²) I₁C₂R₂

- Objetivo

Calcular el valor de una inversión en tiempo presente en euros

- Respuesta de la alternativa

La respuesta de la alternativa varía en función del proyecto, por tanto para calcularlo se realiza un flujo de caja en donde se colocan los ingresos y egresos actuales y futuros a lo largo del tiempo. El objetivo es traer al presente los flujos futuros mediante la actualización de cada período a partir de una tasa de descuento. La formulación para realizar dicho cálculo es la siguiente:

$$VPN = \sum_{i=1}^n \frac{BN_i}{(1+r)^i} \quad (4.1)$$

VPN = Valor Presente Neto

r = Tasa de descuento o interés

BN_i = Beneficio Neto del año i

Si el VPN es positivo se considera rentable el proyecto y por tanto se acepta. Para hacerlo comparativo con otros se debe dividir por los m^2 . Esto es: VPN/m^2

Con este valor al dividirlo por los m^2 del proyecto se obtiene la respuesta de la alternativa.

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción dependen del proyecto que se esté evaluando. La pendiente de la función es ascendente porque cuanto más rentable es el proyecto mayor satisfacción se genera. Por otra parte, la forma que se recomienda es cóncava por que en los valores iniciales el crecimiento es menor y por tanto el valor de satisfacción asignado es menor, por el contrario a partir de cierto valor la función comienza a ascender rápidamente lo que indica que lo óptimo es alcanzar este punto de mayor rentabilidad.

4.4.2.10. Tasa Interna de Retorno (TIR) $I_2C_2R_2$

- Objetivo

Medir la rentabilidad de la inversión de una alternativa constructiva respecto a otra durante su ciclo de vida. Se mide en porcentaje.

- Respuesta de la alternativa

Al igual que el indicador del Valor Presente Neto (VPN), la respuesta de la alternativa varía en función del tipo de proyecto. Su valor se calcula haciendo que el valor presente neto sea igual a cero. Por tanto, su evaluación se realiza igualando la ecuación explicada anteriormente a cero

$$\sum_{i=1}^n \frac{BN_i}{(1 + TIR)^i} = 0 \quad (4.2)$$

La regla para realizar una inversión o no utilizando la tasa interna de retorno es la siguiente:

Cuando la tasa interna de retorno (TIR) es mayor que la tasa de interés (i), el rendimiento que se obtendría realizando la inversión es mayor que el que obtendría en la mejor inversión alternativa, por lo tanto, conviene realizar la inversión.

Si la tasa interna de retorno es menor que la tasa de interés, el proyecto debe rechazarse. Cuando la tasa interna de retorno es igual a la tasa de interés, el inversionista es indiferente entre realizar la inversión o no.

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción dependen de dos factores, por una parte de la tasa interna de rentabilidad (TIR) que se obtenga y por otra de la tasa de interés del proyecto. En la evaluación en consecuencia hay que contemplar la siguiente relación:

$$\frac{TIR}{i} > 1. \quad (4.3)$$

El punto de satisfacción mínimo es por tanto 1 que quiere decir que es indiferente realizar o no el proyecto pues no se adquiere ninguna rentabilidad. El punto de mayor satisfacción se obtuvo de datos de algunos de los proyectos, este punto máximo oscila generalmente entre 1.2 y 1.5 (relación entre las dos tasas).

Por otra parte la pendiente de la función es positiva por lo cual es ascendente, a mayor rentabilidad mayor beneficio. Se sugiere una forma convexa por que los incrementos de valor desde el comienzo deben ser significativos. La función de valor se presenta en la figura 4.7 con los siguientes parámetros: $P = 0.15$, $K = 0.6$, $C = 1$

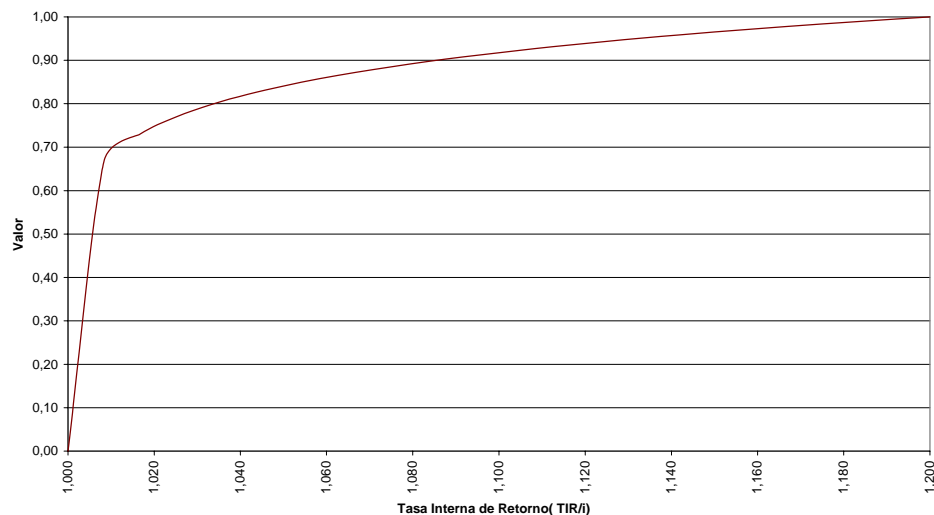


Figura 4.7. Función de valor para el indicador $I_2C_2R_2$

4.4.2.11. Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta $I_1C_1R_3$

- Objetivo

Evalúa la correcta elección del material de acuerdo a la integración con el entorno, al ambiente en el cual estará expuesto y a las sollicitaciones de carga.

- Respuesta de la alternativa

Como es un indicador cualitativo, se califica a partir del uso de un formulario con preguntas evaluadas de cero a diez y que al final se promediará para sacar un valor final. Se harán preguntas como luces (para saber que material es el más conveniente y si existe en el mercado), Temperaturas de exposición, humedad, sollicitación de carga, espacio, etc. Cada pregunta tiene un valor de 0 a 10.

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción van de 0 a 10 respectivamente. Esto se deriva de la máxima calificación que se concede a cada pregunta (10). Por otro lado es una función ascendente, el mayor beneficio se alcanza el mayor valor puntuado. Respecto a la forma de la función se recomienda una función lineal porque es un incremento gradual de satisfacción. Se presenta la función en la figura 4.8.

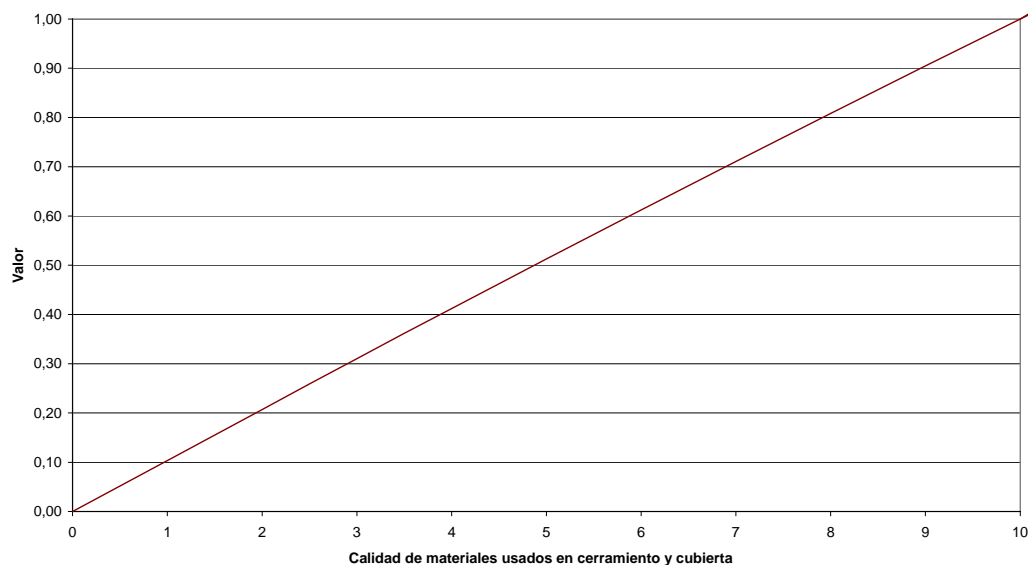


Figura 4.8. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_3$

4.4.2.12. Factor forma $I_2C_1R_3$

- Objetivo

Evaluar la simetría del edificio, la compacidad, el color, las texturas, las formas, el aprovechamiento climático.

- Respuesta de la alternativa

La respuesta de la alternativa varía en función del tipo de proyecto. Su valor se cuantifica a partir de la relación entre la superficie del edificio y su volumen. Los valores recomendados se muestran en la tabla 4.19:

Factor forma	Mínima satisfacción	Máxima satisfacción
Climas fríos	0.5	0.8
Climas cálidos	1.2	-

Tabla 4.19. Respuesta para el indicador factor de forma

- Función de valor

Los límites que se asignan a la función de valor varían respecto del clima que se esté evaluando. Para el caso de las temperaturas cálidas en el que no se tiene un límite superior se puede obtener, como bien lo plantea la metodología, a partir de las mismas alternativas. En cualquier caso el planteamiento de la función es ascendente independientemente de los valores asignados a los puntos de mínima y máxima satisfacción. Por otra parte se aconseja una función en forma de "s" ya que no existe mucha variabilidad entre un valor y otro así que la transición debe ser gradual. En la figura 4.9 se muestra la gráfica

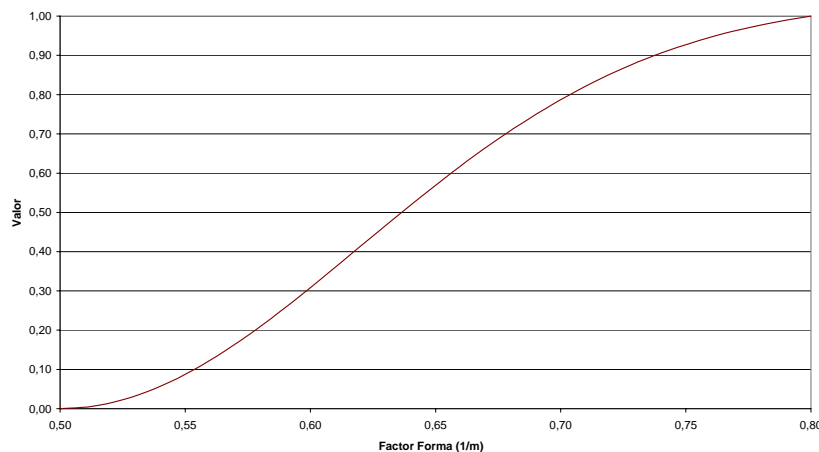


Figura 4.9. Función de valor para el indicador $I_2C_1R_3$

4.4.2.13. Grado de adaptabilidad al entorno I₁C₂R₃

- Objetivo

Medir la armonía del edificio industrial respecto al entorno que le rodea.

- Respuesta de la alternativa

La respuesta de la alternativa se cuantifica a partir de cuestionarios obtenidos de un trabajo de campo. Así como en anteriores indicadores cualitativos, se puntúa cada pregunta del cuestionario de 0 a 10 y posteriormente se hace un promedio. Se deben valorar aspectos como disposición de zonas verdes en el entorno del edificio, ocultación de zonas de aparcamiento, dimensiones del edificio respecto a las existentes, estudio cromático del edificio frente al entorno, tanto de las edificaciones existentes como a las zonas verdes.

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción van de 0 a 10 respectivamente. Esto se deriva de la máxima calificación que se concede a cada pregunta (10). Por otro lado es una función ascendente, el mayor beneficio es cuando alcanza el mayor valor puntuado. Respecto a la forma de la función se recomienda una función lineal porque es un incremento gradual de satisfacción.

4.4.2.14. Nivel de adaptación social del proyecto respecto a terceros I₁C₁R₄

- Objetivo

Evaluar el concepto de terceras personas respecto al perfil de la empresa y a la adaptación de la misma en relación al entorno ocupado.

- Respuesta de la alternativa

Se cuantifica con un cuestionario cumplimentado en campo. Se valoran aspectos concernientes a la aceptación o confianza social del proyecto como plazas de parking, contaminación visual, contaminación acústica.

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción como en los anteriores indicadores van de 0 a 10 respectivamente.

Es una función ascendente, el mayor beneficio es cuando alcanza el mayor valor puntuado. Respecto a la forma de la función se recomienda una función lineal porque es un incremento gradual de satisfacción.

4.4.2.15. Nivel de adecuación de los servicios auxiliares para el personal I₂C₁R₄

- Objetivo

Evaluar la disponibilidad de instalaciones y de espacios para la comodidad del personal a trabajar en planta.

- Respuesta de la alternativa

Se cuantifica con un cuestionario cumplimentado en campo. Se definen preguntas como disposición de comedores, número de comedores, número de vestuarios, número de aseos, existencia de servicios médicos, etc. Estas preguntas se puntúan de 0 – 10 y de acuerdo a la puntuación final se hace un promedio el cual corresponderá a un porcentaje de adecuación.

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción como en los anteriores indicadores van de 0 a 10 respectivamente. Es una función ascendente, el mayor beneficio es cuando alcanza el mayor valor puntuado. Respecto a la forma de la función se recomienda una función lineal por que es un incremento gradual de satisfacción.

4.4.2.16. Confort térmico I₁C₂R₄

- Objetivo

Medir la conformidad térmica del lugar de trabajo

- Respuesta de la alternativa

Existen unos niveles óptimos de temperatura de acuerdo al tipo de local. La evaluación consiste en saber qué tanto se alejan los valores reales de la edificación respecto a los valores óptimos de temperatura. Se puede hacer la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\text{Temperatura confort} = | \text{Temperatura óptima} - \text{Temperatura real del edificio} | \quad (4.4)$$

La temperatura óptima se obtiene de acuerdo a los valores dados en el Real Decreto 486/1997 en el cual se instituyen unas condiciones de seguridad y salud mínimas en los lugares de trabajo. Estas condiciones respecto al confort térmico se observan en la tabla 4.20.

Tipo de local	Temperatura del aire del local (°C)	Media de temperatura (°C)
Locales donde se realizan trabajos sedentarios propios de oficinas o similares	17 -27	22
locales donde se realicen trabajos ligeros.	14 – 25	19.5

Tabla 4.20. Temperaturas estimadas para confort térmico en el lugar de trabajo

Para nuestro caso se considera para la temperatura óptima, el valor medio de 22 grados cuando se evalúe la parte administrativa del edificio industrial, no obstante, si se evalúan los talleres se considera la temperatura de 19.5 grados

- Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 22 y 30 ° C respectivamente. 22° C por que es la temperatura óptima para el edificio y 30° C por que se considera que la diferencia máxima de temperatura entre el valor óptimo y el de la edificación generalmente no excede nunca los 30° C, sin embargo este límite superior puede modificarse de acuerdo a las características o a las alternativas que se consideren. Con respecto a la pendiente es una función descendente por que a medida que se aleje del valor de confort menor es la satisfacción que se genera. La forma de la curvatura es cóncava porque se penaliza notoriamente que se aleje del valor de satisfacción. En la gráfica 4.10. se muestra la función de valor considerada para este indicador.

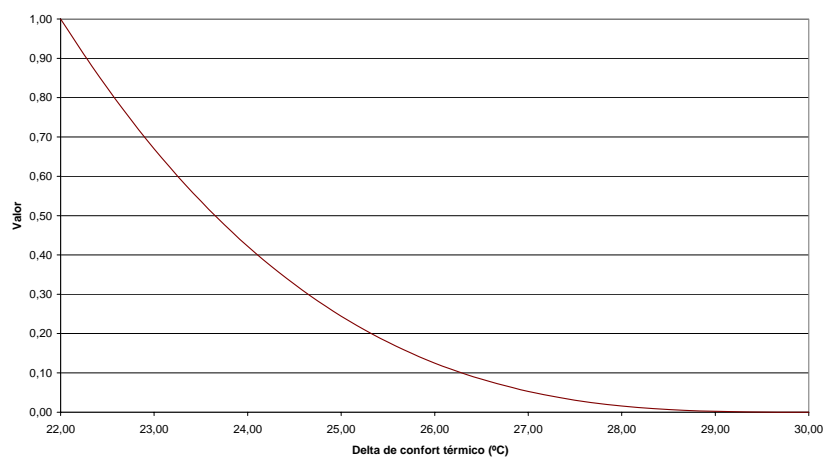


Figura 4.10. Función de valor para el indicador $I_1C_2R_4$

4.4.2.17. Confort acústico $I_2C_2R_4$

- Objetivo

Medir el confort acústico del lugar de trabajo

- Respuesta de la alternativa

Existen unos niveles mínimos de insonorización. La evaluación consiste en saber qué tanto se alejan los valores reales de la edificación a los valores óptimos admisibles. Para calcular los valores reales de la edificación existen unos recomendados para diferentes locales. Estos valores óptimos se encuentran en la tabla 4.21.

Tipos de recintos	Rango de niveles que pueden aceptarse
Talleres	60-70
Oficinas mecanizadas	50-55
Gimnasios, salas de deporte, piscinas	40-50
Restaurantes, bares y cafeterías	35-45
Despachos, bibliotecas	30-40
Cines, hospitales, iglesias, pequeñas salas de conferencias	25-35
Aulas, estudios de televisión, grandes salas de conferencias	20-30
Salas de concierto, teatros	20-25
Clínicas, recintos para audiometrías	10-20

Tabla 4.21. Valores recomendados para confort acústico en el lugar de trabajo

Para nuestro caso se consideran recintos como los talleres con un valor medio de aceptable de 65 dBA. Se utiliza la misma ecuación empelada para el confort térmico.

- Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 0 – 65 dBA respectivamente puesto que a partir de un valor mayor a 65 se inicia la insatisfacción. Respecto a la pendiente es una función descendiente por que a medida que se aleja del valor de confort menor es la satisfacción que se genera.

La forma de la curvatura es cóncava por que se penaliza notoriamente que se aleje del punto óptimo. La gráfica corresponde a la misma que la utilizada en el indicador confort térmico.

4.4.2.18. Confort lumínico I₃C₂R₄

- Objetivo

Medir el grado de confort lumínico del ambiente interior del edificio.

- Respuesta de la alternativa

Existen unos niveles óptimos de iluminación de acuerdo a la zona o parte del lugar de trabajo. La evaluación consiste en saber los valores que tiene la edificación respecto a los valores dados en el Real Decreto 486/1997 en el cual se establecen unas condiciones de seguridad y salud mínimas en los lugares de trabajo. Estas condiciones respecto al confort lumínico se observan en la tabla 4.22.

Zona o parte del lugar de trabajo (*)	Nivel mínimo de iluminación (lux)
Zonas donde se ejecuten tareas con:	
1.º Bajas exigencias visuales	100
2.º Exigencias visuales moderadas	200
3.º Exigencias visuales altas	500
4.º Exigencias visuales muy altas	1.000
Áreas o locales de uso ocasional	50
Áreas o locales de uso habitual	100
Vías de circulación de uso ocasional	25
Vías de circulación de uso habitual	50
(*) El nivel de iluminación de una zona en la que se ejecute una tarea se medirá a la altura donde ésta se realice; en el caso de zonas de uso general a 85 cm del suelo y en el de las vías de circulación a nivel del suelo	

Tabla 4.22. Valores recomendados para confort lumínico en el lugar de trabajo

A partir de estos valores se pueden establecer unos rangos mínimos de iluminación de acuerdo al lugar de trabajo.

- Función de valor

Para establecer el valor de satisfacción mínimo de la función, se toma la referencia expuesta en la tabla 4.22 para exigencias visuales altas, es decir 500 Luxes. A partir de allí, existe un beneficio por lo que el valor de máxima satisfacción se fija a partir de las alternativas ó con referencia al siguiente nivel de exigencia que para este caso es de 1000 Luxes. La pendiente de la función es positiva y por consiguiente ascendente. Se fija esta ascendencia ya que se

genera mayor beneficio porque se tiene un espacio mejor iluminado. La forma de la respectiva función es cóncava porque se recompensa significativamente que se cumpla lo mínimo respecto a la disposición existente.

4.4.2.19. Grado de simplicidad del proceso constructivo $I_1C_1R_5$

- Objetivo

Evaluar la facilidad del proceso constructivo en cuanto a dimensiones, materiales y soluciones constructivas a usar.

- Respuesta de la alternativa

Se define un cuestionario con preguntas relacionadas con las dimensiones del edificio, número de alturas, tipo de pórticos, separación, materiales usados, medios de unión, tipo de cimentación. Con esta información se califica cada pregunta de uno a diez, por ejemplo, entre más altura tenga el edificio la calificación será más baja puesto que la dificultad se incrementa. Al final se hace un promedio de todas las preguntas y ese será el valor final del indicador.

- Función de valor

Los puntos de mínima y máxima satisfacción van de 0 a 10 respectivamente lo cual se deriva de la máxima calificación que se concede a cada pregunta (10). Por otro lado es una función ascendente, el mayor beneficio es cuando alcanza el mayor valor puntuado. Respecto a la forma de la función se recomienda una función lineal por que es un incremento gradual de satisfacción. Las figuras 4.8 representa este mismo tipo de indicador.

4.4.2.20. Grado de adecuación respecto al proceso productivo $I_1C_2R_5$

- Objetivo

Evaluar los medios y métodos que facilitan el proceso de producción

- Respuesta de la alternativa

Se define un cuestionario con preguntas relacionadas con los productos a fabricar, las cantidades, los equipos, la maquinaria, la herramienta que sean precisos para desarrollar el proceso, la utilización y disposición de los medios, por ejemplo saber los mecanismos que se emplearán para trasladar el material (puentes grúa). Dichas preguntas se puntúan 0 - 10 y al final se obtiene un promedio de las puntuaciones siendo esta la valoración final.

- Función de valor

Se asigna la misma función que el indicador anterior "grado de simplicidad del proceso constructivo". Esta función de valor se asigna a indicadores generalmente de tipo cualitativo.

4.4.2.21. Facilidad de enlace con el exterior I₂C₂R₅

- Objetivo

Evaluar el diseño del edificio respecto a la facilidad de acceso y movimiento del mismo respecto al exterior.

- Respuesta de la alternativa

A partir de un cuestionario con preguntas relacionadas con las dimensiones de las vías, la intensidad del tráfico, las características del terreno, las pendientes, los radios de encuentro, anchos de calzada, la optimización de las operaciones logísticas, señalización del tráfico, etc. se califica y obtiene la respuesta de cada alternativa.

- Función de valor

Se asigna una función de tipo cualitativo en la que los puntos de mínima y máxima satisfacción corresponden a 0 y 10 respectivamente cuya pendiente es ascendente. La forma de la función es lineal porque se trata de un incremento gradual de satisfacción.

4.4.2.22. Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio I₁C₃R₅

- Objetivo

Evaluar la flexibilidad y facilidad del diseño respecto al desmontaje de los elementos frente a cambios.

- Respuesta de la alternativa

Para evaluar la respuesta de la alternativa se cuantifica el número de elementos constructivos que presentan mecanismos de desmontaje fácil respecto a sus elementos de fijación (uniones fijas, soldaduras, grapas, etc.). Estos elementos se pueden encontrar en vigas, instalaciones, cerramientos, cubiertas, particiones. Posteriormente, se cuantifican las cantidades totales de los elementos evaluados y se obtiene el porcentaje de desmontaje del edificio. A continuación se definen sus pasos:

- Cuantificar los elementos totales desmontables (ETD) (paneles de chapas, vigas metálicas, cerchas, etc.).
- Cuantificar cada elemento unitario que pueda ser desmontable (EUD)
- Dividir cada elemento unitario desmontable (EUD) sobre el número de elementos totales desmontables (ETD).

$$\% \text{ elementos fácilmente desmontables} = \text{EUD/ETD}$$

- Función de valor

Los límites de la función de valor se determinan de las tablas expuestas por (Garrucho, 2006) en la que resume los siguientes valores

Indicador	Valores de referencia		
	Mínimo	Medio	Alto
Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio.	Elementos constructivos que presentan mecanismos de desmontaje con dificultad. (0- 5%)	Elementos constructivos que presentan mecanismos de desmontaje de nivel medio de dificultad . (5 -10 %)	Elementos constructivos que presentan mecanismos de desmontaje fácil. (10 -15 %)

Tabla 4.23. Valores referencia para determinar la facilidad de desmontaje de elementos Constructivos del edificio.

Por lo tanto, para la función se establece como valores de mínima y máxima satisfacción el 0 a 15% respectivamente. En relación a la pendiente es una función con pendiente positiva (ascendencia de la función), a mayor facilidad de desmontaje mayor satisfacción y más sostenible es la estructura.

Por otra parte la forma que se recomienda es una función cóncava, entre más cerca esté del punto de máxima posibilidad de desmontaje la aportación es mucho más satisfactoria por lo que el valor aumenta significativamente, por el contrario, en los valores cercanos a cero, el valor no crece rápidamente penalizando que el indicador no tenga ningún elemento fácilmente desmontable. Los parámetros que se especificaron para la función son: $P = 1.5$, $K = 0.10$ y $C = 15$. Esto se visualiza en la figura 4.11.

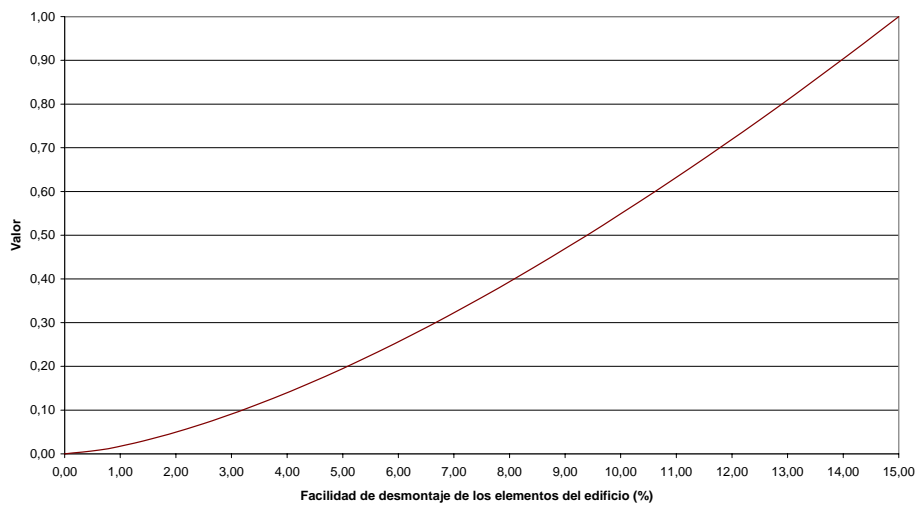


Figura 4.11. Función de valor para el indicador $I_1C_3R_5$

4.4.2.23. Facilidad de ampliación respecto al edificio y al terreno $I_2C_3R_5$

- Objetivo

Evaluar la simplicidad de ampliación del edificio respecto al terreno y al edificio para futuros cambios.

- Respuesta de la alternativa

Para evaluar la respuesta de la alternativa respecto a este indicador cualitativo, se elabora un cuestionario con preguntas que relacionen: forma del terreno, m^2 para posible ampliación, disponibilidad de instalaciones estándar y flexibles, disponibilidad de estructuras adecuadas para la ampliación, dimensionamiento adecuado, etc. Cada pregunta se califica de 0 a 10. Posteriormente se promedia y se obtiene un valor final para el indicador.

- Función de valor

Se asigna una función de tipo cualitativo en la que los puntos de mínima y máxima satisfacción corresponden a 0 y 10 respectivamente cuya pendiente es ascendente. La forma de la función es lineal porque se trata de un incremento gradual de satisfacción.

CAPÍTULO 5

MARCO INFORMÁTICO AMIGABLE DE EVALUACIÓN

5.1. INTRODUCCIÓN

La edificación industrial a través de su ciclo de vida no solamente se enfrenta a la generación de impactos a nivel ambiental, sino a impactos a nivel social, estético, funcional, económico, de salud y seguridad. Reducir dichos impactos implica hacer un uso adecuado de materiales y productos, de buenas prácticas ambientales, de crear diseños y construcciones funcionales, inteligentes, económicas. Diseños que tengan en cuenta una armonía con el entorno y con la sociedad. No obstante, satisfacer dichos criterios involucra el hacer un balance atractivo entre los mismos e identificar dicho balance no es una tarea fácil .

Si bien, gracias a las crecientes transformaciones, se han desarrollado procesos de toma de decisión que han ayudado a estructurar y evaluar metodologías para seleccionar construcciones. Por su parte, estos procesos, se han enfocado a la creación de distintas herramientas cuya visión no es otra que la de la sostenibilidad. Estas herramientas se han estructurado de tal manera que algunas de ellas pueden ser herramientas de comparación o fuente de información de productos (nivel 1), pueden ser herramientas de diseño o de soporte de decisión (nivel 2), o bien, ser aquellas que evalúan por completo la edificación (nivel 3) (Trusty 2001).

Estas herramientas han sido definidas desde distintas perspectivas y de acuerdo a las necesidades del país de origen. Cada una de ellas lleva implícita una metodología de trabajo, que es aplicable a diferentes escenarios y niveles de jerarquía. Algunas funcionan bajo un contexto matemático, lo que facilita la evaluación de las alternativas.

Ahora bien, las categorías asociadas con dichas herramientas a pesar de que han ido evolucionando, algunas de ellas han centrado su atención al entorno ambiental operativo de la edificación dificultando por completo no solo el análisis a través del Ciclo de vida sino el análisis de las mismas. De allí se deduce, que gran parte de las herramientas presenten la dificultad de establecer los componentes adecuados para globalizar y encaminar de manera certera los criterios y categorías antes mencionadas (Finch 1992).

De acuerdo a las pautas que siguen estas herramientas y a la base conceptual que se definió para el proyecto MIVES expuesta en capítulo 3, el objetivo de este capítulo es presentar el marco informático amigable desarrollado para la evaluación. Para ello se propone una nueva herramienta informática que incorpore durante su evaluación algunos aspectos que a la fecha no han sido tenidos en cuenta, estos aspectos hacen referencia al tipo de edificación "edificación industrial", a la evaluación global y parcial en las etapas del ciclo de vida, a la evaluación de categorías distintas a la ambiental, y a la función que contempla el análisis de riesgo e incertidumbre.

Adicionalmente se propone clarificar paso a paso el mejor procedimiento para usar la herramienta y de esta manera hacer un uso adecuado de ella.

5.2. GENERALIDADES

La herramienta **MIVES** se desarrolla para ser capaz de evaluar de manera integrada la mejor alternativa sostenible dentro del entorno de la edificación industrial. La herramienta a partir de la definición de conceptos como tres ejes, función de valor, parámetros de respuesta de las alternativas y ponderaciones (conceptos explicados durante el capítulo 3), selecciona la mejor de una ramificación de posibilidades o alternativas.

El MIVES como se enfoca en el diseño de las edificaciones, permite a los usuarios reflejar sus preferencias, prioridades, tecnologías, tradiciones en la construcción, características particulares de la edificación e incluso, valores culturales existentes en diversas regiones o países.

Su entorno informático se desarrolla bajo la plataforma de trabajo de Visual Basic. Se eligió este mecanismo de programación por ser un entorno amigable a nivel de usuario y de programación, por ser económico y porque facilita al usuario la labor en el momento de realizar la evaluación y selección de la mejor alternativa.

La herramienta se divide en cinco secciones más una pantalla de presentación. La primera sección se titula "**datos de entrada**". En ella se alberga información como localización, tipo de industria, m² de construcción, etc. Se establecen unos valores contexto sobre los cuales se va a evaluar la edificación. Se debe aclarar, que los edificios proyectados deben contener información suficiente y disponible para poder realizar la cuantificación de su valor sostenible.

La segunda sección la constituye "**la definición del alcance**". En esta sección se define los planos de requerimientos, los componentes, y la etapa o etapas del ciclo de vida que se quieran desarrollar. Al definir el alcance se constituye el núcleo de la herramienta pues es a partir de esta sección que se estructuran y fijan los objetivos finales.

Una vez definido el alcance la tercera sección se denomina "**definición del árbol de requerimientos**". Este árbol se deriva del plano de requerimientos que se ha fijado en la sección dos. Aquí se establecen los criterios e indicadores que corresponden a ramas inferiores del árbol de requerimientos.

La cuarta sección corresponde a la "**evaluación**" cuyo objetivo es cuantificar cada una de las alternativas. Esta cuantificación se realiza a través de las funciones de valor, las ponderaciones, la asignación de escalas de evaluación y valores de referencia.

Para terminar la quinta sección hace referencia a los "**resultados**" propiamente dichos. Estos resultados se obtienen a partir del cálculo de un óptimo y se corroboran mediante un análisis de sensibilidad.

Los datos introducidos en las diferentes hojas de trabajo han sido codificados por colores para identificar lo que el usuario debe completar y aquello que no puede alterar:

Blanco : El usuario introduce valores numéricos

Gris : Son celdas que se encuentran predefinidas o que no procede llenar. Constituyen valores que han sido predeterminados desde la base de datos (valores referencia). Los usuarios no deben hacer ninguna alternación.

La herramienta con el fin de conducir y guiar al usuario, incluye un **mapa de ubicación** que se encuentra en la parte izquierda de la pantalla y se visualiza a lo largo de todo el proceso. En este mapa se resumen datos del proyecto así como el despliegue de los diferentes ejes (requerimientos, componentes, ciclo de vida).

5.3. ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA

5.3.1. Pantalla de presentación

Inicialmente el programa comienza con una pantalla de presentación en la cual se solicita información acerca del objetivo del programa, información sobre los individuos y las instituciones envueltas en el desarrollo del MIVES tal y como se muestra en la figura 5.1. En esta pantalla no se carga ningún tipo de información

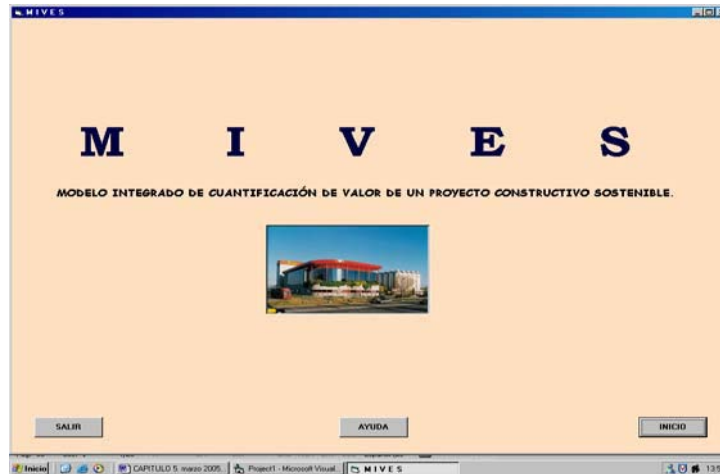


Figura 5.1. Pantalla de presentación del programa

5.3.2. SECCION 1: Datos de entrada

Esta herramienta al igual que otras encaminadas al proceso de evaluación, requiere que se reúna una cantidad considerable de información sobre el edificio y el contexto en el cual se asienta para facilitar la valoración por parte del usuario.

En esta sección, se proporciona una breve visión de la información básica sobre el nombre del edificio, la ubicación, el tipo de industria dentro de las cuales se incluye la industria pesada, el sector químico, alimenticio, automotriz, textil y naves de logística.

Las características enunciadas proporcionan un mejor entendimiento de asuntos de importancia local y características concernientes a la edificación como tal. A continuación se hace una breve descripción de dichas características:

- Información sobre el proyecto: Es una característica que define las particularidades de cada tipo de proyecto. Dentro de estas características se encuentra el nombre del proyecto, la fecha de elaboración, el número de versiones, la localización y el tipo de industria.

Estas características se introducen en una pantalla que se titula "información sobre el proyecto" tal como se muestra en la figura 5.2.

Figura 5.2. Datos bases sobre la información del proyecto

- Ubicación geográfica: En ella se selecciona la comunidad Española en donde se encuentra la edificación que se desea evaluar. Es importante tener en cuenta que los patrones que se han predefinido desde un comienzo varían de acuerdo a la ubicación geográfica y de acuerdo a las legislaciones establecidas. No es lo mismo evaluar una edificación en el entorno del país Vasco que en el entorno catalán, por lo cual la puntuación que se otorgue a alguno de los indicadores, criterios o requerimientos puede variar considerablemente. Esta opción aparece también en la pantalla titulada "*información sobre el proyecto*" y se elige con el botón localización como se observa en la figura 5.3.
- Tipo de industria: Las características introducidas en la herramienta desde un comienzo no solo dependen de la ubicación geográfica sino del tipo de industria. Por ejemplo la contaminación que puede producir una industria alimenticia durante su uso es diferente a la que produce una automotriz. De allí que haya diferencias claramente marcadas. Los datos concernientes al tipo de industria también se definen en la pantalla denominada "*información sobre el proyecto*". No es posible evaluar simultáneamente todos los tipos de industria que se visualizan. Su proceso se realiza uno a uno (ver figura 5.3)

Figura 5.3. Características sobre la localización y el tipo de industria

Se debe aclarar que para cada proyecto en particular se necesita este tipo de información. Adicionalmente se pretende introducir los metros cuadrados de construcción y las áreas que constituyen la edificación como tal. La idea de esto es obtener una medida del valor sostenible a nivel global.

5.3.3. SECCION 2: Definición del alcance

Luego de los correspondientes datos de entrada, vienen a dar lugar las pantallas que definen el alcance. Aquí se describen los objetivos básicos que delimitan la herramienta bajo tres parámetros éstos son:

- Componentes: Definen los elementos que estructuran la edificación industrial. Los elementos que se definen para la edificación industrial son 6: distribución en planta, cimentación, estructura y forjado, fachada, cubierta y pavimentos. Cada uno de estos componentes se subdividen a su vez en subcomponentes. Estos subcomponentes se muestran al pulsar en cada uno de los botones que constituyen los componentes como se observa en la figura 5.4. Con la definición previa de la alternativa a evaluar y con la asociación de los componentes correspondientes a cada alternativa se constituye la toma de decisión final.

Para la herramienta, la pantalla correspondiente se denomina *“componente a elegir”*. Allí se visualizan los 6 componentes y los respectivos subcomponentes según sea la opción que se haya elegido. El usuario tiene la posibilidad de seleccionar uno a uno el

componente que quiera evaluar o por el contrario elegirlos todos de tal manera que cada vez que vaya a evaluar alguno de ellos no tenga por que repetir el procedimiento. Este proceso se elige con el botón denominado “Por componentes” o “todos los componentes” respectivamente.

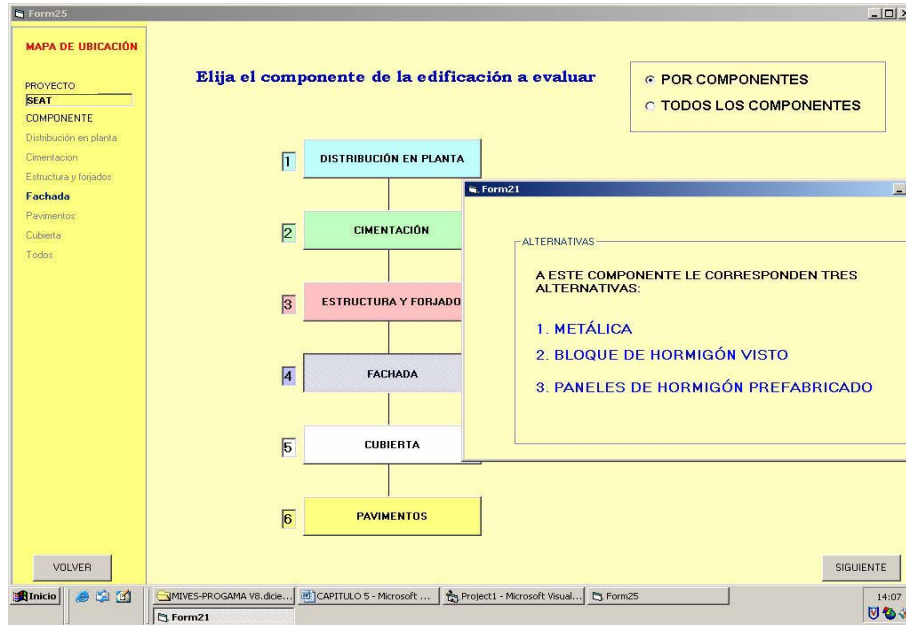


Figura 5.4. Elección de componentes

- Ciclo de vida: Es el segundo de los ejes que define el alcance de la herramienta. Al igual que para el eje de componentes se puede seleccionar una a una las etapas o bien todas en conjunto como se muestra en la parte derecha de la pantalla de la figura 5.5. Otra manera de hacerlo es pulsando dentro del diagrama del ciclo de vida la etapa deseada.

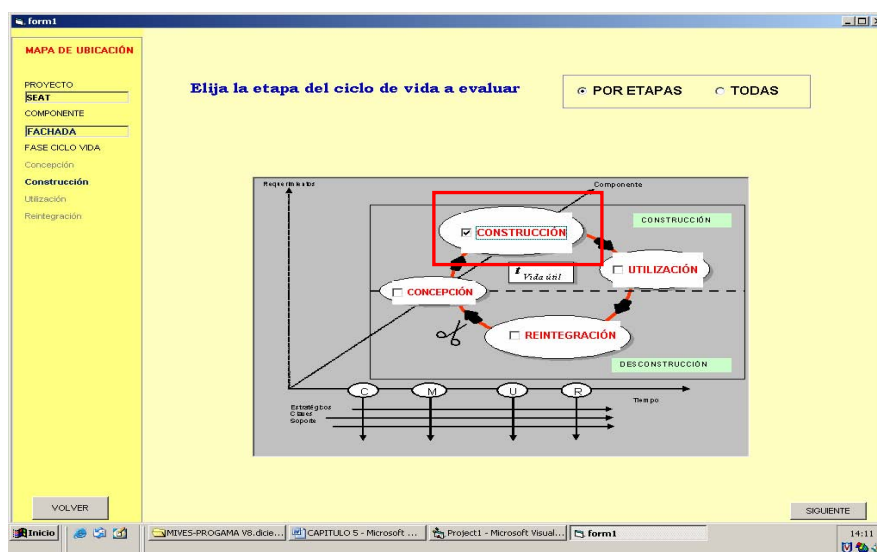


Figura 5.5. Elección del diagrama del ciclo de vida

- Planos de requerimientos: Con la especificación de este eje, se culmina la definición del alcance. A partir de la pantalla que define el plano de requerimientos se inicia la tercera sección de la herramienta que corresponde a la definición del árbol de requerimientos. Los planos de requerimientos que se contemplan en esta herramienta son: ambiental, costes, seguridad, estético, social y funcional. A continuación se muestra en la figura 5.6. la pantalla que visualiza cada uno de los planos.



Figura 5.6. Definición del plano de requerimientos

5.3.4. SECCIÓN 3: Definición del árbol de requerimientos

Una vez definido el contexto y el alcance del proyecto se entra a definir el árbol de requerimientos. Este se estructura jerárquicamente en tres o cuatro niveles con la categoría más alta derivada de la suma de pesos ponderados de los niveles más bajos empezando escalonadamente desde el nivel de jerarquía superior (requerimientos) hasta llegar al nivel inferior (indicadores). Estos niveles o categorías de jerarquía son:

- Requerimientos
- Criterios
- Subcriterios (opcional)
- Indicadores

Una vez definidos estos niveles, es necesario evaluar cada uno de ellos mediante tres etapas sucesivas. Con la ejecución de estas tres fases se llega a la parte cuantificable de la herramienta (sección 4: evaluación). Las tres etapas que se mencionan son:

- Selección del nivel a evaluar (requerimientos, criterios o indicadores).
- Ponderación a nivel de requerimientos, criterios e indicadores.
- Valor integrado a nivel de requerimientos, criterios e indicadores.

Para esta sección se desarrolla la primera etapa correspondiente a la selección y despliegue de todo el árbol de requerimientos hasta el nivel de indicadores. Las fases restantes se desarrollaran en la sección "evaluación".

Ahora bien, para iniciar el desarrollo del árbol de requerimientos, se parte del nivel superior que corresponde a los requerimientos como se muestra en la figura 5.6. Este nivel se divide en seis (6) planos que describen y definen las características primordiales del edificio sostenible. En este nivel se selecciona cada plano puesto que a cada uno de ellos le corresponde un árbol de requerimientos y por consiguiente una evaluación.

La herramienta por su parte, va guiando al usuario hacia el nivel que debe evaluar. Si se presiona en un plano cualquiera, la herramienta muestra al usuario los criterios que le pertenecen como se observa en la figura 5.7. Los criterios se encargan de agrupar aspectos medibles desde el nivel inferior (indicadores) y proyectarlos hasta el nivel superior (requerimientos).

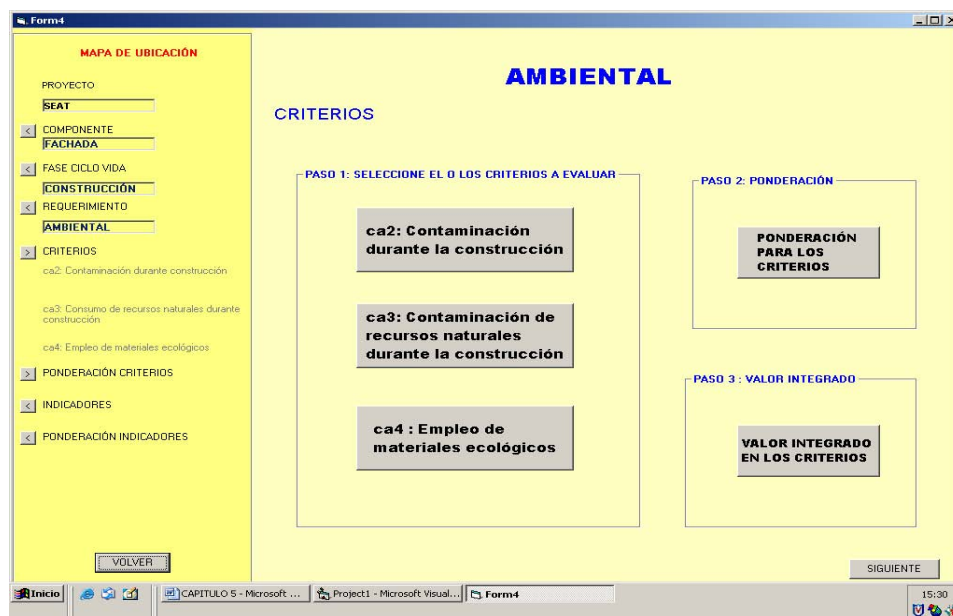


Figura 5.7. Definición de criterios

Una vez seleccionados los criterios se pasan a elegir los indicadores que conforman los medios más directos de evaluación y valoración. Esta elección se realiza de la misma manera que en los niveles precedentes, es decir, se pulsa en algún criterio y automáticamente la herramienta lleva al usuario al nivel de los indicadores como se muestra en la figura 5.8.



Figura 5.8. Definición de indicadores

Al contrario de los criterios y sub-criterios que son genéricos y de amplia aplicación, los indicadores muestran una mayor especificidad en el tratamiento cuantitativo. La valoración y evaluación se efectúa con los parámetros definidos por los indicadores.

5.3.5. SECCION 4: Evaluación

Esta sección como su nombre lo indica, tiene por objeto cuantificar las distintas alternativas para posteriormente con los resultados obtenidos seleccionar la mejor de ellas. Esta evaluación incluye el establecimiento de una base de datos para luego con esta información, cuantificar y evaluar las alternativas sostenibles como lo muestra la figura 5.9.

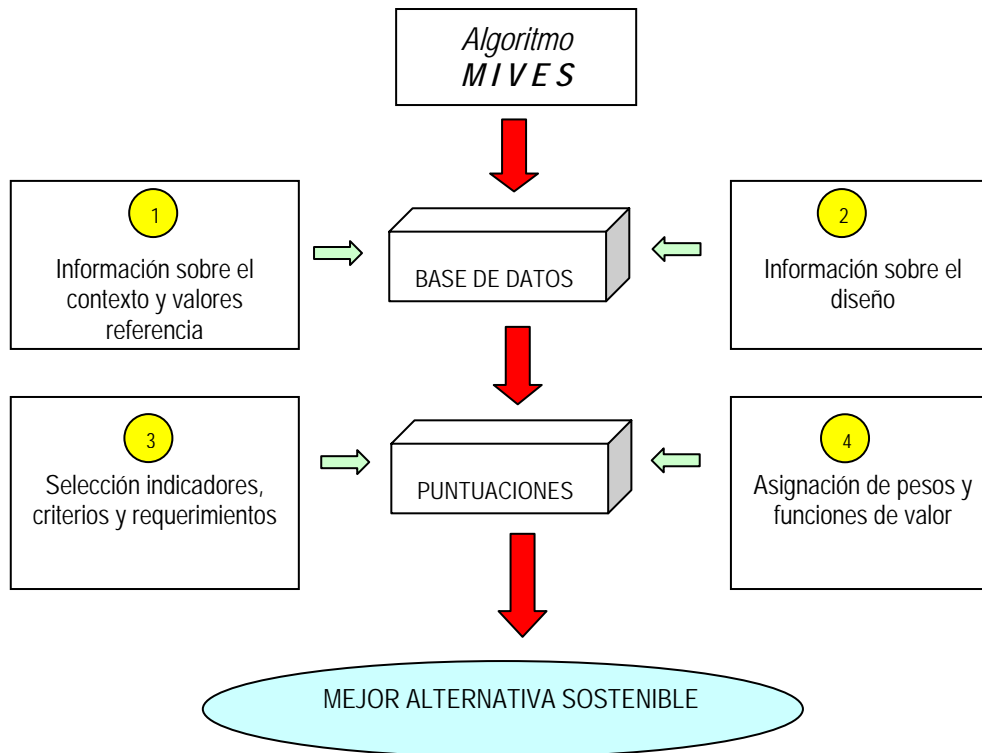


Figura 5.9. Diagrama de los componentes claves de la evaluación

5.3.5.1. Evaluación a nivel de indicadores

La sección denominada evaluación, se inicia con la valoración de los indicadores. El procedimiento para cuantificar este nivel sigue tres fases:

- Calificación de la alternativa en base al cálculo de los parámetros de respuesta de la misma y a la construcción de la función de valor del indicador.
- Ponderación a nivel de indicadores.
- Valor integrado a nivel de indicadores

Calificación de la alternativa para un indicador específico

Para iniciar con esta fase, el programa sitúa al usuario en una pantalla denominada “valoración de las alternativas” como se puede observar en la figura 5.10. Esta pantalla resulta de la selección de alguno de los indicadores desplegados en el árbol de requerimientos.

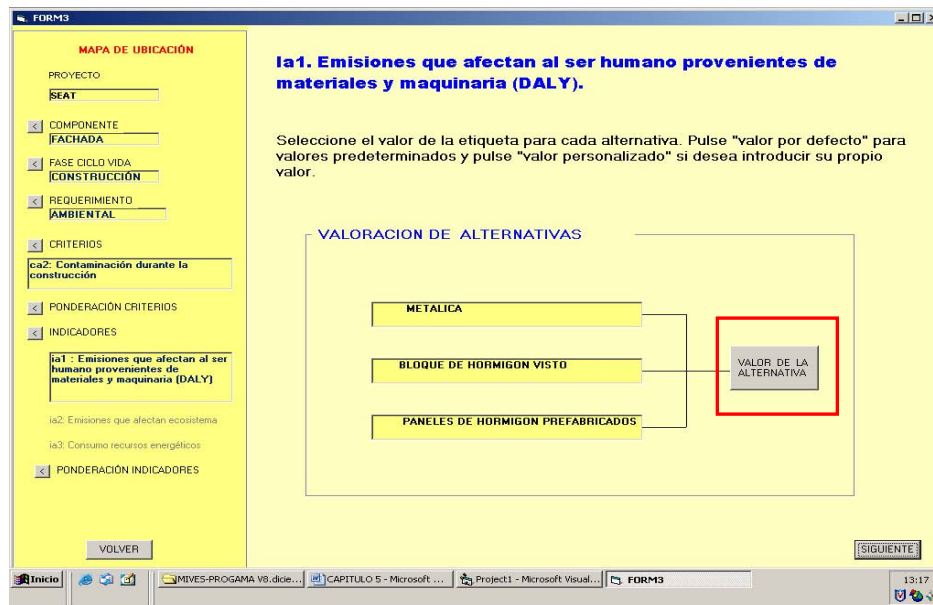


Figura 5.10. Valoración de las alternativas

Para iniciar el proceso, el usuario debe pulsar el botón denominado “valor de la alternativa” y consecutivamente, la herramienta lo lleva a desarrollar los dos pasos que constituyen dicha calificación.

- Cálculo de los parámetros de respuesta de la alternativa para un indicador

El cálculo de los parámetros de respuesta de la alternativa consiste en la elección de un rango de valores de funcionamiento propio de cada alternativa por cada indicador. La respuesta incluye valores por defecto o personalizados como lo muestra la figura 5.11. Los valores por defecto son valores dados por el programa y que fueron especificados mediante una base de datos. Como ventaja el usuario tiene unos valores guía en caso de que no tenga el conocimiento previo de dichos datos. Por el contrario los valores personalizados son valores que tiene que asignar el usuario de acuerdo a sus criterios.

Los valores tanto por defecto como los personalizados dependen del tipo de industria de la cual se quiera hacer la evaluación, de la ubicación geográfica y de las características de la edificación. De allí la importancia de seleccionar el contexto sobre el cual se evalúa la edificación.

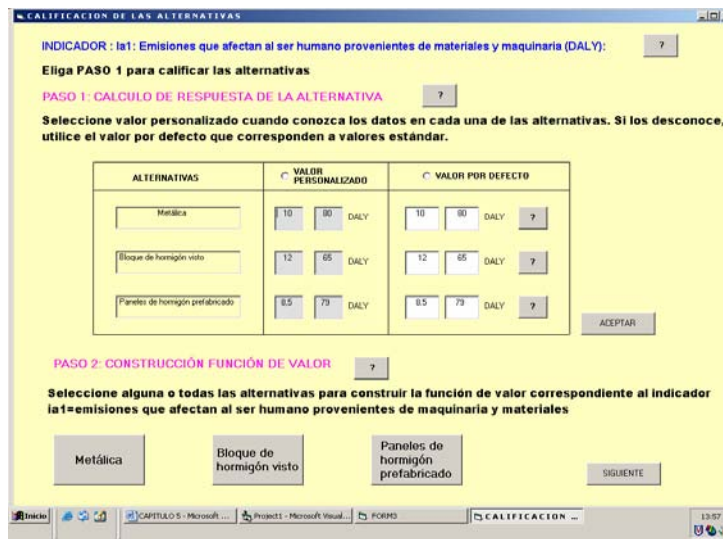


Figura 5.11. Pasos de la valoración de las alternativas

Cuando el usuario selecciona valor por defecto, aparece un aviso en la que advierte que los valores que se otorgan son los que aparecen en la parte derecha de la tabla. Si por el contrario presiona valor personalizado sale un aviso en el que pide que introduzca el valor que crea conveniente de acuerdo a las características de su edificación y del contexto en el cual se esta desarrollando.

En esta misma pantalla se muestran tres botones de ayuda visualizados a partir del signo interrogación (?). El primer botón, hace una descripción de las características propias del indicador que se esta evaluando como se muestra en la figura 5.12. El segundo representa una breve descripción sobre la ecuación utilizada para calcular los valores de funcionamiento de las alternativas. El tercer botón describe las características de la función de valor, detalla cada uno de sus parámetros entre otros aspectos.

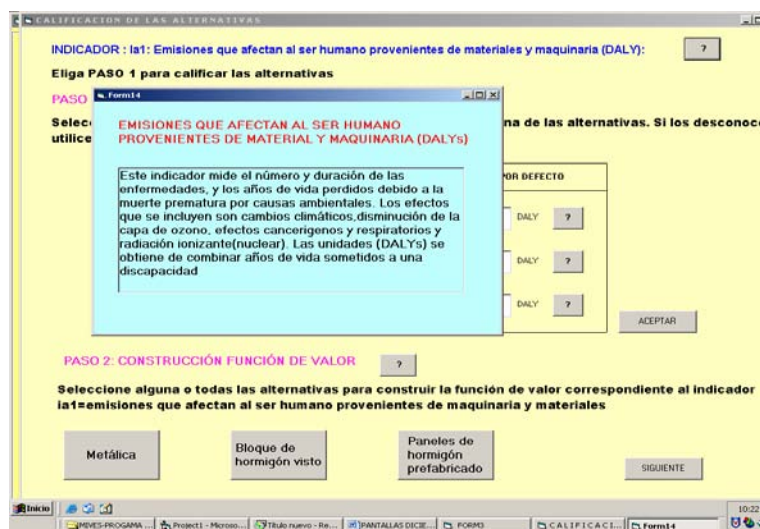


Figura 5.12. Los botones de ayuda

Una vez el usuario ha concluido el paso 1 de la calificación de las alternativas, depende de él si continua con el paso 2. Esto es, si el usuario ha elegido un valor por defecto, el programa automáticamente lo lleva a evaluar otro indicador (si hay otro por evaluar) u otro criterio según corresponda. Si por otra parte el usuario selecciona un valor personalizado y después de haber cumplimentado cada una de las casillas, se pasa a construir la función de valor para el indicador correspondiente.

En la figura 5.13 se muestra la pantalla titulada *“Construcción de la función de valor”* en la que aparecen los parámetros que constituyen dicha ecuación: X_{\min} , X_{\max} , P_i , C_i , K_i . La elección de estos parámetros se sintetiza a partir de unas tablas que se muestran pulsando el botón *“Tablas de valores para elegir los parámetros P_i , C_i , y K_i ”* que aparece en la misma pantalla. Después de seleccionados estos parámetros, todos y cada uno de los espacios deben ser cumplimentados o de lo contrario el programa arroja un aviso de error. Esta selección de parámetros se detalla en el apartado que sigue a continuación.

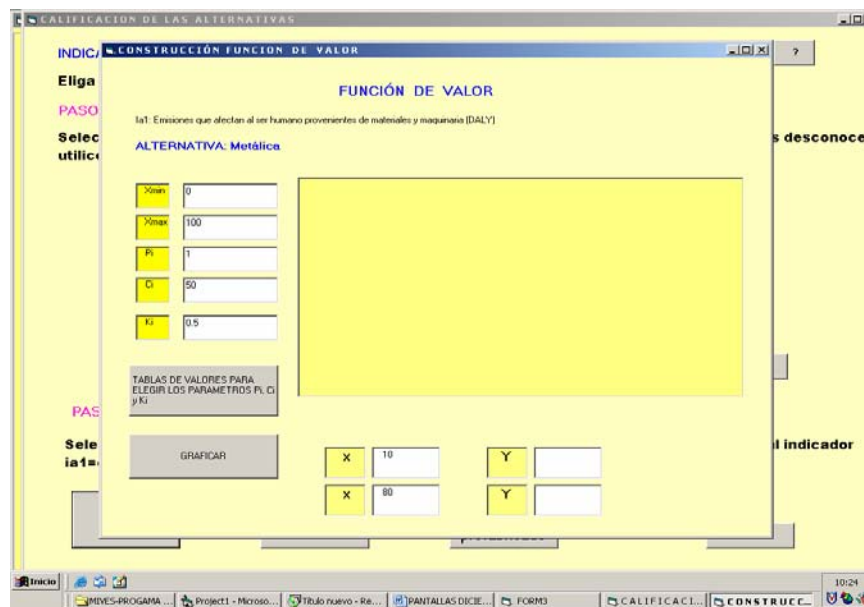


Figura 5.13. Construcción función de valor

- Construcción de la función de valor

En el paso previo, se ha establecido un rango de valores de funcionamiento en cada indicador para cada una de las alternativas (eje abscisas). Esta elección se ha hecho mediante la selección de los valores por defecto o mediante los valores personalizados. A cada uno de estos valores le corresponde un valor en el eje de las ordenadas que básicamente es la traducción de las mismas unidades a una escala de valor. Esta escala de valor fluctúa entre 0 y 1 (escala de satisfacción).

Los valores en el eje de las ordenadas dependen del tipo de función que el usuario selecciona y de los parámetros que se le introduzcan a la misma. Esta selección se hace con ayuda del botón denominado "*Tablas de valores para elegir los parámetros P, C, y K*".

Respecto a la tabla que se observa en la figura 5.14, ésta muestra que para un C determinado, le pertenecen unos valores específicos a K y a P. Adicionalmente se observa que la función puede tomar distintas tipologías de acuerdo a estos mismos parámetros que desde el comienzo han sido establecidos. Las tipologías básicas son: cóncava, convexa, lineal y en forma de "S".

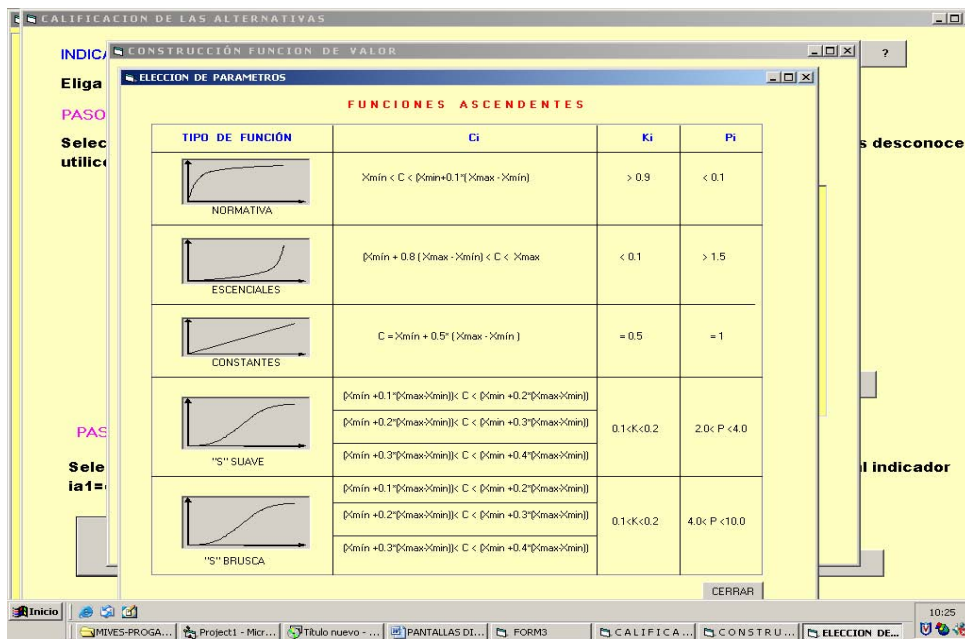


Figura 5.14. Elección de los parámetros de la función de valor.

Una vez el usuario ha introducido los parámetros correspondientes, debe pulsar el botón "*graficar*" en la pantalla denominada construcción de la función de valor. Inmediatamente la herramienta dibuja en la misma pantalla, las preferencias del usuario en base a los datos introducidos. Adicionalmente, en el sector inferior, aparecen los valores de las ordenadas que corresponden a cada uno de los valores de funcionamiento de las alternativas. Esto se observa claramente en la figura 5.15.

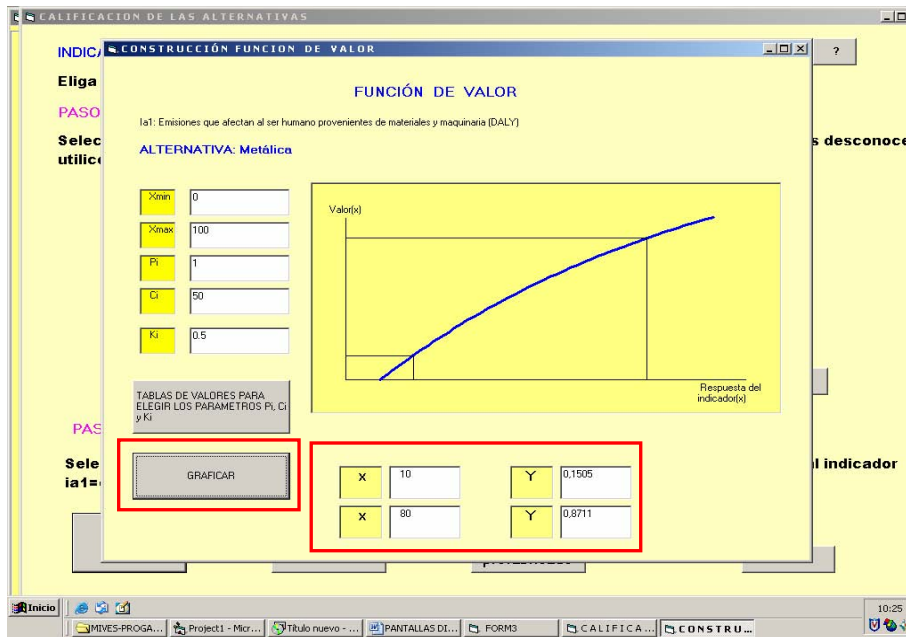


Figura 5.15. Asignación de valor para una alternativa específica

Una vez obtenidos los valores de satisfacción de todas las alternativas respecto a un indicador, el programa vuelve a retomar la pantalla a nivel de indicadores. De nuevo el usuario o bien puede seguir evaluando los indicadores que considere convenientes o bien, pasa a la segunda fase de esta evaluación denominada **“ponderación”**

Ponderación a nivel de indicadores

Después de calificar cada alternativa en el indicador correspondiente, el programa vuelve a retomar una de las pantallas iniciales denominada **“indicadores”**. Allí, en la parte derecha se pulsa el botón titulado **“ponderación para los indicadores”**, automáticamente es llevado a la pantalla **“pesos para indicadores”** según se muestra en la figura 5.16.

En esta pantalla el usuario debe cumplimentar una tabla de comparación por pares la cual hace parte de una metodología (Analytical Hierarchy Process) en la cual se sustenta la herramienta.

Esta comparación se basa en una escala numérica del 1 a 9 la cual evalúa la importancia relativa entre los indicadores (o bien criterios o requerimientos según sea el nivel de jerarquía que se este evaluando). Si el usuario se sitúa en la casilla correspondiente a la comparación le aparece una pantalla en la que debe seleccionar el valor de la escala que crea conveniente en la denominada **“escala de Saaty”**. Allí debe otorgar valores únicamente a las casillas de color blanco.

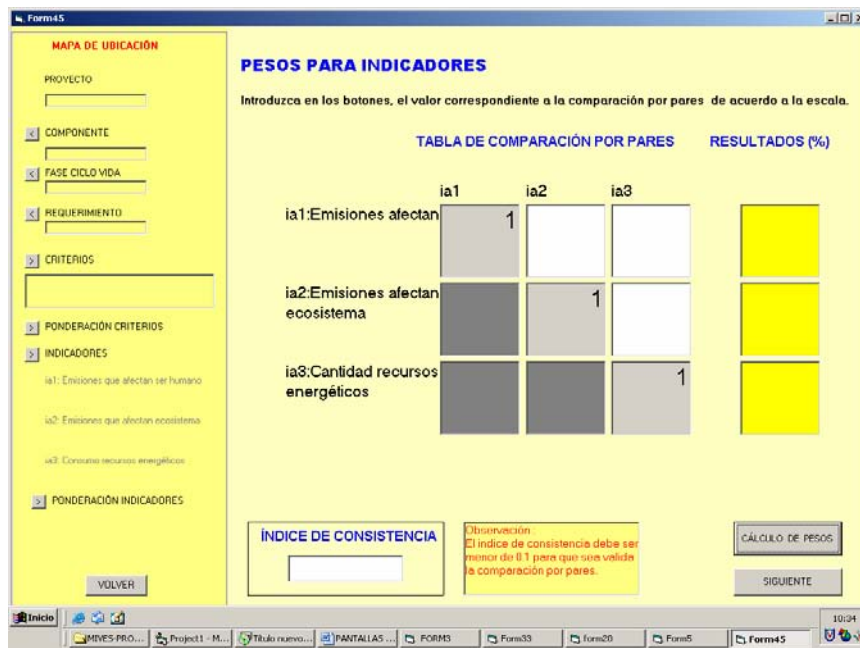


Figura 5.16. Ponderación a nivel de indicadores

Asignados estos valores y después de presionar el botón *“Cálculo de pesos”* aparecen en la parte derecha de la pantalla los pesos correspondientes a cada uno de los indicadores. Al mismo tiempo, en la parte inferior se muestra el índice de consistencia que confirma o no que la comparación por pares fue realmente bien hecha. Esto se observa claramente en la figura 5.17.



Figura 5.17. El vector pesos y el índice de consistencia.

El valor que aparece en esta casilla no debe exceder el 10%, es decir si después de hacer la comparación el número que aparece en la casilla es mayor a 0,1 no se deben aceptar los valores asignados y nuevamente se deben conceder valores. Este valor no puede ser modificado por el usuario bajo ninguna circunstancia. Para el caso de no cumplimiento de la consistencia, aparece un aviso de advertencia en el que le informa al usuario que debe reintentar con otros valores, cumplimentar la matriz y hacer nuevamente la comparación.

Posteriormente en la misma pantalla el usuario presiona “siguiente” y de inmediato el programa lo lleva a la pantalla de indicadores para que inicie la tercera y última fase en este nivel de jerarquía. Esta fase es la correspondiente al “Valor integrado”.

Valor integrado a nivel de indicadores

En esta fase se presentan los indicadores que fueron evaluados, los porcentajes que le fueron asignados y la calificación que recibió cada alternativa de acuerdo a su nivel de funcionamiento como se muestra en la figura 5.18.

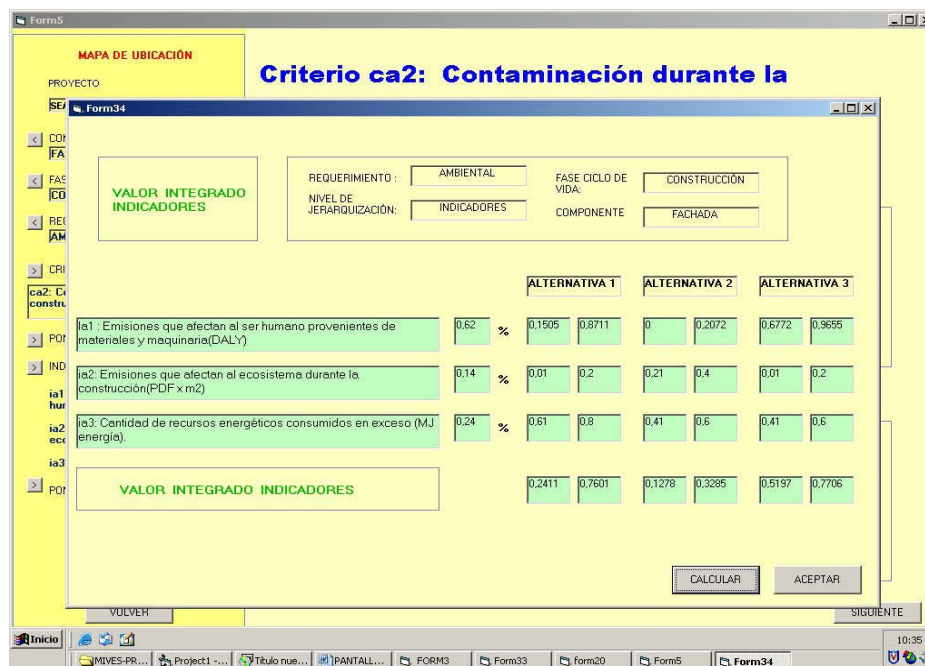


Figura 5.18. Valor integrado a nivel de indicadores

Si se tiene una agrupación de indicadores que pertenecen a un único criterio, lo que aparece en la pantalla como valor integrado, es la suma total de los indicadores después de ser multiplicados escalarmente por su correspondiente ponderación. Cuando se presiona el botón “calcular” el programa arroja la sumatoria de los rangos de valores de los indicadores en la parte inferior de la pantalla. Posteriormente estos valores son llevados a nivel de criterios.

Una vez se han evaluado las tres fases que dan lugar a la cuantificación a nivel de los indicadores, el usuario en la pantalla denominada *“indicadores”* debe pulsar siguiente para de nuevo reiniciar la evaluación a nivel de criterios. En caso dado de que existiesen subcriterios, la herramienta iría a evaluar directamente los subcriterios siguiendo el mismo procedimiento.

5.3.5.2. Evaluación a nivel de criterios

El proceso de evaluación se inicia en la pantalla denominada *“criterios”* que se visualiza en la figura 5.7. Aquí se muestran tres fases que al igual que en la evaluación a nivel de indicadores se deben realizar consecutivamente.

Valor de los indicadores

Constituye la primera de las fases del proceso de evaluación. A diferencia del nivel de indicadores esta fase es reemplazada por los valores obtenidos en los indicadores. Estos valores son guardados internamente en la herramienta para luego en la tercera fase del proceso visualizarlos.

Ponderación a nivel de criterios

Se inicia pulsando el botón “ponderación para criterios” en la pantalla de “criterios”. Posteriormente, la herramienta lleva al usuario a la pantalla denominada “pesos para criterios”. Allí se opera de la misma manera expuesta a nivel de indicadores.

Si bien durante la selección de los indicadores, criterios o requerimientos únicamente se deciden evaluar uno de ellos, el paso de la ponderación es automático, es decir, se le asigna directamente el 100%.

Valor integrado a nivel de criterios

Esta fase al igual que la desarrollada en los indicadores, expone los valores obtenidos en el primer paso de esta evaluación (siendo para este caso particular valores resultantes de los indicadores) junto con las ponderaciones obtenidas. Aquí se agrupan todos los criterios pertenecientes a un requerimiento.

5.3.5.3. Evaluación a nivel de requerimientos

Una vez cuantificado el nivel de criterios, se pasan a evaluar los requerimientos. Se hace a partir de la pantalla mostrada en la figura 5.6. y sigue el mismo procedimiento que el nivel anterior (criterios).

Como se ha visto, la herramienta se estructura jerárquicamente en tres niveles con los niveles más altos lógicamente derivados de la suma de pesos ponderados de los niveles más bajos.

Se debe aclarar que no tienen por qué ser evaluados todos los indicadores, criterios o requerimientos. Cuando se desea evaluar tan sólo alguno de ellos, la ponderación se hace con respecto a los indicadores restantes. Como se explicó en el capítulo 3, se proponen tres metodologías para evaluar los indicadores que se desean incluir en la evaluación.

Bien, ahora que ya se han elegido, explicado y especificado los conceptos claves de la evaluación, corresponde hablar de dos elementos básicos dentro de esta evaluación. El primero de ellos es la puntuación y el segundo los valores de referencia pues a partir de esas dos bases es que se obtienen las calificaciones que fueron previamente asignadas.

Valores de referencia

Los valores de referencia proporcionan una base significativa para evaluar los valores de rendimiento del proyecto analizado. Estos deben ser equivalentes a los mínimos aceptables por la práctica industrial regional para una tipología en particular.

En muchas ocasiones puede existir una práctica regional vigente que sea aplicable pero en otras ocasiones, el equipo de evaluación debe tomar una decisión fundamentada en las prácticas industriales locales. Esto llegado el caso, pudiera requerir un grupo de expertos locales.

Los valores deben ser cumplimentados por personas que estén vinculadas al diseño de la edificación o aquellas responsables de la evaluación. Las personas que introduzcan la información sobre las características del edificio analizado deben ser conocedoras plenamente de su diseño y posible funcionamiento. En el momento de introducir dichos valores, las personas o el encargado no debe dejarse influenciar por los valores de referencia que se hayan propuesto desde un comienzo.

La información de los valores por referencia se encuentra en instituciones públicas, entidades gubernamentales, en la literatura y finalmente experiencia o encuestas.

Puntuaciones

Las puntuaciones de salida provienen de las valoraciones hechas a nivel de los indicadores, esto es; las puntuaciones de los requerimientos se obtienen mediante la valoración proporcional de los (sub)criterios y las puntuaciones del sub(criterio) se obtienen mediante la valoración proporcional de los indicadores. Estas valoraciones dependen de dos aspectos, las ponderaciones como tal y la puntuación obtenida mediante la transformación de la función de valor.

Las puntuaciones que se obtienen a partir de la transformación de la función de valor fluctúan entre 0 y 1 y dependen de la respuesta de las alternativas para cada uno de los indicadores. El valor de cero representa que la respuesta deducida de un indicador no satisface o no aporta en la escala ningún valor sostenible, por el contrario, una puntuación de 1 significa que el indicador en evaluación, representa la mejor puesta en práctica actual. Este puntaje se obtiene únicamente a nivel de indicadores.

Las puntuaciones obtenidas de las ponderaciones se plantea a partir del uso de una técnica de decisiones multicriterio. Como desventaja del uso de dicha técnica es que los resultados dependen de los juicios de valor. Esta puntuación se fija para cada nivel de jerarquía; requerimientos, criterios e indicadores. Las ponderaciones se hacen con la técnica de Saaty como se ha explicado a lo largo de esta sección. Ha de quedar claro que en cada nivel esta ponderación debe sumar el 100 por ciento.

Otra manera de obtener estas ponderaciones se basa en la toma de valores por referencia que previamente se determina por un grupo nacional de usuarios los cuales constituyen un grupo de expertos en la valoración de las matrices. Es importante resaltar que los pesos por los cuales se opten provengan de expertos en el área correspondiente. La ponderación de los pesos se hace también en base del entorno en el cual se deban aplicar dichos pesos. es decir, del contexto geográfico y del tipo de industria que se este evaluando.

En relación a la evaluación del plano de requerimientos ambiental hay que considerar que para determinar dichos pesos (difíciles de predecir), los expertos en las respectivas áreas deberán especificar estos pesos ponderados haciendo uso de sus conocimientos técnicos.

Para terminar cuando se haya completado, examinado e introducido toda la información respectiva, debe ejecutarse los cálculos que internamente realiza el programa para la posterior asignación del número de evaluación. Este número se procesa en la última fase denominada "sección de resultados" cuyo objetivo es obtener un valor óptimo de los resultantes en la sección de evaluación.

5.3.6. SECCIÓN 5: Resultados

Determinada la asignación de los parámetros para describir el proyecto que se quiere evaluar al igual que las características de la edificación, el paso final consiste en seleccionar el valor que elige la mejor alternativa.

Esta sección es clave en ello pues contiene la estrategia para seleccionar el mejor valor sostenible. El programa inicia el proceso a partir de una pantalla en la que da la opción al usuario de elegir los planos en los que desea evaluar la toma de decisión. Allí pregunta al usuario si evalúa todos los planos o únicamente los evaluados tal y como se muestra en la figura 5.19.



Figura 5.19. Selección del o los planos a evaluar

Posteriormente al seleccionar los planos evaluados, (ambiental, económico, funcional, social, estético) la herramienta muestra al usuario un resumen de todas las calificaciones que se obtuvieron para cada uno de ellos. Visualizado este resumen y cuando el usuario pulsa siguiente en la parte inferior de la derecha, el programa presenta una pantalla en la que puede elegir dentro de una gama de opciones como se muestra en la figura 5.20. Las opciones a que se hacen referencia son:

- Valor Integrado del criterio de optimización: Elección de la mejor alternativa
- Visualización de resultados mediante la media geométrica
- Análisis de sensibilidad

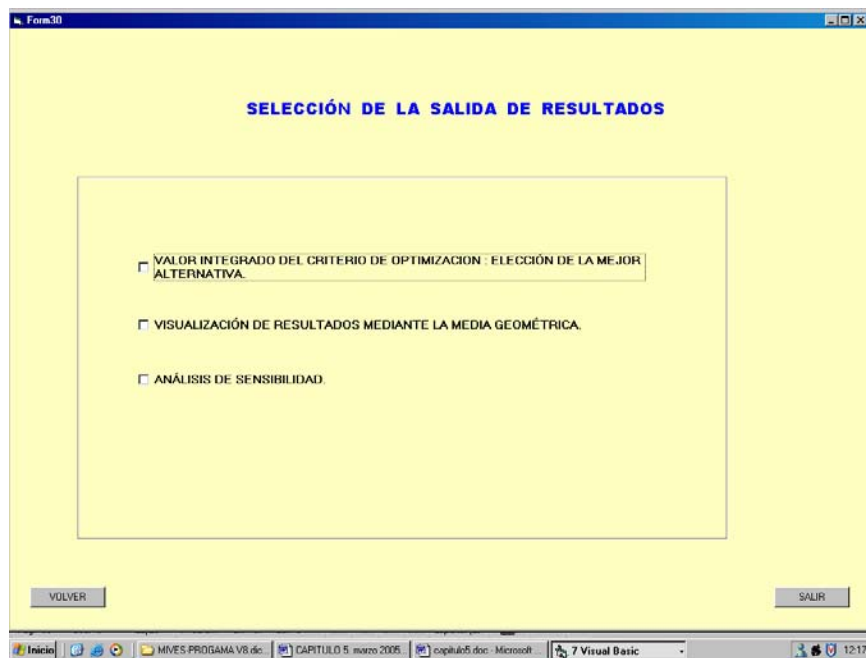


Figura 5.20. Selección de resultados

Si el usuario elige la opción “El valor Integrado del criterio de optimización” básicamente obtiene el resultado final de la selección de la mejor alternativa como se muestra en la pantalla denominada “*resultados*”.

Este resultado se muestra para cada componente. En caso de evaluar más componentes nuevamente se inicia el procedimiento para evaluar el que se quiera y posteriormente, se hace una evaluación global del conjunto de ellos.

También existe la posibilidad de ver representados gráficamente los resultados a través de un histograma o a partir de un diagrama de redes o araña. Esta es simplemente una percepción gráfica en la que mediante las áreas ocupadas en los planos de estudio se deduce cual es la que más repercusión tiene. La visualización se hace más completa entre más planos de requerimientos estén expuestos.

Cuando el usuario en la herramienta pulsa el botón graficar aparece inmediatamente el diagrama descrito. Ver gráfica 5.21. En la parte derecha de la pantalla se presentan los resultados a partir de los cuales fue graficado. Estos valores son el resultado obtenido en cada alternativa.



Figura 5.21. Representación de resultados mediante un diagrama de redes.

Para terminar, la tercera opción “análisis de sensibilidad” muestra la variación en los resultados y en la elección de la mejor alternativa a partir de la modificación de datos establecidos en el programa. Los datos que se harán sensibles al usuario corresponderán a la variación en la función de valor y a las ponderaciones en el nivel de requerimientos. Se consideran estas dos posibles variaciones por ser las más influyentes en la toma de decisión final.

5.4. APLICACIONES DE LA HERRAMIENTA

La herramienta ha sido diseñada para ser capaz de evaluar varios campos en la toma de decisión. Estos campos hacen referencia al ámbito académico e institucional, al ámbito de contratación, en áreas de costes, área de presas y obviamente como objetivo fundamental en el área de la edificación industrial sostenible.

La herramienta se diseñó para ser una herramienta dinámica capaz de configurar el árbol de requerimientos, las alternativas, los componentes que el usuario decida en su momento y lo más importante la o las decisiones que desea evaluar respecto a estos componentes. Es una herramienta que ha sido creada de tal manera que sea amigable al entorno usuario y en el entorno programación.

5.5. LIMITACIONES

Las limitaciones que presenta la herramienta hacen referencia a la aplicación de la misma fuera del contexto para la cual fue evaluada. Es necesario en la plataforma creada para el diseñador modificar las bases de datos con que se trabajan para que la evaluación sea homogénea en el contexto que se desea evaluar.

La herramienta en el caso de asignación de pesos y en la asignación de la función de valor presenta cierta subjetividad pero que en cierta medida se vuelve rigurosa cuando se asigna una función de valor de acuerdo a las cuatro posibilidades de elección (en forma de s , lineal, cóncava y convexa) y a la escala de valores en el momento de la comparación por pares.

Hay limitaciones en cuanto al número de indicadores: esta restricción se presenta en el número de indicadores para asignar pesos, (la metodología sólo admite 15 indicadores) Adicionalmente otra limitación en torno a la agregación de indicadores como se explicó en el capítulo 3, hace que se diluya la importancia de los indicadores más importantes por lo que es necesario tenerlo en cuenta.

Los resultados con respecto a la mejor alternativa cambian en caso dado de agregarse alguna alternativa. Los resultados por tanto se convierten en resultados relativos. Estos se reordenan de acuerdo a la nueva asignación de alternativas que se presenten.

5.6. FUTUROS AVANCES DE LA HERRAMIENTA

En la actualidad se está desarrollando una nueva versión de la herramienta de cara a hacer aplicada fácilmente en otros entornos y otras disciplinas. La versión se ordena a partir de dos módulos

En el primer módulo denominado "módulo programador" se introduce el modelo a analizar, es decir se introduce el árbol de requerimientos, la función de valor y los pesos. A diferencia de la primera versión el árbol se ajusta a las necesidades que desee el usuario y se puede dimensionar de acuerdo al número de requerimientos y criterios que se establezcan. Este módulo se deja abierto para que el usuario a futuro pueda o no pueda cambiar funciones, pesos, etc.

El segundo módulo es el "modulo usuario" el cual permite absorber el modelo establecido en el anterior módulo y aplicarlo a casos concretos. Se debe aclarar que toda la información se absorbe del modelo. En este modulo básicamente se entra a calificar y a evaluar.

CAPÍTULO 6

CASO PRÁCTICO: ESTUDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA TERMINAL Y TALLER DE REPARACIÓN DE AUTOBUSES

6.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 3 de esta tesis, se ha expuesto una metodología de toma de decisión aplicada al edificio industrial desde el punto de vista de sostenibilidad. Posteriormente en el capítulo 4 se ha establecido los parámetros necesarios para su adaptación y planteamiento estudiando criterios para cada una de las etapas propuestas en el modelo. Por su parte en el capítulo 5, se ha desarrollado y constituido la herramienta informática en base a la metodología presentada.

De acuerdo a lo explicado anteriormente, el **objetivo** de este capítulo se centra en la aplicación de la metodología y la herramienta informática llevando a cabo en primer lugar una comparación y elección entre diferentes componentes para dos naves industriales y luego la comparación y elección de la mejor nave industrial.

El caso práctico está desarrollado bajo circunstancias actuales aunque su aplicación es muy simplificada con el fin de integrar aspectos relevantes en la metodología. Por razones obvias, los nombres no serán los reales. No obstante, para el caso económico, los datos se sitúan en el orden de magnitud que se da en la práctica profesional.

6.2. ESTUDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA TERMINAL DE AUTOBUSES

6.2.1. Descripción del problema

El ayuntamiento de Barcelona (entidad adjudicadora) emite una convocatoria pública para la construcción de un edificio destinado a una *terminal y taller de reparación de autobuses* ubicada en la zona portuaria de esta ciudad. Su objetivo es dar un nuevo impulso económico y social a la zona, además de percibir un adecuado nivel de ganancias. El solar donde se va a construir el edificio proyectado está incluido dentro de la calificación de solar destinado a una zona de equipamientos de acuerdo a lo que determina el Plan General de Ordenación Urbana de Barcelona.

La terminal de autobuses como se muestra en la figura 6.1 cuenta con un área de 700 m² en la zona de taller y 150 m² en la zona de almacén. Dispone de un espacio para cinco cocheras de aproximadamente 100 m² cada una. Dos de estas cocheras se proyectan con fosas para taller y lavado respectivamente.

El proyecto a realizar como anteriormente se mencionaba, se ubica en el puerto de Barcelona razón por la cual se deben revisar los siguientes parámetros: nivel freático, socavación, peso de la estructura.

La convocatoria establece que la propuesta para la solución de dicha terminal debe discriminarse a partir de las siguientes partidas: Explanación, Cimentación, Estructura, Cerramiento, Cubierta y Pavimentos. La distribución en planta no se considera porque es un dato de entrada del proyecto. Por otra parte, la entidad adjudicataria no incluye la partida de instalaciones porque la subcontratará.

En respuesta a dicha concurso, se elaboran varias propuestas siendo dos de ellas las más representativas y adecuadas para el entorno del edificio (zona con un alto índice de humedad)

Propuesta A: La propuesta técnica aportada por la empresa **ALARCON & CIA S.L** selecciona para cada componente las siguientes soluciones

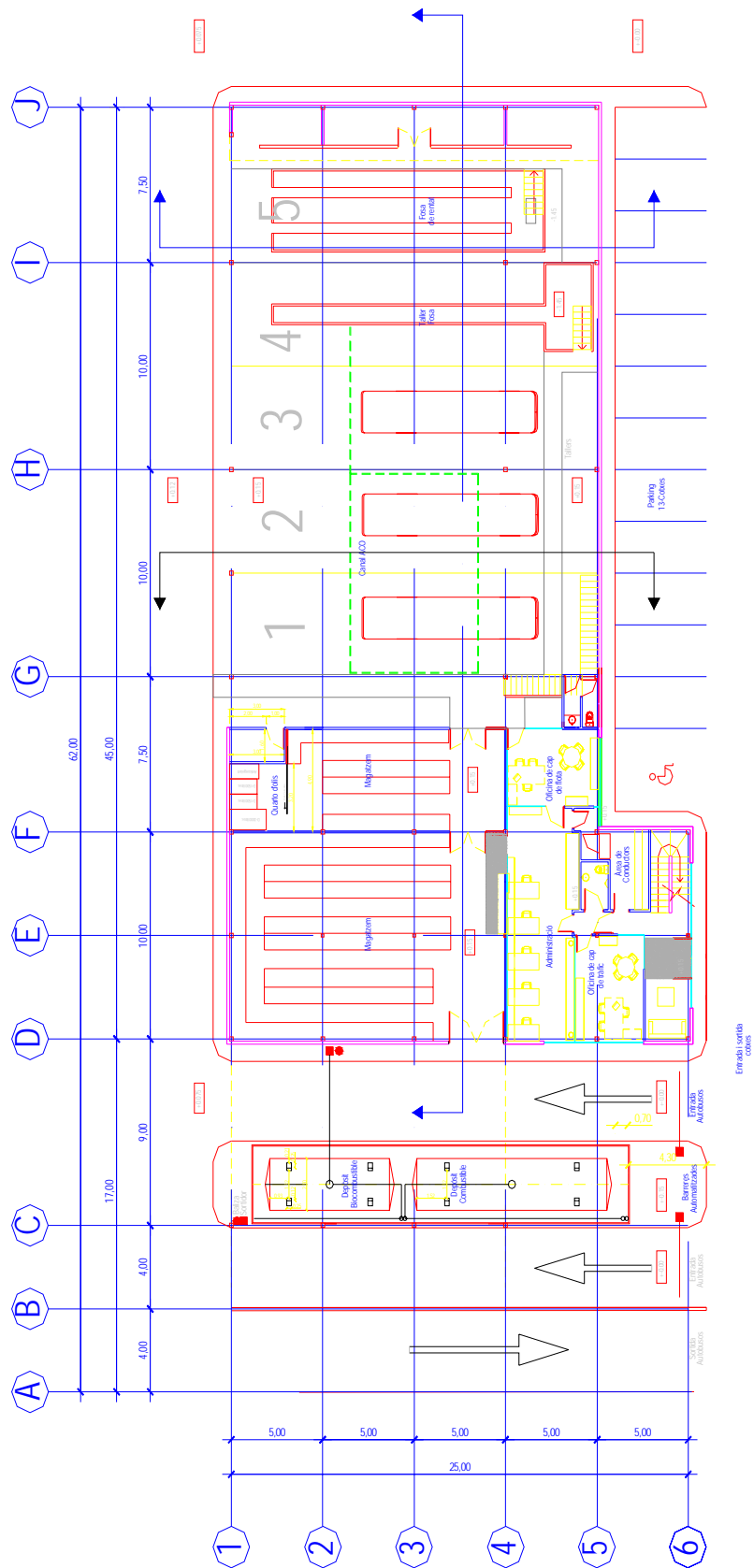


Figura 6.1. Distribución en planta de la terminal de autobuses

- Cimentación: Zapatas de hormigón

Dadas las características del terreno tal y como lo describe el estudio geológico, se ha considerado conveniente la utilización de zapatas para la cimentación de pilares y de los muros de cerramiento. El hormigón que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 10%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 5% de la misma.

- Estructura: Hormigón armado.

La estructura se ha resuelto por medio de un sistema estructural isostático que estará formado por lo siguiente: pilares de hormigón armado, sobre los pilares descansan jácenas de hormigón pretensado sobre el que se apoyan correas de hormigón tipo "Dalla". A continuación se detalla la solución del sistema:

- Viga delta pretensado tipo D2 del 10% de pendiente, para una carga máxima de 1500 kg m.
- Viga TL50 de fachada, de 5 m de longitud.
- Viga tubular con 25 cm. de espesor y 10m de longitud.
- Pilares con empotramiento en cáliz de 40 x 40 cm de sección

El hormigón que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 10%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 10% de la misma.

- Cerramiento: Panel prefabricado de hormigón a la vista.

El cerramiento de la nave se ha resuelto por medio de paneles de hormigón de árido visto con aislamiento de porexpan de 20 cm de espesor. Tendrá un color similar al resto de la nave del polígono. El hormigón que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 10%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 15% de la misma.

- Cubierta: Panel de cubierta tipo Perfrisa.

Es metálica de color claro, formada por paneles metálicos prelavados por las dos caras y con acabado PVF2 y aislamiento de espuma de poliuretano de 40mm de espesor, la chapa inferior de color blanco. El lucernario es traslucido de doble hoja para mejorar el aislamiento térmico y favorecer la difusión de la luz. El acero que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 90%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 20% de la misma.

- Pavimentos: Pavimento de hormigón con acabado fino de arena de cuarzo en taller.

El pavimento se resolvió con hormigón y acabado fino de arena de cuarzo en taller. El hormigón que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 10%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 5% de la misma.

Propuesta B: La propuesta técnica aportada por la empresa **TRANSPORTS CIUTAT BARCELONA S.A.** propone:

- Cimentación: Zapatas de hormigón

De acuerdo a las características del terreno y al estudio geológico, se ha considerado la utilización de zapatas para la cimentación de pilares y de los muros de cerramiento. El hormigón que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 20%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 5% de la misma.

- Estructura: Metálica

La estructura se resolvió por medio de pilares metálicos formados por tubos cuadrados de 0,2 m y 0,16 m. Vigas y caballos metálicos de 5 y 6m de luz. y arriostramientos para las fachadas. El acero que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 90%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 20% de la misma.

Cerramiento: Panel de fachada tipo Perfrisa

Se propone desarrollar un cerramiento metálico tipo sandwich. El acero que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 90%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 25% de la misma.

- Cubierta: Panel de cubierta tipo Perfrisa.

Elabora la misma propuesta que la otra empresa ofertante, es decir, cubierta metálica, formada por paneles metálicos prelavados por las dos caras y con acabado PVF2 y aislamiento de espuma de poliuretano de 40mm de espesor, la chapa inferior de color blanco. El lucernario es traslucido de doble hoja para mejorar el aislamiento térmico y favorecer la difusión de la luz. El acero que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 90%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 20% de la misma.

- Pavimentos: Pavimento de hormigón con acabado de mortero de poliuretano ó epóxico antideslizante. El hormigón que se utilizará tendrá un contenido de reciclaje del 20%. Se estima que al finalizar el periodo útil del edificio se podrá recuperar un 5% de la misma.

De acuerdo a los resultados obtenidos por las propuestas de las empresas concursantes, la partida de explanación no se tendrá en cuenta, ya que ambas ofertas son similares lo cual no hace que sea un factor diferencial.

El ayuntamiento en base a los dos planteamientos y de acuerdo a las condiciones que estipula la Agenda local 21 debe elegir aquella propuesta que cuantitativamente sea la más sostenible. Para ello hace un estudio desde dos puntos de vista: Evaluando la alternativa estructural por separado (ya que es un factor diferencial de peso) y haciendo una calificación general de cada propuesta.

Por su parte, la entidad adjudicataria para hacer la evaluación propone realizar un planteamiento analítico de cada propuesta y luego con ayuda de la aplicación de la herramienta informática concluir la evaluación y cuantificación de cada alternativa.

6.2.2. Planteamiento para lo solución del problema con aplicación de la metodología

Para abordar el problema en cuestión, se inicia con la exposición de cada una de las fases que propone la metodología

6.2.2.1. Análisis

Se define el alcance de la decisión a partir de tres ejes expuesto en el capítulo 3.

Requerimientos:

Los planos que se adoptan para este eje tienen correspondencia directa con las necesidades descritas en el proyecto.

- Plano medioambiental: Al ser un proyecto de carácter público, existe mayor exigencia en cuanto al cumplimiento de la normativa ambiental. El objetivo que se persigue es minimizar cualquier impacto durante todas las fases del ciclo de vida.

Se evalúan criterios como el consumo de energía, el uso de material reciclado, la gestión de residuos y los materiales utilizados. El edificio por su parte debe considerar sistemas de climatización que sean respetuosos con el medio ambiente y que el propio edificio sea de bajo consumo energético. Esto teniendo en cuenta la buena orientación de las fachadas, el buen alineamiento y la utilización de sistemas de vidrio con doble hoja que tengan un alto factor reflectante al exterior y de baja emisión al interior.

- Plano económico: El ayuntamiento, en este caso la entidad adjudicataria, evaluará la propuesta económica teniendo en cuenta los costes de ejecución y de mantenimiento (el proyecto requiere de unas condiciones de mantenimiento permanentes por encontrarse en una zona de alto índice de humedad y salinidad). Evaluará todas y cada una de las partidas considerando materiales, mano de obra y maquinaria.

El presupuesto de que dispone el ayuntamiento es de 250.000 € por tanto las propuestas no deben superar esta cifra. La rentabilidad de la inversión no se cuantifica por que el ayuntamiento al sacar a concurso público la construcción de la terminal, supone que es un proyecto que le generará beneficios.

- Plano funcional: El proyecto inicialmente se plantea con dos propósitos: primero que cumpla con la función para la cual será diseñado "terminal y taller de reparación de autobuses de transportes" y segundo para que a futuro sea adaptable a distintos cambios en que se pueda incurrir. Como es un proyecto cuyo fin es generar "*ganancias*", es posible que el objetivo para el cual fue diseñado cambie por las condiciones del mercado y del entorno. Con este requerimiento se pretende también evaluar la facilidad y frecuencia de mantenimiento y la simplicidad del proceso constructivo.
- Plano estético: Este requerimiento constituye un factor diferencial de relevancia entre los dos proyectos. Al estar integrado en el puerto de Barcelona y ser un punto de entrada al Mediterráneo exige un alto índice de adaptabilidad estética respecto al entorno por lo que el nivel de exigencia mayor. Adicionalmente, el ayuntamiento busca que la imagen de la empresa sea moderna y puntera en innovación tecnológica y además respetuosa con el medio ambiente, todo ligado con el entorno en donde se ubica el taller.
- Plano Social: El Ayuntamiento de Barcelona al promover este proyecto tiene claro la adaptación del mismo respecto a terceros al igual que el cumplimiento de la normativa por lo cual no se evaluarán estos parámetros. Por otra parte, en lo que se refiere a la adecuación de los servicios auxiliares tampoco se considerará porque la distribución en planta es la misma y no es factor diferencial.

Dadas las pautas anteriormente impuestas por la administración y las necesidades del proyecto, se decide definir el árbol de requerimientos como se muestra en la tabla 6.1. Si bien se observa, este árbol difiere del que se propuso en el capítulo 4 de la presente tesis doctoral. Esta variación se justifica porque las particularidades y exigencias del proyecto excluyen requerimientos, criterios e indicadores que no son adaptables al entorno y a las características que se evalúan.

REQUERIMIENTOS	CRITERIOS	INDICADORES
AMBIENTAL	Consumo de energía	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ)
	Utilización de materiales reciclados	Uso de materiales reciclados (%)
	Gestión de residuos	% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).
ECONÓMICO	Costes	Coste de ejecución en (€/m ²)
		Coste anual de operación mantenimiento(€/m ²)
ESTÉTICO	Calidad de la edificación	Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta
		Factor de forma
	Integración Urbana	Grado de adaptabilidad al entorno
FUNCIONAL	Constructibilidad	Grado de simplicidad del proceso constructivo.
	Modificabilidad y flexibilidad	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio.
		Facilidad de ampliación respecto al terreno y al edificio.

Tabla 6.1. Árbol de requerimientos para la construcción de la terminal de autobuses

Componentes

Los componentes que se definieron para el proyecto, se determinaron de acuerdo a las pautas dadas por la administración en su pliego de condiciones. Estos son: **Cimentación, Estructura, Cerramiento, Cubierta y Pavimentos interiores.**

En caso de que el proyecto no hubiese especificado la distribución en planta, se consideraban los componentes sugeridos en el capítulo 4 de la presente tesis doctoral.

Ciclo de vida

Debido a que el proyecto exige el cumplimiento de la agenda local 21, se estipula el diseño en base a las cuatro fases que encierra el ciclo de vida: Concepción, Construcción, Mantenimiento y Reintegración.

6.2.2.2. Creatividad

Esta fase se resume con las alternativas generadas por cada una de las empresas concursantes y que se muestran en la tabla 6.2 para cada uno de los componentes. Adicionalmente, en la tabla 6.3 se presentan las cantidades y los precios estipulados por las empresas ofertantes.

Componentes	ALTERNATIVAS	
	Alternativa A	Alternativa B
Cimentación	Zapatas de hormigón	Zapatas de hormigón
Estructura	Hormigón	Metálica
Cerramiento	Panel prefabricado de hormigón de espesor 20cm con árido lavado y aislamiento de porexpan	Panel de fachada tipo Perfrisa con protección PVDF-2.
Cubierta	Panel de cubierta tipo Perfrisa con protección PVDF-2	Panel de cubierta tipo Perfrisa con protección PVDF-2.
Pavimentos	Hormigón H250 de 20cm de espesor con acabado fino de arena de cuarzo en taller.	Hormigón H250 de 20cm de espesor con mortero de poliuretano ó epoxico antideslizante.

Tabla 6.2. Alternativas para elegir la construcción de la terminal de transportes

componentes	ALTERNATIVA A			componentes	ALTERATIVA B		
	u	cantidad	precio(€)		U	cantidad	precio(€)
Cimentación (Zapatillas Hormigón)	m ³	105	12.700	Cimentación (Zapatillas Hormigón)	M ³	86.4	9.160
Estructura Hormigón prefabricado	M	558	53.305	Estructura Metálica	Kg	86.000	146.000
	Kg	106.000					
Cerramiento panel Hormigón prefabricado	M ²	850	50.235	Cerramiento tipo perfrisa	M ²	850	28.900
Cubierta tipo perfrisa	M ²	860	28.250	Cubierta tipo perfrisa	M ²	860	28.250
Pavimentos Hormigón	M ²	850	22.200	Pavimentos Hormigón	M ²	850	30.634

Tabla 6.3. Propuestas de precios y cantidades por las empresas concursantes

6.2.2.3. Evaluación

La evaluación se va a realizar desde dos entornos y bajo dos enfoques: dos entornos porque por una parte se mostrará la aplicación analítica y por otra la aplicación informática. Y bajo dos enfoques por que en esta etapa se hará:

- Una evaluación de la alternativa A y la alternativa B para la totalidad de componentes hasta obtener una puntuación general y ver cual es la más sostenible.
- Debido a que la zona en donde se plantea construir la nave industrial viene afectada por la inestabilidad y el mal comportamiento del terreno, es necesario considerar la relevancia de la tipología estructural. Dado este hecho, se propone hacer una evaluación modificando únicamente el componente estructural para cada una de las alternativas y ver la incidencia del mismo. El estudio de este componente supone mayor o menor aligeramiento de la estructura, costes de mantenimiento y durabilidad, etc.

Enfoque 1: Puntuación general en el edificio

En primer lugar se debe elegir del árbol de requerimientos expuesto en la tabla 6.1., los indicadores que han de ser calificados en cada componente pues como es lógico, no todos aplican en la evaluación. Esto se muestra en la tabla 6.4.

INDICADORES	COMPONENTES					
	Distribución planta	Cimentación	Estructura	Cerramiento	Cubierta	Pavimentos
Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ)		x	x	x	x	x
Consumo energético previsto (KVa)	x					
Uso de materiales reciclados (%)		x	x	x	x	x
% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).		x	x	x	x	x
Coste de ejecución en (€/m2)		x	x	x	x	x
Coste anual de operación mantenimiento(€/m2)			x	x	x	x
Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta				x	x	
Factor de forma	x					
Grado de adaptabilidad al entorno	x			x	x	
Grado de simplicidad del proceso constructivo.		x	x	x	x	x
Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio.		x	x	x	x	x
Facilidad de ampliación respecto al terreno y al edificio.		x	x	x	x	x

Tabla 6.4. Indicadores asignados a cada componente

Los indicadores aplicables al componente distribución en planta, no serán tomados en cuenta por ser este un dato de entrada del proyecto. Prosiguiendo con la aplicación de la metodología el paso siguiente consiste en definir la ponderación de cada elemento del árbol de requerimientos como se muestra a continuación para cada una de las alternativas:

- Ponderación

Para iniciar la ponderación o determinar el nivel de importancia de cada elemento del árbol de requerimientos o bien se puede iniciar por los requerimientos o bien por los indicadores. En este caso se inicia la evaluación con los requerimientos, para ello, se plantea las matrices de decisión de los respectivos requerimientos.

A continuación se muestra el procedimiento utilizado para obtener los pesos para los requerimientos, no obstante, el procedimiento para los criterios e indicadores se ejemplifica en el Anexo F donde se detalla por medio de la herramienta informática la solución de estas matrices aplicando el A.H.P.

Alternativa A y Alternativa B

	Medioambiental	Económico	Estético	Funcional		Vector (w)
Medioambiental	1,00	0,50	3,00	2,00	➔	0,29
Económico	2,00	1,00	4,00	2,00		0,43
Estético	0,33	0,25	1,00	0,50		0,10
Funcional	0,50	0,50	2,00	1,00		0,18

Consistencia (menor a 0.1)	$\lambda_{\text{máx.}}$: 4,046
	R.C. : 0,017

Tabla 6.5. Matriz de decisión, cálculo del vector propio e índice de consistencia

En la tabla 6.6 se resume los pesos obtenidos para la alterativa A y B en cada uno de los niveles de jerarquía mediante la aplicación del Proceso Analítico de Jerarquía.

Requerimiento	W. Requerimiento	Criterio	W. Criterio	Indicador	W. Indicador
Medio ambiental	29%	Consumo de energía	45%	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ)	100%
		Utilización materiales reciclados	30%	Uso de materiales reciclados (%)	100%
		Gestión de residuos	25%	% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).	100%
Económico	43%	Costes	100%	Coste de ejecución en (€/m ²)	60%
				Coste anual de operación mantenimiento (%)	40%
Estético	10%	Calidad de edificación	50%	Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta	100%
		Integración urbana	50%	Grado de adaptabilidad al entorno	100%
Funcional	18%	Constructibilidad	67%	Grado de simplicidad del proceso constructivo.	100%
		Modificabilidad y flexibilidad	33%	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio.	100%

Tabla 6.6. Ponderación para el árbol de requerimientos de la alternativa A y B

- Respuesta de la alternativa

La respuesta de las alternativas como se mostró en la tabla 6.4, se hace en cada componente y por cada indicador ya que se va a realizar la evaluación general del edificio. Se debe aclarar que por precisión y brevedad del documento se asigna el mismo porcentaje de importancia a cada componente, no obstante, es posible asignar a cada uno de ellos mediante el A.H.P un orden de jerarquía.

Los valores obtenidos para las correspondientes alternativas se basan en los datos expuestos en el capítulo 4 de la presente tesis. A continuación se presentan tablas de valores para los indicadores propuestos en cada alternativa:

I₁C₁R₁: Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m²)

COMPONENTES		Materiales	Cantidad (Kg) ⁽¹⁾	Energía MJ/Kg ⁽²⁾	U	Cantidad alternativa	Energía en MJ.	Energía en MJ/m ²	
Cimentación	Zapatas de Hormigón	Hormigón armado	2400	1.1	m ³	105	288.750	339.7	
Estructura	Hormigón prefabricado	Pilar	Hormigón	460	1.1	m	558	730.250	859
			Acero	13	35				
		Viga	Hormigón	538	1.1				
			Acero	23	35				
Cerramiento	Panel Hormigón prefabricado	Hormigón en masa	292.5	1.1	m ²	850	567.587	667.75	
		Acero	5.6	35					
		Poliestireno Expandido	1.5	100					
Cubierta	Panel tipo perfrisa	Acero	11.76	35	m ²	860	523.740	609	
		Poliuretano	1.2	70					
Pavimento	Pavimento de hormigón con acabado fino de arena	Grava	255	0.1	m ²	850	370.345	435.7	
		Hormigón en masa	230	1.1					
		Mortero de cemento	133.1	1.2					

Tabla 6.7. Respuesta de alternativa A para el indicador I₁C₁R₁

COMPONENTES		Materiales	Cantidad (Kg) ⁽¹⁾	Energía MJ/Kg ⁽²⁾	U	Cantidad alternativa	Energía en MJ.	Energía en MJ/m ²
Cimentación	Zapatas de Hormigón	Hormigón armado	2400	1.1	m ³	86.4	237.600	279.5
Estructura	Metálica	Acero	1	35	kg	86.000	3.010.000	3.542
Cerramiento	Panel tipo perfrisa	Hormigón en masa	292.5	1.1	m ²	850	567.587	609
		Acero	5.6	35				
		Poliestireno Expandido	1.5	100				
Cubierta	Panel tipo perfrisa	Acero	11.76	35	m ²	860	523.740	609
		Poliuretano	1.2	70				
Pavimento	Pavimento de hormigón con acabado fino de arena	Grava	255	0.1	m ²	850	370.345	435.7
		Hormigón en masa	230	1.1				
		Mortero de cemento	133.1	1.2				

Tabla 6.8. Respuesta de alternativa B para el indicador I₁C₁R₁

(1) – (2). Ver tablas 4.9 y 4.10 respectivamente.

I₁C₂R₁: Uso de materiales reciclados (%)*Alternativa A*

De acuerdo a la propuesta de la empresa **ALARCON & CIA S.L** se resume en la tabla 6.9 la cantidad de material reciclado más representativo de cada componente.

Componentes	Material reciclado Alternativa A	% Material reciclado
Cimentación	Hormigón	10%
Estructura	Hormigón	10%
Cerramiento	Hormigón	10%
Cubierta	Acero	90%
Pavimentos	Hormigón	10%

Tabla 6.9. Respuesta de la alternativa A del indicador I₁C₂R₁

Alternativa B

Por su parte la propuesta de la empresa **TRANSPORTS CIUTAT BARCELONA S.A.** resume la cantidad de material reciclado más representativo de cada componente y se muestra en la tabla 6.10.

Componentes	Material reciclado Alternativa B	% Material reciclado
Cimentación	Hormigón	20%
Estructura	Acero	90%
Cerramiento	Acero	90%
Cubierta	Acero	90%
Pavimentos	Hormigón	20%

Tabla 6.10. Respuesta de la alternativa B del indicador I₁C₂R₁

I₁C₄R₁: % de reciclado de los residuos de construcción y demolición

La tabla que se muestra a continuación se realiza a partir de los datos dados por las empresas ofertantes y se realiza para cada una de las alternativas.

Alternativa A

Componentes	Material recuperable Alternativa A	% Material recuperable
Cimentación	Hormigón	5%
Estructura	Hormigón	10%
Cerramiento	Hormigón	15%
Cubierta	Acero	20%
Pavimentos	Hormigón	5%
Total		11%

Tabla 6.11. Respuesta de la alternativa A del indicador I₁C₄R₁*Alternativa B*

Componentes	Material recuperable Alternativa B	% Material recuperable
Cimentación	Hormigón	5%
Estructura	Acero	20%
Cerramiento	Acero	25%
Cubierta	Acero	20%
Pavimentos	Hormigón	5%
Total		15 %

Tabla 6.12. Respuesta de la alternativa B del indicador I₁C₄R₁

Hasta este momento se ha evaluado la respuesta de las alternativas A y B para los indicadores pertenecientes al requerimiento medioambiental. A continuación se da paso al análisis de los indicadores económicos.

I₁C₁R₂: Coste de ejecución (€/m²)

Para obtener los parámetros de respuesta de las alternativas para cada uno de los componentes, se sigue el procedimiento expuesto en el capítulo 4 apartado 4.4.2.7. A continuación se presenta la tabla 6.13 en la que se resumen los costes en €/m² para cada una de las alternativas en cada componente.

Componentes	ALTERNATIVA A (€)	ALTERNATIVA A (€/m ²)	ALTERNATIVA B (€)	ALTERNATIVA B (€/m ²)
Cimentación	121.21	14.9 ⁽¹⁾	106	10.77
Estructura	86 ⁽²⁾	34.9	1.70	173.74
Cerramiento	59.10	32.3	34	43.4
Cubierta	34	34.4	34	34.4
Pavimentos	31.70	31.70	36.04	36.04

Tabla 6.13. Respuesta de la alternativa A y B del indicador I₁C₁R₂

(1). El precio unitario para las zapatas de hormigón es de 121.21€ por m³ (precio oferta) y para obtener el precio por m² hacemos lo si $\frac{105 \text{ m}^3}{850 \text{ m}^2 \text{ de proyecto}} \times 121.21 \text{ €/m}^3 = 14.9 \text{ €/m}^2$

(2). Es el precio promedio de las vigas y pilares.

El coste total de ejecución para la alternativa A es de aproximadamente: 167.000€ y para la alterativa B es de 243.000€.

I₂C₁R₂: Coste de mantenimiento

El presupuesto suministrado por la empresa A estima que el coste de mantenimiento es de 3.500€ lo que equivale en porcentaje al 2.1%. Para la empresa B el coste es mayor y asciende a 6.100€ lo que equivale en porcentaje al 2.5%.

Este coste de mantenimiento incluye los gastos propios del personal, el consumo de materiales, suministros y productos, consumo de piezas de recambio, los gastos generales, servicio de mantenimiento (edificios, herramientas, seguros).

Los indicadores que en seguida se explican pertenecen al requerimiento estético por lo cual el ayuntamiento para hacer la evaluación, tuvo que realizar un trabajo de campo con el fin de determinar la adaptación del proyecto respecto al entorno y respecto a los materiales propuestos en cada una de las alternativas.

A continuación se presenta la tabla que resume las percepciones de la propuesta de la empresa ALARCON Y CIA LTDA y de la empresa TRANSPORTS CIUTAT BARCELONA S.A.

I₁C₁R₃: Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta

Componentes	ALTERNATIVA A	ALTERNATIVA B
Cerramiento	5	10
Cubierta	7	7
TOTAL	5.5	8.5

Tabla 6.14. Respuesta de la alternativa A y B del indicador I₁C₁R₃

I₁C₂R₃: Grado de adaptabilidad al entorno:

Componentes	ALTERNATIVA A	ALTERNATIVA B
Cerramiento	5	10
Cubierta	7	7
TOTAL	5.5	8.5

Tabla 6.15. Respuesta de la alternativa A y B del indicador I₁C₂R₃

Los valores obtenidos para la alternativa B son relativamente altos y es lógico puesto que se trata de un proyecto lanzado por una entidad gubernamental lo que implica que está dispuesta a pagar más por una mayor calidad, por la conservación del aspecto estético y por el respeto con el medio ambiente.

I₁C₁R₅: Grado de simplicidad del proceso constructivo

El proceso constructivo se evalúa por la simplicidad de construcción en cada componente y se define por porcentaje. En la tabla 6.16 se resume la calificación aportada por los expertos respecto a la facilidad del proceso de construcción.

Componentes	Alternativa A	Alternativa B
Cimentación	80%	80%
Estructura	70%	90%
Cerramiento	70%	90%
Cubierta	80%	80%
Pavimento	80%	80%
TOTAL	76%	84%

Tabla 6.16. Respuesta de la alternativa A y B del indicador $I_1C_1R_5$

$I_1C_3R_5$: Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio

Componentes	Alternativa A	Alternativa B
Cimentación	0%	0%
Estructura	6%	12%
Cerramiento	9%	15%
Cubierta	12%	12%
Pavimento	0%	0%
TOTAL	5.4%	7.8%

Tabla 6.17. Respuesta de la alternativa A y B del indicador $I_1C_3R_5$

- Construcción de la función de valor

El objetivo de la función de valor es transformar las diferentes unidades a una escala de valor. Son variados los indicadores propuestos para calificar las alternativas por lo cual se hace necesario su utilización. Para cada indicador se define con una función específica de acuerdo a sus particularidades y al análisis propuesto en el capítulo 4.

En la tabla 6.18 y en las gráficas posteriores se muestra el procedimiento para calificar el indicador de los costes y obtener su índice de valor paso a paso. En el anexo F se muestra la evaluación de cada uno de ellos utilizando la herramienta creada para tal fin.

I₁C₁R₂: Coste de ejecución €/m²

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A		Alternativa B	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción €/m ²	X max. ⁽²⁾ Satisfacción €/m ²	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾ . €/m ²	Valor	X ind ⁽³⁾ . €/m ²	Valor
Cimentación	21	10	Descendente Cóncava	2	0.5	15	14.9	0.34	10.77	0.88
Estructura	188	26				107	34.9	0.94	173.74	0.01
Cerramiento	145	30				87.5	32.3	0.97	43.4	0.85
Cubierta	80	12				46	34.4	0.58	34.4	0.58
Pavimento	50	13				31.5	31.7	0.32	36.04	0.19
Total⁽⁴⁾							0.63		0.502	

Tabla 6.18. Valor del indicador I₁C₂R₁ para la alternativa A y B

(1)-(2). Valores obtenidos de la tabla 4.17

(3) Valores obtenidos de la tabla 6.13

(4). El valor total es el promedio de los 5 componentes en cada alternativa. Es posible realizar el proceso analítico de jerarquía para seleccionar la preferencia de alguno de ellos.

A continuación se detallan las funciones que caracterizan cada componente en el indicador costes de ejecución. El recuadro que aparece en la parte derecha indica el valor obtenido en cada indicador por cada alternativa.

Función de valor de la Cimentación para el indicador costes de ejecución

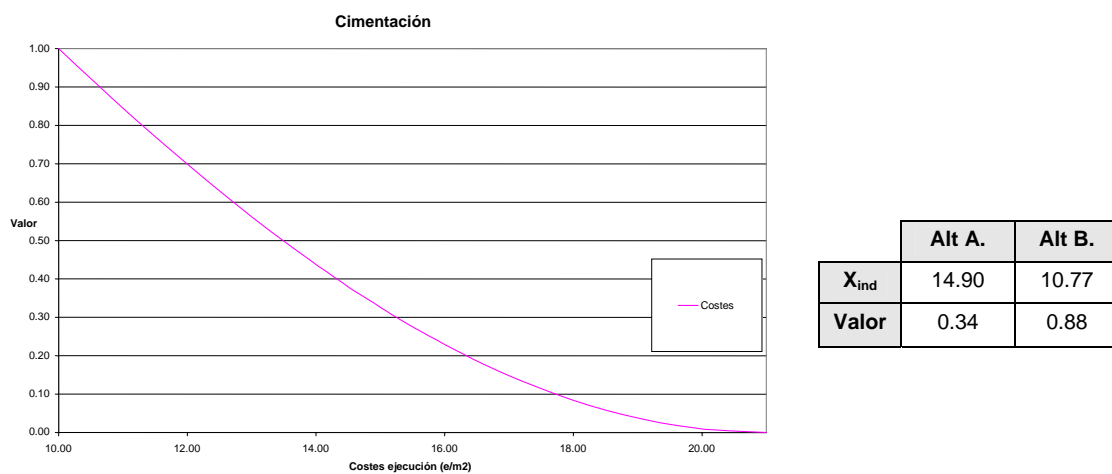
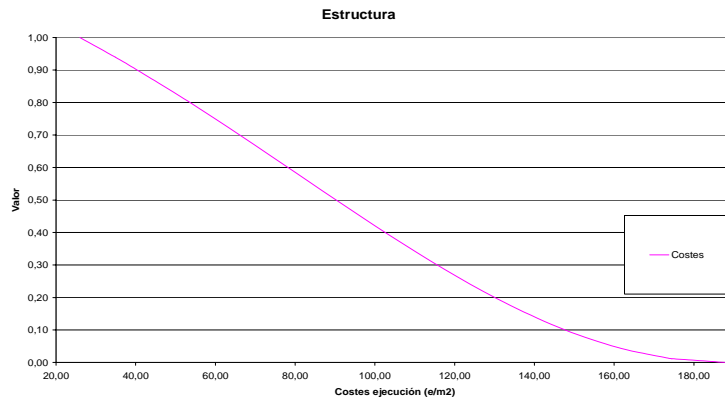


Figura 6.2. Función de valor para el indicador I₁C₁R₂ en el componente cimentación

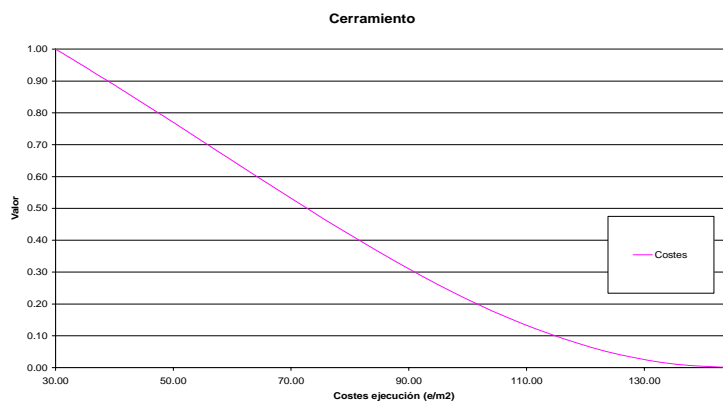
Función de valor de la estructura para el indicador costes de ejecución



	Alt A.	Alt B.
X_{ind}	34.90	173.74
Valor	0.94	0.01

Figura 6.3. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente estructura

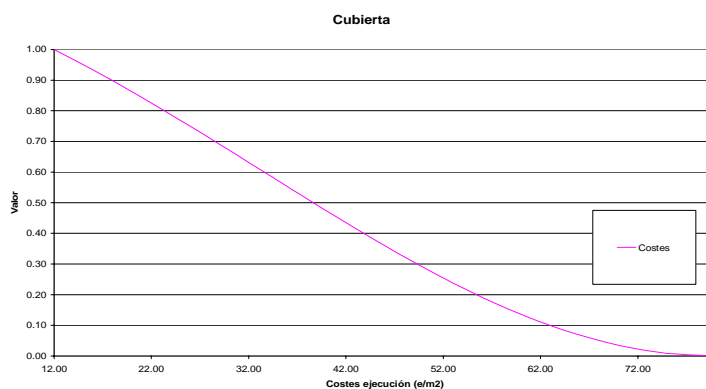
Función de valor del cerramiento para el indicador costes de ejecución



	Alt A.	Alt B.
X_{ind}	32.3	43.4
Valor	0.97	0.85

Figura 6.4. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente cerramiento

Función de valor de la cubierta para el indicador costes de ejecución



	Alt A.	Alt B.
X_{ind}	34.4	34.4
Valor	0.58	0.58

Figura 6.5. Función de valor para el indicador $I_1C_1R_2$ en el componente cubierta

Función de valor del pavimento para el indicador costes de ejecución

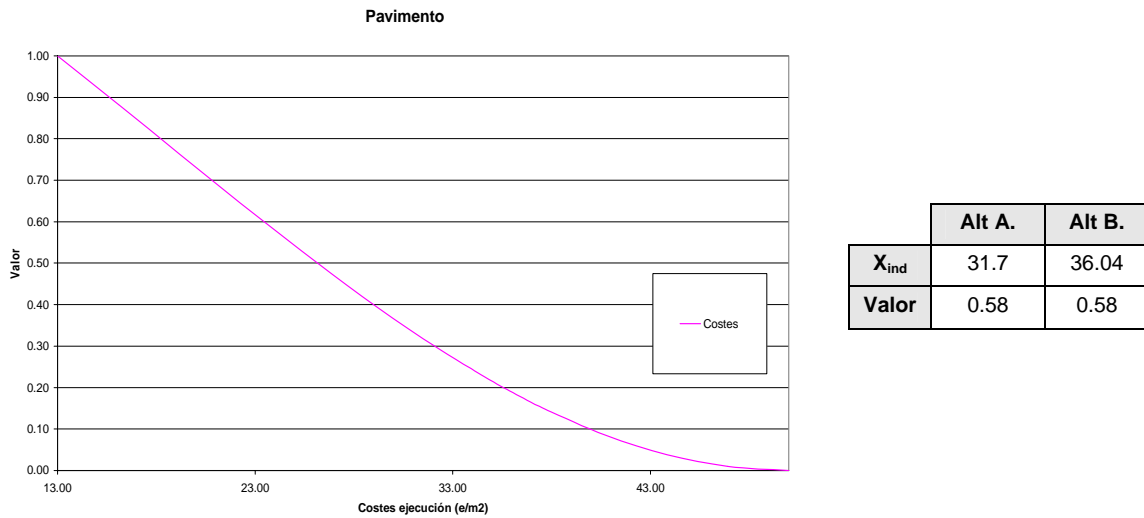


Figura 6.6. Función de valor para el indicador I₁C₁R₂ en el componente pavimento.

Como se explicó, la calificación debe realizarse para cada indicador en cada componente repitiendo sucesivamente el procedimiento. A continuación se resumen los indicadores con sus respectivas funciones para cada alternativa.

I₁C₁R₁:Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m²)

Componente	Alternativa A		Alternativa B	
	X ind ⁽¹⁾ (MJ /m ²)	Valor ⁽²⁾	X ind ⁽¹⁾ (MJ /m ²)	Valor ⁽²⁾
Cimentación	340	0	280	1
Estructura	80	1	3540	0
Cerramiento	668	0	609	1
Cubierta	609	1	609	1
Pavimento	436	1	436	1
Total⁽³⁾		0.6		0.8

Tabla 6.19 Valor del indicador I₁C₁R₁ para la alternativa A y B

- (1) Valores obtenidos de la tabla 6.7 – 6.8
- (2) Como no se tienen valores límites para la función, se toman los propios valores de las alternativas. De allí que se califique con 0 – 1 únicamente.
- (3) El valor total es el promedio de los 5 componentes en cada alternativa. Es posible realizar el proceso analítico de jerarquía para seleccionar la preferencia de alguno de ellos.

I₁C₂R₁: Uso de materiales reciclados (%)

Alternativa A

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción (%)	X max. ⁽²⁾ Satisfacción (%)	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Cimentación	0	20	Descendente Convexa	0.8	0.8	10	10	0.73
Estructura	0	20				10	10	0.73
Cerramiento	0	20				10	10	0.73
Cubierta	0	90				45	90	1
Pavimento	0	20				10	10	0.73
Total ⁽⁴⁾							0.784	

Tabla 6.20 Valor del indicador I₁C₂R₁ para la alternativa A.

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 tabla 4.15.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.9

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A

Alternativa B

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa B	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción %	X max. ⁽²⁾ Satisfacción %	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Cimentación	0	20	Descendente Convexa	0.8	0.8	10	20	1
Estructura	0	90				45	90	1
Cerramiento	0	90				45	90	1
Cubierta	0	90				45	90	1
Pavimento	0	20				10	20	1
Total ⁽⁴⁾							1	

Tabla 6.21 Valor del indicador I₁C₂R₁ para la alternativa B

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 tabla 4.15.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.10

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa B

I₁C₄R₁: % de reciclado de los residuos de construcción y demolición

Alternativa A

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción (%)	X max. ⁽²⁾ Satisfacción (%)	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes	10	60	Ascendente Convexa	0.8	0.8	35	11	0.24

Tabla 6.22 Valor del indicador I₁C₄R₁ para la alternativa A

- (1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . Ver apartado 4.4.2.6.
 (3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.11
 (4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A

Alternativa B

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa B	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción (%)	X max. ⁽²⁾ Satisfacción (%)	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes	10	60	Ascendente Convexa	0.8	0.8	35	15	0.07

Tabla 6.23 Valor del indicador I₂C₁R₂ para la alternativa B

- (1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.6.
 (3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.12
 (4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa B

I₂C₁R₂: Coste de mantenimiento (%)

Alternativa A

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción (%)	X max. ⁽²⁾ Satisfacción (%)	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes ⁽⁴⁾	5	0	Descendente Cóncava	2	0.3	2.5	2.1	0.48

Tabla 6.24 Valor del indicador I₂C₁R₂ para la alternativa A

- (1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.8.
 (3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.12
 (4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A

Alternativa B

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa B	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción (%)	X max. ⁽²⁾ Satisfacción (%)	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes ⁽⁴⁾	5	0	Descendente Cóncava	2	0.3	2.5	2.5	0.37

Tabla 6.25 Valor del indicador $I_2C_1R_2$ para la alternativa B

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.11.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.14

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa B

 $I_1C_1R_3$: Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta

Alternativa A

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes ⁽⁴⁾	1	10	Ascendente lineal	1	0.001	1	5.5	0.55

Tabla 6.26 Valor del indicador $I_1C_1R_3$ para la alternativa A

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.11.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.14

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A

Alternativa B

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes ⁽⁴⁾	1	10	Ascendente lineal	1	0.001	1	8.5	0.85

Tabla 6.27 Valor del indicador $I_1C_1R_3$ para la alternativa B

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.11.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.14

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa B

I₁C₂R₃: Grado de adaptabilidad al entorno

Alternativa A

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes ⁽⁴⁾	1	10	Ascendente lineal	1	0.001	1	5.5	0.55

Tabla 6.28 Valor del indicador I₁C₂R₃ para la alternativa A

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.13.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.15

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A

Alternativa B

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Total Componentes ⁽⁴⁾	1	10	Ascendente lineal	1	0.001	1	8.5	0.85

Tabla 6.29 Valor del indicador I₁C₂R₃ para la alternativa B

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.11.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.14

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa B

I₁C₁R₅: Grado de simplicidad del proceso constructivo

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Cimentación	0	100	Ascendente lineal	1	0.001	1	80	0.8
Estructura	0	100					70	0.7
Cerramiento	0	100					70	0.7
Cubierta	0	100					80	0.8
Pavimento	0	100					80	0.8
Total Componentes ⁽⁴⁾							76	0.76

Tabla 6.30 Valor del indicador I₁C₁R₅ para la alternativa A

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa B	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Cimentación	0	100	Ascendente lineal	1	0.001	1	80	0.8
Estructura	0	100					90	0.9
Cerramiento	0	100					90	0.9
Cubierta	0	100					80	0.8
Pavimento	0	100					80	0.8
Total Componentes ⁽⁴⁾							84	0.84

Tabla 6.31. Valor del indicador $I_1C_1R_5$ para la alternativa B

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.19.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.16

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A y B

$I_1C_3R_5$: Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa A	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Cimentación	0	15	Ascendente lineal	1	0.001	1	0	0
Estructura	0	15					6	0.40
Cerramiento	0	15					9	0.6
Cubierta	0	15					12	0.80
Pavimento	0	15					0	0
Total Componentes ⁽⁴⁾							5.4%	0.36

Tabla 6.32. Valor del indicador $I_1C_3R_5$ para la alternativa A

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.22.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.17

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A

Componente	Parámetros función de valor						Alternativa B	
	X min. ⁽¹⁾ Satisfacción	X max. ⁽²⁾ Satisfacción	Forma función	P	K	C	X ind ⁽³⁾	Valor
Cimentación	0	15	Ascendente lineal	1	0.001	1	0	0
Estructura	0	15					12	0.8
Cerramiento	0	15					15	1
Cubierta	0	15					12	0.80
Pavimento	0	15					0	0
Total Componentes							5.4	0.52

Tabla 6.33. Valor del indicador $I_1C_3R_5$ para la alternativa B

(1)- (2). Valores obtenidos del capítulo 4 . ver apartado 4.4.2.22.

(3). Respuesta de la alternativa. Ver tabla 6.17

(4). Promedio de los 5 componentes para el indicador en la alternativa A

- Cálculo del valor de las alternativas

El cálculo de valor de las alternativas como se explicó en el capítulo 3 se realiza en tres niveles:

- Cálculo del valor para indicadores
- Cálculo del valor para criterios
- Cálculo de valor para requerimientos

El cálculo de valor para los indicadores consiste en introducir el resultado que genera la alternativa en la función de valor de cada indicador. Los resultados se obtienen como se mencionó anteriormente por cada indicador en cada componente. Estos se resumen en al tabla 6.34 que a continuación se presenta.

Cálculo de valor a nivel de Indicadores	alternativa A	alternativa B
	Valor	Valor
Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²).	0.6	0.8
Uso de materiales reciclados (%)	0.784	1
% de reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD)	0.07	0.24
Coste de ejecución (€/m ²)	0.63	0.502
% Coste de mantenimiento	0.48	0.37
Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta.	0.55	0.85
Grado de adaptabilidad al entorno	0.55	0.85
Grado de simplicidad del proceso constructivo (%).	0.76	0.84
Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0.36	0.52

Tabla 6.34 Cálculo de valor a nivel de indicadores para las alternativas A y B

La evaluación a nivel de los criterios se realiza a partir de la ecuación 3.21 la cual se planteó en el capítulo tres de la presente tesis. Dicho cálculo se realiza por medio de los indicadores pertenecientes al mismo criterio. El resumen de este nivel de evaluación se muestra en las tablas 6.35 y 6.36 para cada una de las alternativas.

Alternativa A

Criterios	Indicadores	Valor indicador	W_{ijk}	Valor criterio
Consumo de energía	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²).	0.6	100%	0.6
Utilización de materiales reciclados	Uso de materiales reciclados (%)	0.784	100%	0.784
Gestión de residuos	% de reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD)	0.07	100%	0.07
Costes	Coste de ejecución (€/m ²)	0.63	60%	0.57
	% Coste de mantenimiento	0.48	40%	
Calidad de la edificación	Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta.	0.55	100%	0.55
Integración con el entorno social	Grado de adaptabilidad al entorno	0.55	100%	0.55
Constructibilidad	Grado de simplicidad del proceso constructivo en (%).	0.76	100%	0.76
Edificabilidad flexibilidad	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio en (%).	0.36	100%	0.36

Tabla 6.35 Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa A

Alternativa B

Criterios	Indicadores	Valor indicador	W_{ijk}	Valor criterio
Consumo de energía	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²).	0.8	100%	0.8
Utilización de materiales reciclados	Uso de materiales reciclados (%)	1	100%	1
Gestión de residuos	% de reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD)	0.24	100%	0.24
Costes	Coste de ejecución (€/m ²)	0.502	60%	0.45
	% Coste de mantenimiento	0.37	40%	
Calidad de la edificación	Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta.	0.85	100%	0.85
Integración con el entorno social	Grado de adaptabilidad al entorno	0.85	100%	0.85
Constructibilidad	Grado de simplicidad del proceso constructivo (%).	0.84	100%	0.84
Edificabilidad flexibilidad	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0.52	100%	0.52

Tabla 6.36 Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa B

La evaluación a nivel de los requerimientos se realiza a partir de la ecuación 3.18. Dicho cálculo se realiza por medio de los criterios pertenecientes al mismo requerimiento. El resumen de este nivel de evaluación se muestra en las tablas 6.37 y 6.38 para cada una de las alternativas.

Alternativa A

Requerimientos	Criterio	Valor criterio	W_{jk}	Valor requerimientos
Medio-ambiental	Consumo de energía	0.6	45%	0.27
	Utilización de materiales reciclados	0.784	30%	0.23
	Gestión de residuos	0.07	25%	0.018
Económico	Costes	0.57	100%	0.57
Estético	Calidad de la edificación	0.55	50%	0.28
	Integración con el entorno social	0.55	50%	0.28
Funcional	Constructibilidad	0.76	67%	0.51
	Edificabilidad flexibilidad	0.36	33%	0.12

Tabla 6.37 Cálculo de valor a nivel de Requerimientos para la alternativa A

Alternativa B

Requerimientos	criterio	Valor criterio	W_{jk}	Valor Requerimientos
Medio-ambiental	Consumo de energía	0.8	45%	0.36
	Utilización de materiales reciclados	1	30%	0.3
	Gestión de residuos	0.24	25%	0.06
Económico	Costes	0.45	100%	0.45
Estético	Calidad de la edificación	0.85	50%	0.43
	Integración con el entorno social	0.85	50%	0.43
Funcional	Constructibilidad	0.84	67%	0.56
	Edificabilidad flexibilidad	0.52	33%	0.17

Tabla 6.38 Cálculo de valor a nivel de Requerimientos para la alternativa B

- Cálculo de la alternativa óptima

En este caso como se está haciendo una evaluación general por cada alternativa, no existe un cálculo para obtener un valor óptimo, simplemente consiste en obtener la puntuación de cada plano de requerimiento a partir de la multiplicación del peso de dicho requerimiento con la suma de todos los criterios que le pertenecen. Los resultados se muestran en las tablas 6.39 y 6.40

Requerimientos	Valor Requerimientos	W_k	Valor Alternativa A
Medio-ambiental	0.52	29%	0.151
Económico	0.57	43%	0.245
Estético	0.55	10%	0.055
Funcional	0.628	18%	0.113
Total			0.564

Tabla 6.39 Valor de la alternativa A

Requerimientos	Valor Requerimientos	W_{ij}	Valor Alternativa B
Medio-ambiental	0.72	29%	0.209
Económico	0.45	43%	0.193
Estético	0.85	10%	0.085
Funcional	0.73	18%	0.132
Total			0.619

Tabla 6.40 Valor de la alternativa B

La mejor alternativa de acuerdo a los datos numéricos obtenidos es la alternativa B, no obstante, la variación no es significativa. Por lo anterior se hace necesario realizar un análisis de sensibilidad para observar la variabilidad de los diferentes parámetros y componentes caracterizados para el edificio industrial.

Para este caso, el análisis se hará solo para un componente diferencial como lo es la estructura.

- Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se hace variando los pesos otorgados a nivel de requerimientos por ser este nivel el más perceptivo a cambios en puntuación. A continuación se presentan las tablas 6.41 y 6.42 las cuales muestran las variaciones hechas y las repercusiones de cada una de ellas a las respectivas alternativas.

Este análisis se hace en el requerimiento económico y ambiental pues analizando los datos, son los valores más influyentes entre los planos de evaluación.

Alternativa A

Requerimientos	W req	Valor	W req.	Valor	W req	valor	W req	Valor
Medio-ambiental	0.22	0.11	0.12	0.06	0.15	0.08	0.02	0.0104
Económico	0.50	0.29	0.60	0.34	0.57	0.32	0.70	0.399
Estético	0.10	0.06	0.10	0.06	0.10	0.06	0.10	0.055
Funcional	0.18	0.11	0.18	0.11	0.18	0.11	0.18	0.1130

Tabla 6.41. Sensibilidad de pesos para la alternativa A

Alternativa B

Requerimientos	W req	Valor	W req.	Valor	W req	valor	W req	Valor
Medio-ambiental	0.22	0.16	0.12	0.09	0.15	0.11	0.02	0.014
Económico	0.50	0.23	0.60	0.27	0.57	0.26	0.70	0.315
Estético	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09
Funcional	0.18	0.13	0.18	0.13	0.18	0.13	0.18	0.13

Tabla 6.42. Sensibilidad de pesos para la alternativa B

Si se analizan las tablas y debido a que el requerimiento económico tiene asignada la mayor ponderación este factor es totalmente influyente. En la tabla 6.41 se muestra que si se consigue una variación de hasta el 60% para la alternativa A en el plano económico, esta alternativa iguala en puntuación a la alternativa B, no obstante, si se tiene un porcentaje de 80% en el plano económico para la alternativa A esta alternativa supera en valor a la alternativa B por poca diferencia lo que implica que a pesar de que tenga mayor peso el plano económico no basta solo con variar este plano sino hay que hacer una variación y estudio respecto a los demás planos. Como bien se observa habría que variar casi hasta el 80% el plano económico para alcanzar la puntuación igual a la de la alternativa B.

Enfoque 2: Puntuación para el componente estructura

Este enfoque propuesto en el apartado 6.2.2.3. de esta tesis, consiste en determinar el factor diferencial más representativo respecto a los componentes evaluados. Para este caso el componente diferencial es "la estructura" por las condiciones inicialmente planteadas respecto al terreno, al peso de la estructura y al entorno en el cual se va a ubicar. A continuación se expone el proceso de evaluación.

- Ponderación

Como estos valores se obtuvieron en etapas precedentes se toman los mismos porcentajes de evaluación en cada nivel del árbol de requerimientos para hacer homogénea la comparación. Ver la tabla 6.6.

- Respuesta de la alternativa

La respuesta de la alternativa se basa en los valores obtenidos en los apartados precedentes. A continuación en la tabla 6.43 se hace un resumen de las respuestas obtenidas para cada indicador en su correspondiente alternativa y en el componente estructura.

Indicador	Alternativa A	Alternativa B
Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²)	2.911	5475.2
Uso de materiales reciclados (%)	20	90
% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).	11	15
Coste de ejecución en (€/m ²)	34.90	173.54
Coste anual de operación mantenimiento (%)	2.1	2.5
Calidad de los materiales usados en cerramiento y cubierta	0.55	0.85
Grado de adaptabilidad al entorno	0.55	0.85
Porcentaje de simplicidad del proceso constructivo.	0.76	0.84
Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0.36	0.52

Tabla 6.43. Respuesta de las alternativas A y B

- Construcción de la función de valor

La función de valor se construye para cada indicador y como se explicó previamente se construye en base a los límites de mínima y máxima satisfacción, a la respuesta de la alternativa para dicho indicador y a la forma que pueda adoptar.

A diferencia de la calificación general expuesta en el apartado anterior, los límites para evaluar por componentes varían en función de las alternativas que se desean evaluar. Este es el caso del indicador % de reciclado de materiales puesto que antes el límite se hacía independientemente para cada alternativa. Por ejemplo para el porcentaje de reciclado del hormigón se tomaba hasta un máximo de 20% mientras que el de acero se tomaba hasta un 90% , no obstante al hacer la evaluación por componentes el valor límite de máxima satisfacción se toma hasta el 90% lo cual hace que cambie significativamente el valor del hormigón respecto al acero.

A continuación se exponen las tablas 6.44 y 6.45 que resumen las características de cada función respecto a su indicador.

Indicadores	Características función de valor						Alternativa
	X mín. satisfacción	X. max satisfacción	Forma	P	K	C	Xalt A
Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²)	2911.15 ⁽¹⁾	5475.2 ⁽¹⁾	Lineal descendente	1	Aprox 0	2912	2911.15
Uso de materiales reciclados (%)	0	90	Convexa ascendente	0.8	0.8	45	10
% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).	10	60	Convexa ascendente	0.8	0.8	35	11
Coste de ejecución en (€/m ²)	26	188	descendente cóncava	2	0.5	107	34.9
Coste anual de operación mantenimiento (%)	0	5	descendente cóncava	2	0.3	2.5	2.1
Porcentaje de simplicidad del proceso constructivo.	0	100	Lineal ascendente	1	Aprox 0	1	70
Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0	15	Lineal ascendente	1	Aprox 0	1	6

Tabla 6.44. Características de la función de valor para la alternativa A

(1) Definido por medio de los valores de las alternativas.

Indicadores	Características función de valor						Alternativa
	X mín. satisfacción	X. max satisfacción	Forma	P	K	C	Xalt B
Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²)	2911.15 ⁽¹⁾	5475.2 ⁽¹⁾	Lineal descendente	1	Aprox 0	Aprox. 2911.15	5475.2
Uso de materiales reciclados (%)	0	90	Convexa ascendente	0.8	0.8	45	90
% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).	10	60	Convexa ascendente	0.8	0.8	35	15
Coste de ejecución en (€/m ²)	26	188	descendente cóncava	2	0.5	107	173.54
Coste anual de operación mantenimiento (%)	0	5	descendente cóncava	2	0.3	2.5	2.5
Porcentaje de simplicidad del proceso constructivo.	0	100	Lineal ascendente	1	Aprox 0	1	90
Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0	15	Lineal ascendente	1	Aprox 0	1	12

Tabla 6.45. Características de la función de valor para la alternativa A

(1) Definido por medio de los valores de las alternativas.

Indicadores como la calidad de los materiales usados y el grado de adaptabilidad al entorno no entran en evaluación puesto que estos indicadores califican únicamente el cerramiento y la cubierta. Dicho esto se anula la calificación del requerimiento estético y por tanto se reparte el peso asignado a este equitativamente en los tres planos que se consideraran en la evaluación.

- Cálculo del valor de las alternativas

El cálculo de valor de las alternativas como se explicó en el capítulo 3 se realiza en tres niveles:

- Cálculo del valor para indicadores
- Cálculo del valor para criterios
- Cálculo de valor para requerimientos

El cálculo de valor para los indicadores consiste en introducir el resultado que genera la alternativa en la función de valor de cada indicador. Estos se resumen en la tabla 6.46 que a continuación se presenta.

Cálculo de valor a nivel de Indicadores	alternativa A	alternativa B
	Valor	Valor
Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²).	1	0
Uso de materiales reciclados (%)	0.10	1
% de reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD)	0.07	0.24
Coste de ejecución (€/m ²)	0.94	0.01
% Coste de mantenimiento	0.48	0.37
Grado de simplicidad del proceso constructivo (%).	0.7	0.9
Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0.4	0.8

Tabla 6.46 Cálculo de valor a nivel de indicadores para la alternativa A y B

La evaluación a nivel de los criterios se realiza de la misma forma expuesta en el apartado anterior de este capítulo. Dicho cálculo se realiza por medio de los indicadores pertenecientes al mismo criterio. El resumen de este nivel de evaluación se muestra en las tablas 6.47 y 6.48 para cada una de las alternativas.

Alternativa A

Criterios	Indicadores	Valor criterio	W_{jk}	Valor requerimientos
Consumo de energía	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²)	1	100%	1
Utilización de materiales reciclados	Uso de materiales reciclados (%)	0.1	100%	0.01
Gestión de residuos	% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).	0.07	100%	0.07
Costes	Coste de ejecución en (€/m ²)	0.94	60%	0.564
	Coste anual de operación mantenimiento(%)	0.48	40%	0.192
Constructibilidad	Porcentaje de simplicidad del proceso constructivo.	0.7	100%	0.7
Edificabilidad flexibilidad	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0.4	100%	0.9

Tabla 6.47 Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa A

Alternativa B

Criterios	Indicadores	Valor criterio	W_{jk}	Valor requerimientos
Consumo de energía	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²)	0	100%	0
Utilización de materiales reciclados	Uso de materiales reciclados (%)	1	100%	1
Gestión de residuos	% reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD).	0.24	100%	0.24
Costes	Coste de ejecución en (€/m ²)	0.01	60%	0.006
	Coste anual de operación mantenimiento(%)	0.37	40%	0.148
Constructibilidad	Porcentaje de simplicidad del proceso constructivo.	0.9	100%	0.9
Edificabilidad flexibilidad	Facilidad de desmontaje de los elementos del edificio (%).	0.8	100%	0.8

Tabla 6.48 Cálculo de valor a nivel de criterios para la alternativa B

La evaluación a nivel de los requerimientos se realiza a partir de la ecuación expuesta en el capítulo 3. Dicho cálculo se realiza por medio de los criterios pertenecientes al mismo requerimiento. El resumen de este nivel de evaluación se muestra en las tablas 6.49 y 6.50 para cada una de las alternativas.

Requerimientos	Criterio	Valor criterio	W_{jk}	Valor requerimientos
Medio-ambiental	Consumo de energía	1	45%	0.45
	Utilización de materiales reciclados	0.1	30%	0.03
	Gestión de residuos	0.07	25%	0.0175
Económico	Costes	0.756	100%	0.756
Funcional	Constructibilidad	0.7	67%	0.469
	Edificabilidad flexibilidad	0.4	33%	0.132

Tabla 6.49 Cálculo de valor a nivel de Requerimientos para la alternativa A

Requerimientos	Criterio	Valor criterio	W_{jk}	Valor requerimientos
Medio-ambiental	Consumo de energía	0	45%	0
	Utilización de materiales reciclados	1	30%	0.3
	Gestión de residuos	0.24	25%	0.06
Económico	Costes	0.154	100%	0.154
Funcional	Constructibilidad	0.9	67%	0.603
	Edificabilidad flexibilidad	0.8	33%	0.264

Tabla 6.50 Cálculo de valor a nivel de Requerimientos para la alternativa B

- Cálculo de la alternativa óptima

Alternativa A

Requerimientos	Valor Requerimientos	W_k	Valor Alternativa A
Medio-ambiental	0.4975	32%	0.16
Económico	0.756	46%	0.35
Funcional	0.601	22%	0.13
Total			0.64

Tabla 6.51 Cálculo de la alternativa óptima para el componente estructura alternativa A

Alternativa B

Requerimientos	Valor Requerimientos	W_k	Valor Alternativa A
Medio-ambiental	0.36	32%	0.12
Económico	0.154	46%	0.07
Funcional	0.867	22%	0.19
Total			0.38

Tabla 6.52 Cálculo de la alternativa óptima para el componente estructura alternativa B

El cálculo de la alternativa óptima se deduce de la puntuación más alta obtenida para cada alternativa. En este caso la mejor opción es la alternativa A por una variación significativa en puntaje respecto a la B. En comparación con el resultado obtenido para la evaluación global de la edificación, el conjunto difiere respecto a cada componente lo que nos induce a pensar que el componente estructural tiene una gran influencia sobre el conjunto. Debido a que el componente estructural es más costoso y tiene un mayor consumo energético hace que la alternativa B evaluándola individualmente se vea afectada específicamente por estos planos.

6.2.2.4. Control

Esta etapa de control indica que hay que tener un primordial cuidado con la selección del componente estructural porque claramente es un punto de influencia en la alternativa. Debido a que es un componente con alto coste y alto consumo energético hace que se vea afectada la evaluación global de todo el conjunto que conforman la alternativa. No obstante por factores como el peso de la estructura y el lugar en donde se cimentará se debe elegir la estructura metálica porque contribuye a que el peso se aminore a pesar de afectar otros factores como los antes expuestos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

Durante el transcurso de esta Tesis Doctoral se ha desarrollado una metodología y herramienta para evaluar diferentes alternativas de un edificio industrial sostenible a partir de un "índice de valor". Este índice se especifica en base a diferentes elementos matemáticos (teoría de decisión, análisis de valor) que dan soporte riguroso a la metodología establecida y así mismo preparan las bases para la implementación de un programa informático de fácil y amigable uso.

Bajo esta perspectiva son dos los objetivos principales de este capítulo; por un lado, presentar las conclusiones generales de este trabajo de investigación y por otro, exponer futuras líneas de estudio en las que poder continuar el camino emprendido.

Para estructurar este capítulo en primer lugar se plantean las conclusiones generales respecto a los objetivos iniciales propuestos. Posteriormente, se enuncian las conclusiones específicas obtenidas por cada capítulo y, finalmente, se hacen sugerencias respecto a las futuras líneas de investigación.

7.2. CONCLUSIONES GENERALES

A la vista de la presente tesis doctoral cabe afirmar que tanto el objetivo general como los objetivos específicos expuestos en el capítulo uno se han cumplido de forma muy favorable.

Así, en primer lugar, se hizo una revisión del estado del conocimiento enfocado desde la perspectiva sostenible, su implicación en el edificio industrial para llegar finalmente con la aplicación de estos conceptos a una evaluación sostenible. Para los mecanismos de evaluación en cuestión, se homogenizaron los distintos criterios y metodologías además de hacer un análisis crítico de sus ventajas y limitaciones.

A su vez, con el análisis de las herramientas existentes, se desarrolló una metodología para seleccionar la alternativa más óptima en el edificio industrial desde el punto de vista de diseño. Esta metodología se basó en un modelo de tres ejes los cuales constituyeron el alcance del proyecto (requerimientos, componentes y ciclo de vida). Adicionalmente, se hizo uso de diferentes técnicas matemáticas como lo es el análisis multiatributo y el análisis de valor las cuales ayudaron a tratar con mayor rigor el problema de toma de decisión.

Este proceso de toma de decisión permitió estructurar el problema de manera coherente y ordenada llegando a obtener un "índice de cuantificación" atendiendo al ciclo de vida de los materiales y a los diferentes elementos que lo componen.

En capítulos posteriores se caracterizaron y analizaron las variables más relevantes que integran el edificio industrial. No obstante, dichas variables constituyen tan solo la base inicial o armazón que describen de manera muy próxima, las necesidades planteadas para este tipo de edificación.

Posteriormente con la metodología expuesta, se hizo un programa informático fácil y de amigable uso al usuario en visual Basic. Este programa lleva a través de diferentes fases (determinadas por el proceso de toma de decisión sobre el cual se enmarca la metodología) a la obtención de un valor para seleccionar la alternativa más óptima o bien para calificar el diseño del edificio respecto a su conformación final.

Para finalizar este trabajo de investigación, se planteó la aplicabilidad de la metodología y herramienta a un caso real el cual consistió en la construcción de una Terminal y reparación de autobuses. De este modo, quedó demostrado la viabilidad y las ventajas de su aplicación en el ámbito de estudio.

7.3. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

7.3.1. Conclusiones acerca del estado del conocimiento

En el estado del conocimiento, se hizo un análisis acerca de las metodologías y herramientas existentes para evaluar edificios sostenibles llegando a las siguientes aseveraciones:

- No existen metodologías que además de evaluar diferentes alternativas, guíen al decisor en el análisis y solución de problemas en el entorno sostenible para la edificación industrial.
- Las herramientas analizadas manejan una gran cantidad de información, lo cual puede desincentivar su aplicación durante la fase de diseño.
- Las herramientas se centran, fundamentalmente, en la vertiente medioambiental, habiendo pocas o ninguna referencia a asuntos sociales, estéticos, funcionales, etc.
- Por la complejidad que encierra la fase de diseño, no se conoce ninguna herramienta que caracterice y evalúe edificios industriales durante la fase de diseño.

7.3.2. Conclusiones acerca del marco conceptual (bases de la metodología)

De este capítulo se pueden concluir que la estructura de la metodología cuenta con gran rigor científico por la consecución lógica en que se desarrolla y por la utilización de técnicas existentes.

- La decisión del estudio se enfatiza en el "edificio industrial" propiamente dicho y no en el polígono industrial o parcela en que se pueda situar. En dicho caso se considerarían decisiones de pre-evaluación.
- Las alternativas definidas para el edificio industrial se toman como un dato de entrada por las limitaciones económicas que implica cualquier modificación.
- La metodología se basa en un modelo que engloba tres ejes: requerimientos, componentes y ciclo de vida lo que permite incorporar las diferentes necesidades del proyecto desde diversas perspectivas sostenibles. De la intersección de estos tres ejes se construye el árbol de requerimientos.

- El proceso de evaluación de la metodología incluye cinco etapas: ponderación de pesos, parámetro de respuesta de las alternativas, construcción de la función de valor, cálculo del valor de las alternativas y cálculo de la alternativa óptima.
- La estimación de los pesos o ponderación se hace escalonadamente para cada nivel de jerarquía de tal manera que ascendiendo en cada uno de ellos, se llega a obtener el valor final de los objetivos a evaluar. Para ello se hace uso de la metodología de decisión A.H.P. (Analytical Hierarchy Process).
- La función de valor se describe con una ecuación lo que facilita el proceso de evaluación. Los parámetros que dependen de dicha ecuación son dados por el usuario de acuerdo al entorno sobre el cual este evaluando.
- La estructura del árbol de requerimientos, la aplicación del A.H.P para la ponderación y la construcción de la función de valor para transformar las unidades permite evaluar las alternativas más rigurosamente.

7.3.3. Conclusiones acerca de la caracterización de las variables del edificio industrial

Si bien se ha recalcado en los anteriores párrafos, las variables planteadas para el edificio industrial son las más representativas desde el punto de vista del edificio industrial, no obstante, quedan muchas otras fuera del alcance de estudio de este trabajo por la complejidad que representan y por el tipo de decisión que se establece en el mismo. De este capítulo se resumen las conclusiones específicas que a continuación se enumeran

- Se caracterizaron e identificaron las variables que influyen en la toma de decisión del diseño constructivo de un edificio industrial.
- Se expuso la situación de la industria de la construcción Española bajo la perspectiva sostenible a través de los datos obtenidos mediante la literatura, información de proyectos, etc.
- Se elaboró una primera aproximación del árbol de requerimientos, los materiales y componentes más usados en la construcción de un edificio industrial.
- Se definieron indicadores, parámetros de respuesta, funciones de valor para cuantificar las alternativas en el edificio industrial. Cabe aclarar que estas variables son meramente una primera aproximación.

7.3.4. Conclusiones acerca del marco informático amigable

En lo relativo al marco informático se puede concluir que se han creado diferentes herramientas para evaluar edificios residenciales, oficinas, etc, no obstante, no existe ninguna herramienta que califique o evalúe edificios industriales en la etapa de diseño bajo un entorno informático de fácil uso. Bajo esta premisa se puede concluir que:

- Es una herramienta de fácil y práctico uso diseñada para todo tipo de profesionales, desde aquellos dedicados al diseño de edificios industriales hasta los promotores y constructores que llevan a cabo la ejecución de los mismos.
- Es una herramienta para ser usada en diferentes ámbitos de aplicación por lo cual puede emplearse no solo en el edificio industrial si no en otras tipologías y otros sectores.
- Al ser una herramienta de fácil uso, el usuario no requiere de conocimientos específicos acerca de análisis multicriterio, o del proceso analítico de jerarquías, solo necesita tener una concepción lo más clara posible del proyecto para posteriormente valorar cada uno de los parámetros asignados al edificio industrial.

7.3.5. Conclusiones acerca de aplicación de la metodología y herramienta en un caso práctico

De este capítulo se concluyó lo siguiente:

- La validez del modelo aplicándolo, a través de la herramienta propuesta, al caso real de la construcción de una terminal y reparación de autobuses.
- De los resultados obtenidos en el caso práctico cabe destacar que, pese al esfuerzo de obtener una índice de cuantificación final, los resultados no son absolutos, es decir, aunque se pueda obtener que una alternativa es mejor que otra, se debe tener presente el carácter relativo de estos resultados debido a la dificultad de valoración de muchos parámetros (especialmente los cualitativos).

7.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se ha estudiado una metodología para evaluar edificios industriales durante la fase de diseño y dadas las perspectivas creadas desde esta línea de investigación sería conveniente:

- Aplicación de análisis de valor a otros campos o disciplinas diferentes al edificio industrial.
- Hacer un análisis concienzudo de los variables propuestas al edificio industrial. Como se ha planteado a lo largo del desarrollo de esta tesis, la propuesta desarrollada en el capítulo 4 respecto al árbol de requerimientos es meramente un armazón y un bosquejo. En el futuro se necesitaría un completo, pero a la vez, sencillo árbol de requerimientos de tal manera que describan cada una de las variables. Esta aproximación debiera acoplarse con otras propuestas desarrolladas para cada uno de los componentes expuestos.
- Actualmente la metodología hace una descripción somera sobre la incertidumbre y el riesgo lo que conlleva a que se hagan futuras mejoras respecto a este tema
- Al comienzo de la tesis se definió el alcance de la propuesta el cual cobijaba la decisión respecto al edificio industrial , de cara a futuro se puede desarrollar decisiones respecto a la localización óptima de áreas industriales, decisiones respecto al polígono o a la parcela en que se desea ubicar una industria.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

AENOR, (2000).Guía para la implantación de proyectos. Ed. AENOR. (Traducción de "Le manegement de projet. Principes et pratique", AFNOR,1998).

Alavedra, P.; Domínguez, J.; Serra J. (1998). La construcción sostenible. El estado de la cuestión. Habitat, boletín.4. Informes técnicos de la construcción. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.

Al – Subhi, K.M. (2001). Aplication of the A.H.P. in project management. Internacional Jornal of Project management. Vol 19, pp 19 – 28.

Ang, A.H.; Tang, W.H. (1984). Probability concepts in engineering planning and design, vol II, Wiley, New York.

Aragonés, P.; Gómez, E. (1997). Técnicas de ayuda a la decisión Multicriterio. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de proyectos de ingeniería Civil. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.

Arancibia, S.; Contreras, E.; Mella, S.; Torres, P.; Villalba, I. (2003). Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva. Universidad de Chile.

Arismendi, L.J. (1993). Instalaciones urbanas. Tomo III. Infraestructura energética y de comunicaciones. Librería Editorial Bellisco. Madrid.

Asimow, M. (1962). Introduction to Desing, Prenice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Avila, R. (2000). El AHP (Proceso analítico Jerárquico y su aplicación para determinar los usos de las tierras). Proyecto regional "Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible". FAO. Santiago de Chile.

Baldwin, R. (1996). Environmental Assessment and Management of Buildings. The UK viewpoint, Report 7150/1 for consultation, BSRIA).

Bana, C.A.; Vansnick, J.C. (1994). MACBETH. An interactive path towards the construction of cardinal value functions. International transactions in operations research 1,4. pg 489-500.

Blanca, D. (2001). Estudio de la aplicabilidad de los métodos de toma de decisión en el diseño constructivo. Tesina de especialidad. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Directores de tesis: Aguado de Cea Antonio, Ormazabal Gaizka.

Bordeau, L. (1996). Environment and Building in France, CIB w82 Commission Meeting.

Brans, J.P.; Vincke, P. (1985). A preference ranking organization method. Management science, vol. 31(6), pp 647 – 656.

Building Research Establishment (BRE) (1990). Building Research Establishment Environmental Assessment for new office designs, BE, Garston, Watford.

Building Research Establishment (BRE) (1990). Towards a framework for environmental assessment of buildings materials and components. Edited by J.W. Llewellyn and S. Edwards.

Cañabate, A. (1997). Toma de decisiones. Análisis y entorno organizativo. Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya.

Casado, N. (1996). Edificios de alta calidad ambiental (Ibérica, alta tecnología. ISSN 0.211-0776).

Cheung, S.; Lam, T.; Leung, M.; Wan, Y. (2001). An analytical hierarchy process based procurement selection method. Construction management and economics. Vol 19, pp 427 – 437.

Charnes, A.; Cooper, W. (1961). Management Models and Industrial applications of linear programming. John Wiley & sons. New York. Kluwer publishers, Boston.

Chau, C.; Lee, W.; Yik, F.; Burnett, J. (2000). Towards a successful voluntary Building Environmental Assessment Scheme. Construction Management and Economic. vol 18, pp 959 – 968.

Clarke, S.; Morris, N.; Rhodes, M. (2000). Managing engineering for a sustainable future. How can engineers change their education, training and policy – making processes to help shape a sustainable environmental future?. *Engineering management journal*. December 2000.

Cole, R. (1998). Emerging trends in building environmental assessment methods. *Building Research and Information*. vol 26(1), pp 3 – 16.

Cole, R. (1999). Building environmental assessment methods: Clarifying intentions. *Building and Information*. vol 27(4/5), pp 230 – 246.

Cole, R. (2000). Building environmental assessment methods. *Assessing Construction Practices. Construction Management and economics* vol 18, pp 949 – 957.

Comisión Europea. Dirección general XIII (1995). Value management –handbook. Traducción: ACAV. *Associació Catalana d'Anàlisi del Valor* (1996)

Crawley, D.; Aho, I. (1999). Building environmental assessment methods: applications and development trend. *Building Research and Information*. Vol 27(4/5), pp 300 – 308.

CRISP (2001). A European Thematic Network on Construction and City Related Sustainability Indicators. *System of Sustainability Building*.

Curwell, S.; Hamilton, A.; Cooper, I. (1998). Research information. The BEQUEST (Building Environmental Quality Assessment for sustainability through Time) network: towards sustainable urban development. *Building Research & Information*. Vol 26(1). Pp 56 – 65.

Daumal, F.; García, G. (1978). "La energía y el ciclo vital del edificio". (CAU n.50, pp 30-37.)

Dell'isola, A. (1997). Value engineering. Practical Applications for design, construction, maintenance & operations. Ed. RS Means.

Diez, J.A.; Redondo, C.; Barreiro, B. (1997). Ayuda a la decisión: un nuevo instrumento de gestión. Universidad Santiago de Compostela, servicio de publicaciones e intercambio científico.

Edwards, B. (1999). Sustainable Architecture. *European Directives & Building Design* (Oxford: Architectural Press, 1996 (Se cita la segunda edición de 1999))

Finch, E. (1992). Environmental Assessment of Construction Projects. *Construction Management and Economics*. vol 10, pp 5 – 18.

Flament, M. (1999). Glosario Multicriterio. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. UNESCO

Gal, T; Stewart, T; Hanne, T. (1999). Multicriteria decision making: Advances in MCDM models, algorithms theory and applications. Kluwer academic publishers.

Garrucho, I. (2006). Desarrollo de una metodología para el proceso de diseño sostenible de edificaciones industriales bajo requerimientos medioambientales. Tesis doctoral (en curso). Escuela técnica superior de ingenieros industriales. Universidad del país vasco. Director de la tesis: Tomas San José.

Gass, N; Muller, A. (1999). " A multicriteria Decision Model to Compute Optimal Treatment Packages Under Constrain Conditions". Methods of Psychological Research Online. Vol 4, N. 3.

Gerard, C; Chatagnon, N.; Achard, G.; Nibel, S. (2000). Escale: a method for assessing the environmental quality of buildings at the desing stage. 2^{ème} conf. Internationale sur l'Áide à la Decision dans le domaine Génie Civil et Urbain. Lyon(France),20 – 22 nov.

Glauman, M.; Malm, T.; Larsson, J. (1999). Evaluation of green building Sweden. Building Research & information. Vol 27 (4/5), pp 276 – 285.

Goicochea, A. (1991). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. UNESCO (Buenos Aires).

Gomes, L.; Lima, M. (1992). From modelling individual preferences to multicriteria ranking of discrete alternatives: a look at prospect theory and the additive difference model. Foundations of computing and decision sciences. Vol 17(3).

Gremio de Entidades del Reciclaje de Derribos (GERD). El sector del Reciclaje de los RCD en España y sus perspectivas. ConcretOnline. (2003).

Guy, G.; Kibert, C. (1998). Developing indicators of sustainability: US experience. Building Research & Information. Vol 26 (1), pp 39 – 45.

Haimes, Y.; Hall, W. (1974). Multiobjectives in water resources systems analysis: the surrogate trad-off method. Water resources research. Vol 10 (4), pp 615 – 624.

Heredia, R. (1981). Arquitectura y urbanismo industrial. Diseño y construcción de plantas, edificios y polígonos industriales. Sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Publicaciones de la cátedra construcciones industriales.

Herrerías, R.; Pérez, E. (1991). Estimación de una distribución BETA como modelo para su utilización en el método PERT. V reunión anual de ASEPELT-ESPAÑA. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Hill, R; Bowen, P. (1997). Sustainable Construction: Principles and framework for attainment. Construction management and Economics. Vol 15, pp 223 – 239.

Huovila, P. (1999). On the way towards sustainable Building. Conference. Sharing Knowledge On Sustainable Buildings. BARI, Dic 16 – 17 1999.

Huovila, P. Sunikka, M; Curwell, S. Sustainability Assessment of building design, construction and use.

Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) (1999). Guía de la edificación sostenible. Calidad energética y Medioambiental en Edificación. Ministerio de fomento, Instituto Cerdá.

Instrucción técnica complementaria. ITC –BT-10. Previsión de cargas para suministros de baja tensión. Reglamento Electrotécnico de BT (RD 842/2002, de 2 de agosto).

Jimenez, A. (2003). Generic multi-attribute analysis system. (GMAA). Tesis doctoral. Departamento de ingeniería artificial. Facultad de informática. Universidad Politécnica de Madrid. Director de tesis. Rios, Sixto.

Jones, J.C. (1963). A method of systematic design, en conference on Design Methods. Pergamon, Oxford, pp 53 – 73.

Keeney, R.L; Raiffa, H. (1976 y 1993). Decisions with multiple objectives. Preferences and value tradeoffs. Wiley, New York (1ª edición) y Ed. Cambridge University Press (2ª edición).

Kibert, C. (1994). CIB – TG16, First International Conference on Sustainable on Construction, Florida.

León, O (1993). Análisis de decisiones. Técnicas y situaciones aplicables a directivos y profesionales. Ed. McGraw Hill. Madrid.

Lippiatt, B. (1999). Selecting Cost – Effective Green Building Products:BEES Approach. Journal of construction engineering and management.. vol 125 6), pp 448 - 455.

Lopez, V. (2001). Desarrollo sostenible. Aproximación conceptual y operativa de los principios de Sostenibilidad al Sector de la Construcción. Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción. Escuela técnica superior de ingeniería de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Director de la tesis. Alavedra, P.

Los verdes (2005). Desastres naturales. www.infoecología.com. Madrid.

Manga, R. (2005). Una nueva metodología para la toma de decisión en la gestión de la contratación de proyectos. Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Directores de la tesis: Aguado, A. ; Ormazabal, G.

Mazria, E. (1979). The Passive Solar Energy (Emmaus: Rodale Press Inc. (Se cita la traducción castellana, El libro de la energía solar pasiva México. Gustavo Gili (1983)).

Norris, G; Marshall, H (1995). Multiattribute decision analysis method for evaluating buildings and building systems. NISTR 5663, U.S dept. of commerce. National Institute of standards & technology.

Ofori, G. (1998). Sustainable construction: principles and framework for attainment – comment. Construction management and economics. Vol 16. pp 141 – 145.

Ormazabal, G. (2001). Un Nuevo sistema integrado de toma de decisión para la gestión de proyectos constructivos". Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Director de la tesis: Aguado, A.

Páez, A.; Torroja, E. (1952): La determinación del coeficiente de seguridad en las distintas obras, Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, Madrid.

Pfanzagl, J. (1968). Theory of measurement. New York. John Wiley & sons.

Presti, S. (2002). Reciclaje de materiales y conservación de energías. Reciclar no es nada nuevo, lo que es nuevo es la necesidad de reciclar. Hábitat Urbano

Raiffa, H. (1968). Decisión Analysis. Addison – wesley, reading, mass.

Rios, S; Rios Insua, S; Rios Insua, M.J. (1989). Procesos de Decisión Multicriterio. EUDEMA S.A. (Ediciones de la Universidad Complutense de Madrid).

Romero, C. (1992). Teoría de la decisión multicriterio. Conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza, España.

Roodman, D.; Lenssen, N. (1995) A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns Are Transforming Construction (Washington: World Watch Institute. (se cita la traducción castellana, Revolución en la construcción, Bilbao: Bakeaz (1997))

Saaty, T. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology 15,3. pp 234 – 281.

Saaty, T; Kearns, K. (1985). Analytical planning. The organization of systems. International series in modern applied mathematics and computer science.

Saaty, T. (1998). Evaluación y decisión multicriterio, reflexiones y experiencias. Junio 1998.

Saaty, T. (2000). Fundamental of decisions making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process. RWS Publications. University of Pittsburgh. U.S.A.

Saaty, T.L. and M. Ozdemizer (2003). "Why the magic number seven plus or minus two" . Mathematical and computer Modelling, Vol 38,pp 233-244.

Saaty, T (2004). Decision making. The analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). Journal of systems science and systems engineering. Vol 13, N. 1, pp 1 – 34. March, 2004.

SEOPAN (2000). "Informe trimestral sobre el sector de la construcción" (los cuatro trimestres del año). www.seopan.es

Sjostrom, C; Bakens, W. (1999). CIB. Agenda 21 for sustainable construction: why, how and what. Bulding Research & Information. Vol 27(6). Pp 347 – 353.

Smith, P. (1999). Funcional use analysis. Best & De valence. Ed. Arnold.

Stigum, B.P & Wenstop, F (1983). Foundations of risk and utility theory with applications. Ed. Reidel dordrecht.

Todd, J.; Crawley, D.; Geissler, S.; Lindsey, G. (2001). Comparative assessment of environmental performance tools and the role of the Green Building Challenge. Building Research & Information. vol 29(5). pp 324 – 335.

Tood, J.; Gesissler, S. (1999). Regional and cultural issues in environmental performance assessment for buildings. Building Research and Information. Vol 27(4/5), pp 247 – 256.

Trusty, W (2001). Life Cycle Assessment (Athena Institute). An oral presentation at NRC VTT seminar; Ottawa 16 jan 2001.

Vale, B.; Vale, R (1991) Green architecture. Design for a sustainable future (London: Thames & Hudson).

Vásquez, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. Informes de la construcción, vol 52. n. 471.

Vincke, P. (1992). Multicriteria Decision Aid. John Wiley & Son Ltd, chichester

Von Winterfeldt, D; Edwards, W. (1986). Decision analysis and behavioural research. Cambridge University Press, Cambridge, England.

Wong, E.; Norman, G.; Flanagan, R. (2000). A fuzzy stochastic technique for project selection. Construction Management and Economics. Vol 18 (4), pp 407 – 414.

Woolley, T.; Kimmins, S.; Harrison, P.; Harrison, R. (1997) .Green Building Handbook (London: E & FN Spon).

Wyatt, D.; Gilleard, J. (1994). Deconstruction; an environmental response for construction sustainability. In proceedings of the first Internacional Conference of CIB TG 16 on Sustainable Construction, Tampa, Florida, 6 – 9 November, pp 113-122

WWF (1993). The Built Environment Sector, Pre-Seminar Report. Council for Environmental Education WWF, Department of Environment, De Monfort University Leicester)

Yu, P.L (1985). Multiple – Criteria Decisión Making: Concepts, Techniques, and Extensions. Plenum Press Mew.

Zionists, S.; Wallenius, J. (1976). An interactive programming Method for Solving the Multiple Criteria Problem. Management science, vol 22 (6).

Nota: A continuación se citan algunas referencias obtenidas de Internet

<http://www.sustainable.doe.gov/greendev/tools/shtml#GB>

<http://www.bfrl.nist.gov/oe/publications/nistirs/6916.pdf>

<http://www.bre.co.uk/services/sustainableconstruction.html>

<http://cic.vtt.fi/eco/viikki/>

http://cic.vtt.fi/eco/eng_ecopro.htm

<http://www.greenbuildingadvisor.com/>

http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software/lisa.html

http://www.argetq.at/zertifik.at/materialien/tq:basicbuilding_oslo.pdf

<http://www.surveying.Salford.ac.uk/bqtoolkit/>

<http://www.lenntech.com/espanol/di%C3%B3xido%20de%20carbono.htm>

<http://www.spainqbc.org/>

www.iisbe.org

ANEXO A

PROCESO ANALÍTICO DE JERARQUIZACIÓN "THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)"

A.1. GENERALIDADES

La toma de decisión implica fijar prioridades y el proceso analítico de jerarquía (AHP) es una metodología para hacer esto. Esta toma de decisión involucra la elección de alternativas y criterios los cuales a su vez, necesitan ser priorizados.

En el AHP, se representan los elementos de un problema jerárquicamente, organizándolo en pequeñas partes, las cuales expresan la intensidad o impactos de los elementos en la jerarquía. Estos juicios o intensidades posteriormente son trasladados a números.

El AHP, incluye procedimientos y principios usados para sintetizar muchos de estos juicios de los cuales se derivan prioridades entre los criterios y subsecuentemente las alternativas que se desean elegir. Los juicios recogidos de las personas se toman cualitativos y los valores de escala correspondiente se asignan a ella.

La evaluación cualitativa se basa en los sentimientos y experiencias de personas ya que el individuo dibuja y articula su creatividad, y es entonces cuando los juicios y su intensidad pueden ser usados para expresar sus sentimientos e inclinaciones.

Esta aproximación de diseñar sistemas y resolver problemas sobre la capacidad innata de los humanos de pensar lógica y creativamente ayuda a identificar eventos y establecer la relación de cantidad entre ellos. A este respecto, la gente tiene 2 atributos comunicables: una es la habilidad de impartir y observar cosas por lo tanto comunica lo que observa. La otra es la habilidad de discriminar y establecer relaciones de la cantidad de intensidad que es observada para posteriormente ser sintetizada en estas relaciones. Esta capacidad humana se ve reflejada en tres principios: Principio de identidad y descomposición; el Principio de discriminación y comparación de juicios y por último el Principio de síntesis.

A.2. PRINCIPIOS DEL A.H.P.

El AHP soporta su teoría en base a estos tres principios:

A.2.1. Principio de Identidad y descomposición

Este principio hace referencia a estructurar el problema jerárquicamente a través de niveles intermedios (criterios sobre los cuales los siguientes niveles son dependientes). Existen varias clases de jerarquía, la más usual es la forma de árbol con el objetivo final en la parte superior del mismo.

A.2.2. Principio de discriminación y juicios comparativos

En el AHP, los elementos de un problema son comparados en pares con respecto a su importancia relativa o a una propiedad en común. Saaty propone una escala para hacer recomendaciones. Esta escala se basa en estudios psicológicos.

A.2.3. Principio de síntesis

Es la aproximación a través de la planeación multicriterio de problemas mediante la combinación de cada nivel de jerarquía con la escala de relativa importancia asignada. Las prioridades son sintetizadas para el segundo nivel multiplicando las prioridades locales por la prioridad de su correspondiente criterio en el nivel de arriba y adicionando ellos por cada elemento en un nivel acorde a los efectos.

En este principio de síntesis se incluyen dos alternativas para hacer la evaluación:

- **Modalidad distributiva:** La modalidad distributiva es útil cuando la calidad de una única alternativa afecta su rango. El número de copias de cada alternativa también afecta la participación que cada una recibe al asignar un recurso. En la planificación, los escenarios considerados deben ser exhaustivos y por lo tanto sus prioridades dependen de cuantos hay. Esta modalidad es esencial para ordenar los criterios y subcriterios, y cuando hay dependencia. Para esta modalidad, el vector prioridad se obtiene mediante la normalización, es decir, dividiendo cada dato por el total en su columna.
- **Modalidad ideal.** La modalidad ideal es útil para escoger una mejor alternativa sin importar cuantas alternativas similares hayan. Para esta modalidad, el vector prioridad se obtiene de dividir cada dato por el máximo valor en su columna. Ambas modalidades, se tienen en cuenta en el momento de hacer la evaluación de acuerdo al planteamiento del problema que se desea decidir.

Así como se presentan distintas modalidades para hacer la medición en el AHP, existen diferentes alternativas de medición que básicamente se diferencian por el objetivo a alcanzar y de la dependencia entre sus criterios y alternativas.

- **Medición relativa:** Se asigna una evaluación de preferencia a cada par de elementos con respecto a una propiedad que tienen en común. En la práctica esto significa que un par de elementos en un nivel de jerarquía es comparado con respecto a los elementos "madres" con los cuales ellos se relacionaban en el nivel anterior.
- **Medición absoluta:** las prioridades de un elemento son comparadas o "evaluadas" contra un estándar. En este método un elemento es comparado contra una propiedad ideal; es decir " un recuerdo" de esa propiedad. En general, solo las alternativas finales de una elección son medidas en forma absoluta.
- **Medición benchmark :** En vez de usar intensidades, podemos comparar todas las alternativas con respecto a alternativas bien conocidas llamadas benchmarks (modelos de comparación, puntos de referencia) que son diferentes y van desde lo mejor a lo peor para cada criterio.

A.3. ESCALA DEL AHP Y SU JUSTIFICACIÓN

El proceso analítico de jerarquización (AHP) incluye ordenar alternativas adecuadamente en una escala de proporciones lo cual hace posible asignar recursos y escoger una mejor alternativa. Una escala de prioridades basada en la preferencia es la manera del AHP para estandarizar las escalas no únicas y así poder combinar los criterios múltiples.

La escala del AHP es una escala de números absolutos usada para responder las preguntas básicas en una comparación por pares. Por ejemplo que dominio tiene un elemento sobre otro?. La escala derivada obtenida de resolver un sistema de ecuaciones lineales homogéneas en los cuales sus coeficientes son números absolutos, es también una escala absoluta de números. Los números de una escala absoluta son definidos en términos de similaridad o equivalencia.

La escala del proceso de jerarquía analítica presenta las siguientes particularidades:

- La escala puede hacer representar los diferentes sentimientos de la gente cuando ellos hacen las comparaciones. Este debe representar como sea posible las distintas percepciones de la gente.

- Si se denota la escala de valores mediante:

$$x_1, x_2, \dots, x_p, \text{ entonces } x_{i+1} - x_i = 1, i=1, \dots, p-1 \text{ por tanto,}$$

el sujeto puede otorgar todas las gradaciones al mismo tiempo. Es de notar que para que haya una consistencia y exactitud mejor, un individuo no debe comparar simultáneamente más de siete objetos (más o menos uno), por tanto $p = 7+2$. Esta teoría fue conjeturada por el psicólogo George Miller en 1950 y explicado en el AHP en 1970. Usando una unidad de diferencia entre sucesivas escalas que es lo que se permite, y usando el hecho de que $x=1$ para la comparación de la identidad se sigue que los valores de las escala ocuparan un rango de 1 hasta 9.

El AHP permite cierto grado de inconsistencia la cual es la base del aspecto confuso sobre el conocimiento. Para captar este aspecto borroso y ambiguo, se necesitan escalas de proporciones. La inconsistencia surge de la necesidad de la redundancia. La redundancia mejora la validez acerca del mundo real. Matemáticamente la medición de la consistencia debería permitir inconsistencia de no más de un orden de magnitud de 10%. Esto permitirá variaciones en la medición de elementos de que están siendo comparados, es decir, $7+2$ de allí que la máxima gradación que pueda otorgar una persona no exceda de la escala de 1 a 9. Al ser homogéneos recibirán cerca del 10 al 15% del valor relativo total en el vector de las prioridades. Una pequeña inconsistencia cambiaría ese valor por una pequeña cantidad y su valor relativo verdadero sería aún suficientemente grande para mantener ese valor.

En la práctica los juicios numéricos pueden tener aproximaciones pero la cuestión es de qué tan bien esta aproximación nos puede ayudar. No hay una teoría satisfactoria que pueda soportar los juicios con la realidad. Actualmente se usa la raíz de la desviación media (RMS) y la media absoluta de la desviación. Estos indicadores son más probablemente usados cuando se hacen comparaciones entre escalas o comparaciones de escalas interpersonales en juicios que como medidas absolutas de la calidad de ajuste.

En una escala los elementos pequeños son considerados como la unidad y uno estima cuantas veces es más importante, en términos generales, predice el dominio de uno sobre otro usando una escala fundamental. El conjunto de objetos a ser comparados debe ser homogéneo, es decir, la denominación del objeto más grande no debe ser no más de 9 veces las cosas mas pequeñas. Cosas que difieran más de este rango deben ser reunidas en grupos homogéneos y repartido usando esta escala.

Finalmente se concluye, que la escala derivada esta unida a la importancia que asignamos a los juicios.

A.4. LEY LOGARÍTMICA DE RESPUESTA AL ESTÍMULO PARA LA JUSTIFICACIÓN MATEMÁTICA DE LA ESCALA.

Al ser capaces de percibir objetos del entorno, nuestro cerebro los miniaturiza de modo que percibamos la relación proporcional que hay entre ellos. Sin proporcionalidad nosotros no podemos coordinar nuestro pensamiento con nuestras acciones ni con la exactitud necesaria para controlar el ambiente. Entre mas grande sea el estímulo, mas grande es el cambio que se necesita para que sea detectable.

Si se observa desde el punto de vista matemático, que el cociente de diferencias justas sensibles sucesivas es igual al cociente de sus valores sucesivos de los estímulos que mantienen la proporcionalidad. entonces, comenzando con estímulos sucesivos de magnitud S_0 el nuevo estímulo tomaría la siguiente forma:

$$S_1 = S_0 + \Delta S_0 = S_0 + \frac{\Delta S_0}{S_0} \cdot S_0 = S_0 (1+r)$$

$$S_2 = S_1 + \Delta S_1 = S_1(1+r) = S_0(1+r)^2 = S_0\alpha^2$$

$$S_n = S_{n-1}\alpha = S_0\alpha^n \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

Una típica respuesta a estos estímulos viene dada por la forma:

$$M_i = a \log \alpha^i, \quad i = 1, \dots, n$$

Y uno después de otro tienen la siguiente forma:

$$M_1 = a \log \alpha, \quad M_2 = 2a \log \alpha, \dots, \quad M_n = na \log \alpha$$

Si se toman los radios M_i/M_1 , $i = 1, \dots, n$ de estas respuestas a los estímulos en la cual el primero es el más pequeño y sirve como unidad de comparación, estos valores enteros de $1, 2, \dots, n$ son los que serán utilizados en la escala fundamental de Saaty.

Estos números son intrínsecos de nuestra habilidad de hacer comparaciones. En una vena menos matemática, notamos que nosotros somos capaces de distinguir ordinariamente entre alto, medio y bajo en un nivel y para un nivel inferior también somos capaces de distinguir entre alto, medio y bajo dando las nueve diferentes categorías. Nosotros asignamos el valor de uno (bajo bajo) el cual es el más pequeño y el valor de nueve (alto alto) el cual es el más alto, este espectro cubre todas las posibilidades entre los dos niveles y dando el valor de nueve para el top de la escala.

A.5. JUSTIFICACIÓN MATEMÁTICA DEL MÉTODO

Sean $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ un conjunto de actividades. El juicio cuantificado en pares de actividades C_i, C_j son representados por una matriz $n \times n$

$$A = (a_{ij}) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

Las entradas a_{ij} son definidas por las siguientes reglas

Regla 1 = si $a_{ij} = \alpha, a_{ij} = 1/\alpha, \alpha \neq 0$

Regla 2 = si C_i es juzgada para tener el mismo orden de importancia que C_j , entonces $a_{ij}=1, a_{ji}=1$; en particular, $a_{ii} = 1$ para todo i .

Así la matriz A tiene la forma:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Registrados los juicios cuantificados de los pares (C_i, C_j) como entradas numéricas a_{ij} en la matriz A , el problema ahora es asignar n contingencias C_1, C_2, \dots, C_n un conjunto de pesos numéricos w_1, w_2, \dots, w_n que pueden reflejar los juicios registrados.

En orden de hacer esto, el problema inicialmente puede ser transformado en un exacto modelo matemático. Para ello, es necesario como en cualquier problema hacer una abstracción real del mismo, con ello se refiere a que el posible y potencial usuario juzgue el valor y significado de la comparación de acuerdo a sus objetivos, alcances y al problema en sí.

Como la mayor inquietud se centra en interpretar y juzgar adecuadamente estos valores, se presenta la necesidad de describir exactamente como estos pesos pueden relacionar los juicios a_{ij} emitidos. Para hacer esta evaluación se parte del caso más simple hasta el más general en tres pasos:

Paso 1: Asumir primero que los juicios son simplemente el resultado de medidas físicas exactas. Decir que los juicios son dados a partir de una escala de precisión. Para este caso ideal en que las medidas son precisas, la relación entre los pesos w_i y los juicios a_{ij} son simplemente dados por:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad \text{para } i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} w1/w1 & w1/w2 & \dots & w1/wn \\ w2/w1 & w2/w2 & \dots & w2/wn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ wn/w1 & wn/w2 & \dots & wn/wn \end{bmatrix}$$

Sin embargo, esto puede no ser realista y sólo puede sostenerse esta relación en el caso más general. Si se supone esta rigurosa relación puede suceder que en los casos más prácticos al tratar de resolver el w_i (cuando a_{ij} es dada) no tenga solución. En primer lugar, las medidas físicas no son nunca exactas y por lo tanto puede tener desviaciones y segundo, por que los juicios humanos tienen unas considerables desviaciones.

Paso 2: en orden de ver como permitir estas desviaciones, consideramos la i ésima fila de la matriz A. Las entradas para esta fila son:

$$a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{in}$$

en el caso ideal estos valores son igual que los cocientes

$$\frac{w_i}{w_1}, \frac{w_i}{w_2}, \dots, \frac{w_i}{w_j}, \dots, \frac{w_i}{w_n}$$

por lo tanto para el caso ideal, si nosotros multiplicamos la primera entrada de este vector por w_1 , la segunda entrada por w_2 , nosotros podemos obtener:

$$\frac{w_i}{w_1} w_1 = w_i, \quad \frac{w_i}{w_2} w_2 = w_i, \dots, \frac{w_j}{w_j} w_j = w_1, \dots, \frac{w_i}{w_n} w_n = w_i$$

el resultado es una fila con las mismas entradas,

$$w_i, w_i, w_i, \dots, w_i$$

mientras que, en el caso general, nosotros podemos obtener un vector de entradas que representan una dispersión estática de valores alrededor de w_i . Esto parece por lo tanto razonable, requerir que el w_i deba igualar el promedio de estos valores. Consecuentemente, en lugar de la relación de la ecuación (1), la relación más realista para el caso más general tomaría la forma de:

$$w_i = \text{promedio}(a_{i1}w_1, a_{i2}w_2, \dots, a_{in}w_n)$$

Más explícitamente nosotros tenemos:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (i= 1,2,\dots,n) \quad (2)$$

Mientras que la relación en la ecuación 2 representa una relajación substancial de la relación estricta de la ecuación 1, aun permanecen preguntas al respecto: esta relajación es suficiente para estar seguros de la existencia de una solución, esto es, estar seguro que el problema tenga una única solución de obtener un solo peso.

Paso 3: Buscar las respuestas a las cuestiones matemáticas esenciales anteriormente planteadas. Esto es necesario para expresar la ecuación 2 de una manera más familiar. Para ello, debe buscarse un set de condiciones que describan como el vector de los pesos w puede relacionarse con las cantidades otorgadas. Primero se debe considerar la situación ideal considerada en el paso 1 en la ecuación 1. Luego, al realizar el caso real se requieren permisos para las desviaciones, estos se otorgan en el paso 2 a partir de la ecuación 2. como esto aún no es suficientemente realista ya que esta ecuación no asegura la existencia de un único vector de pesos w que pueda satisfacer dicha ecuación, entonces es necesario modificar a_{ij} de tal manera que tienda a aproximarse a w_i/w_j siendo esta una pequeña perturbación para el cociente.

Ahora como a_{ij} cambia, resulta que podría haber una solución para la ecuación 2, si n también cambia. Se denota el cambio del valor de n por λ_{\max} . entonces el problema

$$w_i = \frac{1}{\lambda_{\max}} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad i=1,\dots,n$$

tiene en retorno una solución única. Este es el bien conocido valor propio. En general, las desviaciones en a_{ij} pueden cargar largas desviaciones en λ_{\max} y en $w_i= 1,\dots,n$, sin embargo, este no es el caso para la matriz reciproca la cual satisface la las reglas 1 y 2. Para este caso se tiene una estable solución.

Ya con las ecuaciones anteriormente planteadas, se tiene una aproximación de solución para la elección del vector de prioridades que más refleja la realidad.

A.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AHP

La particularidad y rigor matemático de esta metodología quedan fuera de toda duda, así como su aportación como herramienta de toma de decisión. En este sentido, quizá una de las mayores ventajas del AHP ó (Proceso Analítico de Jerarquización) es su implementabilidad informática, lo que conlleva un uso sencillo en comparación con la dificultad teórica del método, articulando la entrada de información mediante preguntas fáciles de responder.

A pesar de las ventajas descritas, existen ciertas críticas acerca de sus axiomas. Adicionalmente se discute también la fiabilidad de los resultados basándose en la limitación de la información requerida por el método. De hecho, se le ha atribuido una falta de claridad de definición tras la aparente simplicidad de las preguntas, lo que podría llevar a juicios erróneos o superficiales.

De otra parte, el énfasis en algunos aspectos sobre la estructura matemática, ha generado una desconfianza ante la representatividad de los números introducidos en el aparato matemático de Saaty. No obstante, a pesar de que las anteriores críticas, pueden relativizarse por los prejuicios de ciertos sectores hacia los tratamientos matemáticos, debe reconocerse que la limitación de la escala introducida entre 1 y 9, puede dar lugar a inconsistencias. Además, la correspondencia entre la escala verbal y numérica es discutible al estar basada en presupuestos no comprobados. Finalmente, los pesos se calculan sin referencia a la escala de medición de los atributos.

Otra desventaja que le ha sido atribuida, es la hecha por Robusté (1987) el cual pone de manifiesto también una pérdida de confianza con el aumento del tamaño (uniformización de pesos), la incertidumbre y perturbación de las estimaciones.

En cualquier caso, a pesar de la controversia suscitada, el valor de la aportación de Saaty esta ampliamente reconocido, y su aplicación constituye un apoyo para la toma de decisión siempre y cuando las preguntas de entrada no sean ambiguas y los axiomas sean comprobables. Googwin et al (1999) distinguen cuatro puntos fuertes de la metodología; su estructuración formal, la simplicidad de la comparación por pares que introduce, la posibilidad de comprobación de la consistencia derivada de la redundancia introducida y su versatilidad.

Sin embargo, a pesar de su indudable aportación, no hay que olvidar que el AHP no introduce ninguna estructuración del problema de la toma de decisión, sino que de hecho la da por supuesta.

Las aportaciones de este método son muy numerosas, y entre las referentes a aspectos de ingeniería podrían citarse, por ejemplo, la de Robusté para la selección de alternativas de transporte, o la de Al-subhi (2001) orientada a la selección de contratistas en el ámbito de la construcción.

A.7. BIBLIOGRAFIA

Al-Subhi, K.M.(2001) .Application of the AHP in Project management. *Internacional Journal of Project Management*, v19, pp 19-28.

Blanca, D. (2001). Estudio de la aplicabilidad de los métodos de toma de decisión en el diseño constructivo. Tesina de especialidad. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Directores de tesis: Aguado de Cea Antonio, Ormazabal Gaizka.

Goodwin, P.; Wright, G. (1999). *Decisión análisis for management judgment*. Ed. John Wiley & Sons.

Ormazabal, G. (2001). Un Nuevo sistema integrado de toma de decisión para la gestión de proyectos constructivos". Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Director de la tesis: Aguado, A.

Robusté, F. (1987). Selección de alternativas de transporte con el proceso analítico de Jerarquización.: Pros y contras. Universidad de California en Berkeley.

Saaty,T.L. (1990). *The analytical Hierarchy Process"*. Ed. Willey. Nueva Cork 427-437.

Saaty, T; Kearns,K.(1985). *Analytical planning. The organization of systems*. International series in modern applied mathematics and computer science.

Saaty, T. (2004). Decision making. The analytic hierarchy and network process (AHP/AND). *Journal of systems science and systems engineering*. Vol 13,N 1, pp 1 – 34.

Saaty, T. (2004). Diapositivas "El proceso de jerarquía analítica (AHP)".

Sai-on, C., Tsun-lp, L., Mei-yung, L.,Yue-wang ,W.,(2001). An analytical Hierarchy process based procurement selection method. *Construction Management and Economics* v19.

ANEXO B

METODO ELECTRE III

B.1. GENERALIDADES

El método ELECTRE III, es una técnica de ayuda a la toma de decisión en la valoración de complicados proyectos constructivos dentro del campo de la ingeniería civil. Se basa en una clasificación jerárquica de todas las alternativas, incluso cuando pares de éstas son incomparables por no haber suficiente información para llevarla a cabo. Utiliza información cualitativa y cuantitativa durante la valorización del proyecto y utiliza unos umbrales para tener en cuenta las incertidumbres inherentes al valorar los criterios.

Como en el AHP, la comparación entre alternativas se establece por pares con respecto a cada criterio, llegando a establecer el grado de dominio de cada alternativa sobre el resto, a diferencia del AHP, el grado de dominio se basa en funciones matemáticas. El resultado que se obtiene es un orden de alternativas.

A este método se le define como modelo no-compensatorio y multicriterio (está dentro del MCDA. *Multi-Criteria Decision analysis*). Si es no – compensatorio, implica que si una alternativa es mejor que otras dos, no es necesario determinar las preferencias entre ellas. Este método se estableció inicialmente en el año 1978 por Roy. Actualmente existe una aplicación de Rogers implementada en el año 2000.

B.2. MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO

El mecanismo de funcionamiento del método es el siguiente:

- En primer lugar se debe elaborar la lista de alternativas para posteriormente seleccionar los criterios que se tendrán en cuenta. Los criterios deben reflejar las preferencias del decisor preferiblemente. Con los criterios y las alternativas se establece una matriz de valoración de criterios para cada alternativa como se muestra en la tabla b.1.

Alternativas	Criterios				
	1	2	3	j...	n...
A	$g_1(a)$	$g_2(a)$	$g_3(a)$	$g_j(a)$	$g_n(a)$
B	$g_1(b)$	$g_2(b)$	$g_3(b)$	$g_j(b)$	$g_n(b)$
C	$g_1(b)$	$g_2(d)$	$g_3(c)$	$g_j(c)$	$g_n(c)$
D	$g_1(d)$	$g_2(d)$	$g_3(d)$	$g_j(d)$	$g_n(d)$

Tabla B.1. Valoración de criterios para cada alternativa

- Posteriormente, se definen tres umbrales asociados a cada uno de los criterios: veto (v), indiferencia (q) y preferencia (p) que proporcionaran el grado de dominio entre alternativas permitiendo imprecisiones o incertidumbres en los datos iniciales. Estos umbrales podrán ser definidos como una constante numérica, o bien, como una función del cálculo para un cierto criterio de una alternativa ($g_j(d)$ por ejemplo). En resumen se tiene lo que se muestra en la tabla 3.2:

Umbral para el criterio j constante	Umbral para el criterio j función $g_j(d)$
$v_j = \text{Cte}$	$v_j(g_j(d)) = f(g_j(d))$
$q_j = \text{Cte}$	$Q_j(g_j(d)) = f(g_j(d))$
$p_j = \text{Cte}$	$p_j(g_j(d)) = f(g_j(d))$

Tabla B.2. Valores que pueden adquirir los tres umbrales

- Para poder establecer una medida de importancia relativa entre los criterios involucrados en el análisis, se recurrirá a la asignación de un peso para cada criterio. Se deben examinar los criterios por pares, estableciendo una calificación cualitativa según un valor deseable que podrían alcanzar y uno indeseable. Teniendo en cuenta estas cuatro valoraciones (dos deseables y dos indeseables) de ambos criterios, el decisor debe contabilizar el número de veces que cada criterio se resiste a cambiar hacia su polo indeseable, en el computo total de valoraciones por pares entre todos los criterios. Del cociente por el número total de combinaciones se obtiene el peso de cada criterio. Este sistema de asignación de pesos es subjetivo, por tanto dependerá de las preferencias del grupo de personas que lo lleven a cabo.

Uno de los puntos importantes de este método es la elaboración de la matriz de credibilidad, que muestra cuantitativamente, la preferencia de cada alternativa con respecto al resto de éstas. En primer lugar, se debe calcular el " índice de concordancia", $C(a,b)$, de cada par de alternativas (a y b, por ejemplo) :

$$C(a,b) = \frac{1}{W} \leq \sum_{i=1}^n w_j c_j(a,b) \quad \text{donde} \quad W = \sum_{i=1}^n w_j$$

La obtención del índice de concordancia está basada en la comparación general de los resultados de las dos alternativas sobre todo los criterios, mediante los "índices de comparación", que se calculan mediante la expresión:

$$C_j(a,b) = 1 \quad \text{si} \quad g_j(a) - q_j(g_j(a)) \leq g_j(b)$$

$$C_j(a,b) = 0 \quad \text{si} \quad g_j(a) - p_j(g_j(a)) > g_j(b)$$

$$C_j(a,b) = \frac{g_j(a) - p_j(g_j(a)) - g_j(b)}{q_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))}$$

Cuando se cumple la desigualdad, que se describe a continuación y en primer término, se aplica el "índice de concordancia", $D(a,b)$, para permitir discordancias en las relaciones de grado de dominio entre alternativas, donde el umbral de veto juega un papel fundamental :

$$g_j(b) \geq g_j(a) + v_j(g_j(a))$$

$$D(a,b) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n w_j D_j(a,b) \quad \text{donde} \quad W = \sum_{i=1}^n w_j$$

$$D(a,b) = 0 \quad \text{si} \quad g_j(b) \leq g_j(a) + p_j(g_j(a))$$

$$D(a,b) = 1 \quad \text{si} \quad g_j(b) \geq g_j(a) + v_j(g_j(a))$$

$$D_j(a,b) = \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j(g_j(a))}{v_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))}$$

Finalmente, se obtiene el índice de credibilidad", $S(a,b)$, que será el que nos proporcionará los términos de la matriz de credibilidad :

$$S(a,b) = C(a,b) - D_j(a,b) \leq C(a,b), \forall_j$$

$$S(a,b) = C(a,b) \prod_{j \in \tau(a,b)} \frac{1 - D_j(a,b)}{1 - C(a,b)}$$

Donde $\tau(a,b)$ es el conjunto de criterios para los cuales $D_j(a,b) > C_j(a,b)$. La matriz de credibilidad presentará la siguiente estructura:

	a	b	c	d...
a	1	S(a,b)	S(a,c)	S(a,d)
b	1-S(a,b)	1	S(b,c)	S(b,d)
c	1-S(a,c)	1-S(b,c)	1	S(c,d)
d	1-S(a,d)	1-S(b,d)	1-S(c,d)	1

Tabla B.3. Matriz de credibilidad de las alternativas

Para poder llevar a cabo el establecimiento de un orden global de todas las alternativas se necesitan realizar dos procesos de destilación, uno ascendente y otro descendente. Ambos procesos son iterativos y la combinación del resultado de ambas llevará al ranking de alternativas en forma de árbol.

En la destilación ascendente se seleccionan inicialmente las alternativas con peor calificación en la matriz de credibilidad y se finaliza con la asignación de la mejor. En la descendente se seleccionan inicialmente las alternativas con mejor calificación y se finaliza con la asignación de la peor.

Como primera medida hay que seleccionar el/los máximos valores de la matriz de credibilidad.

$$\lambda_0 = \text{máx}[S(a,b)] \forall a,b$$

Una vez conocido λ_0 , se establece un nivel de corte (λ_1), inferior al primero, que servirá para ayudar a averiguar el grado de dominio de una alternativa sobre otra. Este nivel de corte es el mayor término de la matriz de credibilidad que se halle por debajo del valor de λ_0 menos un umbral de discriminación ($s(\lambda)$) en el citado valor máximo:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \text{máx}[S(a,b)] \forall a,b \\ &\{S(a,b) < \lambda_0 - s(\lambda_0)\} \\ s(\lambda_0) &= 0.3 - 0.15\lambda \end{aligned}$$

Con esto queda establecido que una alternativa, a, dominará a otra, b, cuando se cumpla que:

$$S(a,b) > \lambda_1 \wedge S(a,b) < S(b,a) + s(S(a,b))$$

Entonces, al comparar ambas alternativas, si la alternativa a domina a la alternativa b, obtendrá una puntuación de +1, lo cual denotará fortaleza, al tiempo que la alternativa b obtendrá una puntuación de -1, que indicará debilidad. A partir de esto, se pueden hacer las destilaciones, la primera destilación se hará aplicando lo mencionado a todas las alternativas, enfrentándolas por pares, de lo que extraeremos el primer cuadro de calificaciones:

	a	b	c	d..
Alternativas a las que domina				
Fortaleza (F)				
Debilidad (D)				
CALIFICACION (F+D)				

Tabla B.4. Valoración, en el proceso de destilación de las alternativas

A partir de los resultados de esta primera destilación se debe decir qué destilación aplicar primero. Se puede aplicar la descendente, entonces se deberá seleccionar la alternativa o alternativas con mayor calificación o bien, aplicar la ascendente, seleccionando la alternativa o alternativas con menor calificación. Al final de todo, se tendrán que aplicar las dos.

Habiendo elegido cualquiera de las destilaciones, si sólo ha aparecido una alternativa con una calificación mayor o menor, se procede a la segunda destilación, que se hace exactamente igual a la primera pero aplicando los pasos anteriores sobre el resto de alternativas. En algún momento en el curso de la realización de las destilaciones habrá más de una alternativa con la misma calificación y más alta o más baja. Entonces, dentro de la destilación en que se esté se ha de realizar una destilación sólo sobre las alternativas con la misma calificación, a fin de poder establecer un orden, si es posible.

Se realizarán como máximo, tantas destilaciones como criterios que se hayan seleccionado. En el caso de que el número de alternativas supere al de criterios, tras la última destilación las alternativas empatadas en la calificación ocuparan la penúltima plaza en el caso de la destilación descendente o bien la segunda en el caso de la ascendente. El resto de alternativas ocuparan todas la última posición en el orden o la primera para la destilación descendente o ascendente respectivamente.

Para finalizar, una vez se han obtenido las dos clasificaciones de alternativas, que no tienen por qué ser iguales, se elabora a partir de éstos un árbol que describe la preferencia de las alternativas en relación con el resto. Para tener una idea más clara de lo explicado puede servir el siguiente ejemplo con cinco alternativas (ver figura B.1).

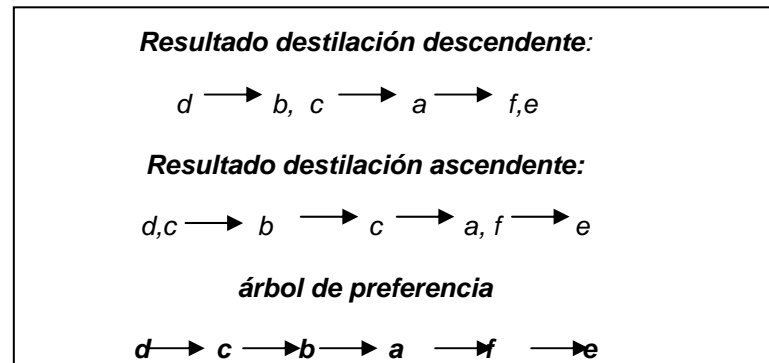


Figura B.1. Preferencia de alternativas a partir del método ELECTRE

B.3. BIBLIOGRAFÍA

Blanca, D. (2001). Estudio de la aplicabilidad de los métodos de toma de decisión en el diseño constructivo. Tesina de especialidad. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Directores de tesis: Aguado de Cea Antonio, Ormazabal Gaizka.

Flament, M. (1999). Glosario Multicriterio. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. UNESCO

- Ormazabal, G. (2001). Un Nuevo sistema integrado de toma de decisión para la gestión de proyectos constructivos". Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Director de la tesis: Aguado, A.
- Rogers, M. (2000). Using Electre III to aid the choice of housing construction process with structural engineering. Construction management & economics. Vol 18 (3), pp 333 – 342.

ANEXO C

COMPARACION DE HERRAMIENTAS MULTICRITERIO EN EL ENTORNO SOSTENIBLE

C.1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de evaluación ambiental han emergido desde comienzos de los 90 con la aparición de BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), de tal manera que el desarrollo y aplicación de estos, han provisto una considerable experiencia teórica y práctica a través de la década.

Actualmente, las herramientas que existen en el mercado, han sido desarrolladas desde distintas perspectivas y de acuerdo a las necesidades del país de origen. Cubren diferentes actividades, escalas temporales, niveles espaciales y categorías (ambientales, económicas, sociales e institucionales).

Cada una de estas herramientas se basan en estructuras usadas para desarrollar indicadores; PICABUE es una de ellas, cuyo marco de origen tiene como partida 4 pilares fundamentales : Futurity , Environment, Public Participation, Equity siendo esta una adaptación de la definición de desarrollo sostenible de Cooper (1997). Estas adaptaciones se hacen con el objetivo de crear bases comunes para unificar criterios internacionales.

Las categorías asociadas con dichos métodos han ido evolucionando, aunque algunas de ellas, han centrado su atención a el entorno ambiental operativo de la edificación lo que dificulta por completo no solo el análisis a través del Ciclo de vida si no el análisis de las mismas, de allí, que gran parte de las herramientas presenten la dificultad de establecer los componentes adecuados para globalizar y encaminar de manera certera los criterios y categorías antes mencionadas (Finch 1992).

A pesar de los inconvenientes provistos y gracias a las crecientes transformaciones y cambios de los mecanismos de evaluación, se han desarrollado una gran variedad de herramientas para la edificación, estructuradas de tal manera que algunas de ellas pueden ser herramientas de comparación o fuente de información de productos (nivel 1), ser herramientas

de diseño o de soporte de decisión (nivel 2), o bien, ser aquellas que evalúan por completo la edificación (nivel 3) (Trusty 2001).

A continuación y como estado del conocimiento, se hará una breve descripción de las herramientas que se utilizan y el aporte que pueden generar para el modelo integrado de cuantificación de valor de un proyecto constructivo sostenible (MIVES).

C.2. METODOS DE EVALUACIÓN

Como se mencionó anteriormente, se ha creado un sin número de herramientas para evaluar las edificaciones. Cada una de ellas se adaptan a el contexto en que fueron desarrolladas y todas tienen una estructura en común que es la que utiliza BEQUEST con base en la definición de desarrollo sostenible adaptada de PICABUE. BEQUEST (Building Environmental Quality Evaluation for Sustainability Through Time) que es una red internacional con intereses académicos y comerciales trabaja encaminada hacia el desarrollo sostenible con el fin de proteger el medio ambiente y la calidad de vida de las futuras generaciones. Su objetivo básico es entender, establecer y mejorar bases comunes para la implementación del desarrollo sostenible (Huovila 1999).

Con respecto a su marco de trabajo (Figura C.1) clasifica cada una de las herramientas de evaluación de acuerdo a los parámetros que pueda cumplir

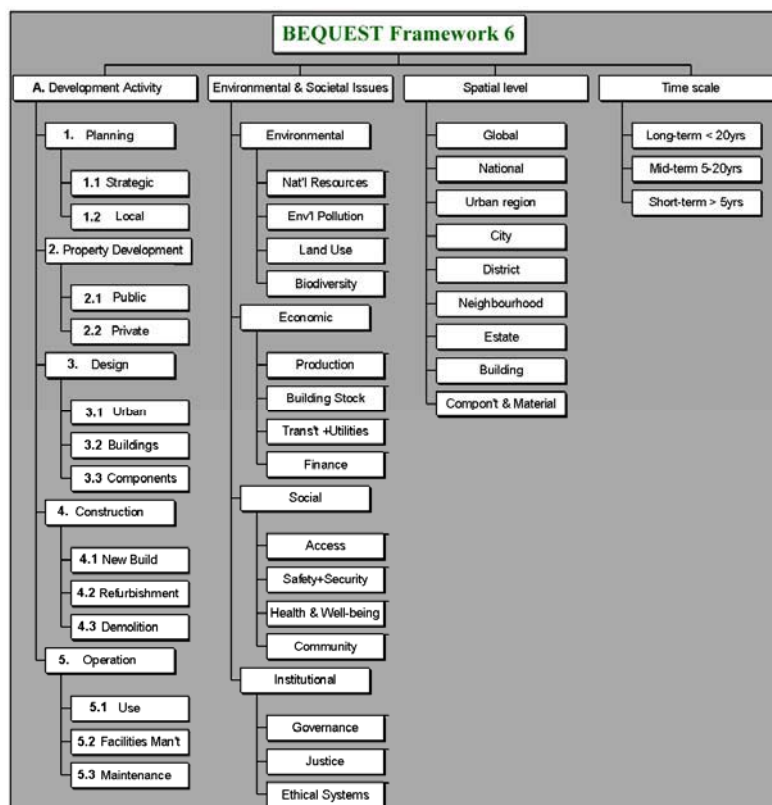


Figura C.1. fuente BEQUEST TOOLKIT

C.2.1. BEES (Building for Environmental and economic sustainable)

- Descripción: Es un programa de diseño que ayuda a seleccionar productos que generen el menor impacto ambiental en componentes de oficinas comerciales y viviendas. Esta es una herramienta nacida en USA. Se obtiene un puntaje ambiental y de costos. Su plataforma es visual Basic. Enfoca sus categorías de trabajo en datos ambientales a pesar de que el resultado de la evaluación lo hace desde la perspectiva económica y ambiental.
- Datos de Entrada: Requiere como entrada, datos cualitativos del porcentaje económico y ambiental que se desea. Estos datos requieren de ajustes de pesos de cada uno de sus parámetros en estudio. Los datos cuantitativos son datos estándar ya establecidos por promedios obtenidos en USA. Se basa en datos de la EPA y de Harvard Studies. La medida del rendimiento ambiental se hace utilizando la norma ISO 14000.
- Datos de Salida: Combina gráficamente a partir de diagramas de barra, datos económicos y ambientales. El puntaje final no representa un daño ambiental absoluto sino un daño relativo con respecto a sus categorías. Como no considera datos absolutos, entonces no se puede decir que un producto sea mejor que otro.
- Estructura General: BEES mide y combina el producto ambiental y el rendimiento económico en único puntaje. Es una estructura jerárquica (figura C.2), considera 75 elementos de la edificación. Usa el concepto de ciclo de vida en toda su amplitud. Fue diseñado para ser práctico, flexible y transparente. Práctico por que tiene un sistema o base de datos que se convierte en una herramienta de soporte de decisión. Es flexible en permitir que los usuarios de la herramienta, modifiquen a su juicio requisitos particulares sobre los parámetros dominantes de la evaluación, tal como los pesos de la categoría que determinan las consecuencias para el medio ambiente. Finalmente es transparente en la documentación de los datos de soporte de funcionamiento y algoritmos computacionales(Lippiat 1999)
- Mecanismo de Evaluación: Asigna diferentes pesos a las categorías ambientales y económicas hasta llegar a un puntaje único para tomar la decisión. La derivación de pesos se basa en la importancia relativa de cada impacto (Todd and Geisser, 1999). Su puntaje final puede ser interpretado en unidades monetarias. Usa el análisis de costo-beneficio para estimar el impacto económico de las diversas categorías ambientales. Para realizar la evaluación, usa la técnica de multiatributos MADA, colocando todas las categorías sobre la misma escala para luego normalizarlas.

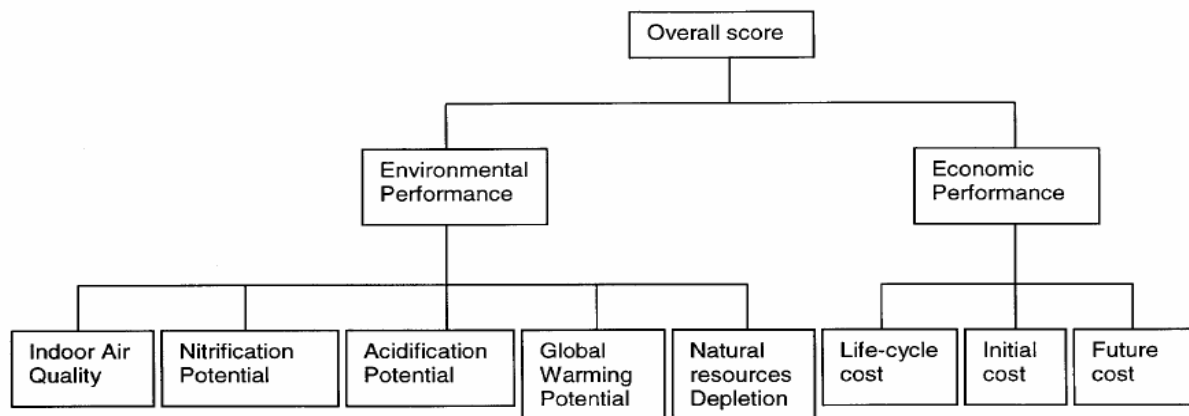


Figura C.2. Estructura Jerárquica BEES. Fuente : C.K. CHAU 2000

C.2.2. BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

- Descripción : Metodología independiente que evalúa y mejora la calidad ambiental de la edificación (oficinas, edificios industriales y viviendas). BREEAM evalúa en la etapa de diseño. Existen varias versiones para BREEAM: Ecohomes(para viviendas). BREEAM CANADA; BREEAM NORTH AMERICA, BREEAM GREEN LEAF. Trabaja con Excel, evalúa no solamente categorías ambientales si no de Gestión, Transporte y económicas. Es una herramienta creada en el Reino Unido y sus bases de datos tienen como referencia a su país de origen.
- Datos de Entrada: Se requieren datos cualitativos y cuantitativos. Se hace un check list con posibles preguntas o cuestionarios para los datos cualitativos. Para los cuantitativos se toman como datos base los proporcionados por las agencias estatales, guías de especificación de materiales o consultoras.
- Datos de Salida: Se obtiene una evaluación general en la que se otorgan cuatro clasificaciones: Pasa, bueno, muy bueno y excelente. El significado de esta clasificación se interpreta como la condición ambiental de la edificación. A la calificación obtenida anteriormente, se otorga un certificado que puede ser utilizado con fines promocionales o comerciales.
- Estructura general: Evalúa impactos por categorías y estos a su vez por subcategorías.No es un sistema jerárquico (figura C.3).

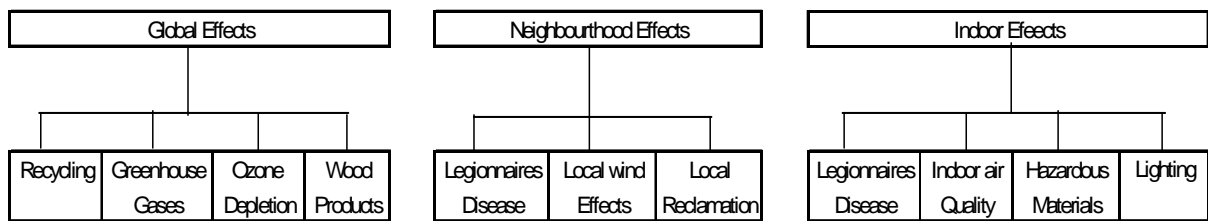


Figura C.3. Fuente propia

- **Mecanismo de Evaluación:** Usa como metodología multi-attribute utility Theory (MAUT) cuyo objetivo es obtener una función general de utilidad, la cual provee un índice o medida para un set de opciones. Para esta función es deseable que pueda capturar la mayor parte de preferencias. Combina la información extraída de expertos con valores extraídos de usuarios y propietarios. Usa el análisis de sensibilidad como punto para evaluar los efectos de pequeños cambios en factores escalados, actitudes constantes de riesgo, costo de vida y alguna otra variable de incertidumbre. La escala usada no es común por tanto los créditos asumidos no tienen el mismo valor, sin embargo, el número total de créditos provee una indicación general del funcionamiento ambiental en el diseño de la edificación. Los créditos evaluados son otorgados de acuerdo a el desempeño ambiental en un rango de criterios para cada una de las categorías. Se aplica adicionalmente un sistema de pesos con el fin de determinar la evaluación final. El sistema de pesos aplicados es el resultado de la consulta de expertos y profesionales.

C.2.3. BRE Environmental Profiles

- **Descripción:** Método universal que mide la sostenibilidad de productos construcción. Compara el funcionamiento ambiental a partir de sus perfiles.
- **Datos de Entrada :** Descripción de los materiales a ser analizados. Los datos cuantitativos los obtiene de guías o datos históricos.
- **Datos de Salida :** Gráficas del perfil de comportamiento de los materiales para su posterior comparación.
- **Estructura General :** Evalua cada material de acuerdo a su comportamiento en el tiempo.
- **Mecanismo de Evaluación :** Utiliza los Ecopoints que es una unidad de medida ambiental.

C.2.4. EcoProfiles

- Descripción : Evalúa ambientalmente edificios de oficinas existentes. El método se basa en esquemas estándar, cuestionarios y reportes que minimizan el trabajo de evaluación.
- Datos de entrada : Datos cualitativos y cuantitativos como en las herramientas anteriores. Tiene su propia base de datos y usa estadísticos existentes. Los datos económicos no se tienen en cuenta.
- Datos de Salida Se obtiene un puntaje global de la edificación en cuestión. Cada categoría tiene un peso que es asignado por los evaluadores.
- Estructura General : Consiste en tres áreas principales. Cada una de estas áreas tiene de cuatro(4) a seis (6) subáreas con un total de aproximadamente 90 parámetros a ser evaluados (Figura C.4). A cada subárea se le debe asignar un peso. No es un sistema jerárquico.

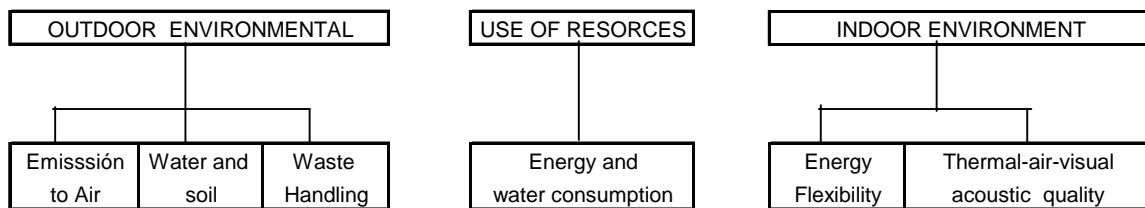


Figura C.4 .Fuente propia

- Mecanismo de evaluación : Se asignan porcentajes a cada categoría, de tal manera que se obtienen porcentajes relativos de cada una de ellas.

C.2.5. ECOPROP

- Descripción: Herramienta finlandesa de gestión, desarrollada por VTT (Huovila 2001, Leihonen 2001). Evalúa la eco-eficiencia de la edificación a partir de una serie de indicadores que toman en cuenta su rendimiento y las categorías ambientales. Se usa para evaluar viviendas, hospitales y grandes almacenes. Trabaja en Excel.
- Datos de entrada : Tiene datos cuantitativos en el que se incluyen las condiciones internas, condiciones de servicio, adaptabilidad, seguridad, ciclo de vida. Datos cualitativos como confort, accesibilidad y usabilidad.

- Datos de Salida : Con los datos introducidos se asignan los valores a los requerimientos necesarios. Al final se obtiene una puntuación por cada categoría y se comparan dichos valores con respecto a un nivel
- Estructura General : Se basa en las propiedades genéricas del edificación. La herramienta proporciona un acercamiento a los requisitos de funcionamiento sobre su ciclo de vida (figura C.5).

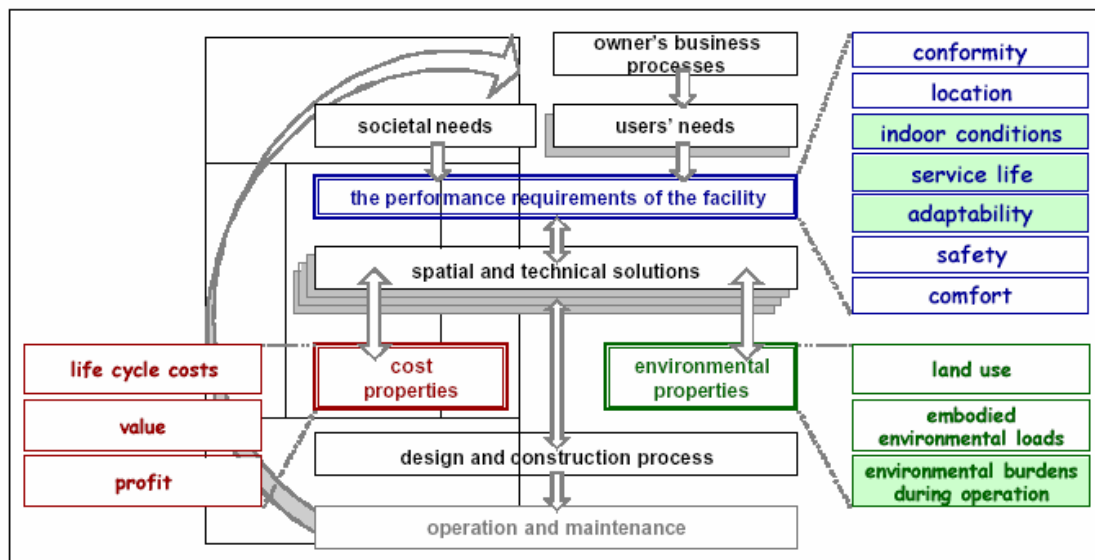


Figura C.5. Aproximación de los requisitos de gestión a lo largo de su ciclo de vida.

Fuente (Huovila, 1999)

- Mecanismo de Evaluación: Con los datos introducidos se asignan los valores a los requerimientos necesarios. Al final se obtiene una puntuación por cada categoría y se comparan dichos valores con respecto a un nivel de referencia.

C.2.6. ECOQUANTUM

- Descripción: Existen dos versiones: EcoQuantum para investigadores que es una herramienta para analizar y desarrollar complejos e innovadores diseños para edificios y oficinas sostenibles y EcoQuantum Domestic en la cual los arquitectos pueden revelar rápidamente las consecuencias ambientales de materiales y uso de energía en los diseños de las edificaciones. Eco-Quantum es una herramienta que calcula efectos ambientales durante el ciclo de vida de la edificación desde la extracción de materiales hasta la demolición o reuso. Tiene en cuenta la posibilidad de reciclaje del material.

- **Entrada de Datos :** Usa como entrada los indicadores MRPI (Environmentally Revelant Product Information). Estos indicadores muestran información sobre aspectos ambientales de los materiales, productos o módulos de la edificación. También usa como entrada, información de Duch LCA programme SimaPro4 y Environmental performance standar (ED).
- **Salida de Datos :** Se obtiene un valor del rendimiento de la edificación en cada una de las etapas de su funcionamiento.
- **Estructura General :** Funciona con dos bases de datos. El primero corresponde a los perfiles ambientales que cuenta con más de 100 materiales para la edificación y algunos procesos. Estos perfiles ambientales son introducidos para calcular la puntuación final. Con respecto a "componentes", la otra base de datos, consiste en más de 1000 alternativas para 60 componentes de edificios. Esta base es una estructura de 4 niveles: la edificación completa, 8 partes de la misma, 24 elementos y 60 componentes.
- **Mecanismo de Evaluación :** Los datos de entrada se basan en programas que calculan el funcionamiento ambiental de la edificación. Primero EcoQuantum calcula el perfil ambiental correspondiente a el material y a los flujos de energía en cada una de las etapas del ciclo de vida. Seguidamente, estas entradas o perfiles son convertidos en puntajes ambientales como por jemplo nivel de Ecotoxicidad, agotamiento de las fuentes de extracción. De esta etapa se obtienen once puntajes ambientales, los cuales al terminar esta fase e iniciar la tercera y última son convertidos en 4 indicadores generales. Esta evaluación es por categoría, no se obtiene un puntaje global.

C.2.7. ENVEST

- **Descripción :** Es un software para estimar el impacto ambiental en la etapa de diseño. Considera impactos de los materiales usados, el consumo de energía y los recursos consumidos sobre la vida del edificio.
- **Datos de entrada :** Características geométricas del edificio, áreas, volúmenes. El software tiene preseleccionado valores para edificaciones típicas.
- **Datos de Salida :** Impacto ambiental durante el ciclo de vida en Ecopoints. Estos se muestran en forma numérica y gráfica. Las gráficas incluyen el funcionamiento ambiental del edificio durante el ciclo de vida y adicionalmente, muestra la comparación ambiental entre el estudio actual y un estudio previo. También mide impactos por M2.

- Estructura General : El impacto es medido usando una escala de puntos llamada Ecopoints. Los diseñadores hacen comparaciones entre los diferentes diseños y especificaciones. 100 Ecopoints equivalen a el impacto ambiental por cada ciudadano Británico. Si no se usan los Ecopoints, se tienen establecidos los valores por cada habitante. Para determinar la importancia de las categorías que se estudian, se asignan pesos a cada una de ellas.
- Mecanismo de Evaluación : Invest mide cada categoría ambiental usando sus propias unidades pero comparandolas con normas estándar, de esta manera cada una de ellas es colocada en la misma escala de evaluación.

C.2.8 GBC (Green Building Challenge)

- Descripción : Es un sistema jerárquico de criterios de evaluación ambiental (Figura 6), desarrollado para propósitos de comparación internacional en orden de seleccionar y analizar el funcionamiento ambiental y el impacto de las edificaciones. Esta herramienta además de proyectarse en un entorno internacional, busca establecer un marco de desarrollo común para otras metodologías o herramientas que se estén gestionando. Presenta la desventaja que no evalúa la edificación durante condiciones operacionales. No funciona como herramienta de simulación si no como un marco de trabajo.
- Datos de entrada : Cuantitativos : Datos estadísticos de consumo de energía y agua. Emisiones, desechos y aspectos medibles de las condiciones ambientales internas. Cualitativos : básicamente aspectos de condiciones interiores: salud, diseño, procesos de construcción, planeación y gestión de las edificaciones. El sistema provee alguna flexibilidad en la evaluación de algunos criterios.

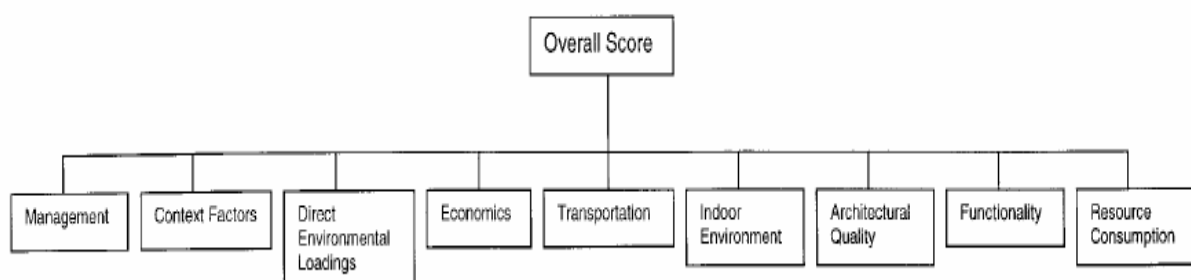


Figura C.6 . Estructura Jerarquica GBC. Fuente (Chau, 2000)

- Datos de salida : Los resultados de GBC estan basados sobre una comparación de condiciones locales estándar y no en proyectos de otras ciudades. Los resultados se presentan en forma gráfica no solo por categoría si no en una evaluación global de la edificación. Además de esta evaluación, presenta un conjunto limitado de medidas

absolutas del rendimiento que caracterizan las prácticas de sostenibilidad del edificio y que facilitan la comparación internacional o de estándares del país.

- Estructura General : Tiene en cuenta 4 clasificaciones: cuestiones o categorías mayores, categorías menores o subcategorías, criterios y subcriterios (Figura C.7). Los datos iniciales se basan en valores fijados en hojas de trabajo (ver figura C.8). Estas hojas, constituyen el soporte de lo que son los pesos ponderados para los criterios y los subcriterios. Muchos de estos valores se obtienen mediante el uso de fórmulas o bien son valores aportados por organizaciones gubernamentales. Con respecto a los pesos ponderados de los niveles más altos, vienen fijados por los equipos nacionales o grupos especializados y que son establecidos en la hoja de trabajo. Los perfiles de salida provienen de las valoraciones de las puntuaciones de los niveles más bajos, es decir, el criterio se obtiene de la valoración del subcriterio, la categoría del valor proporcional del criterio y la cuestión de la valoración de la categoría. El puntaje total se obtiene mediante la valoración proporcional de las cuestiones o categorías mayores.
- Mecanismo de Evaluación : GBC como se explico anteriormente, esta dividido por categorías, subcategorías, criterios y subcriterios. Las dos primeras jeraquizaciones son parámetros asignados por un equipo especializado y los criterios se puntúan de -2 hasta +5. La valoración total del edificio se efectua de acuerdo a los parámetros definidos por el criterio y subcriterio respectivamente. Estos criterios son valorados cuantitativamente. Los dos niveles superiores son cualitativos y por tanto se basan en evaluaciones subjetivas

Performance Relative to Appropriate Benchmarks				Scoring		Weighting and weighted scores					
R RESOURCE CONSUMPTION				2,0		Sub-criterion		Criterion		Category	
R1 Net life-cycle use of primary energy						Score	Weight	Wtd. score	Score	Weight	Wtd. score
R1.1 Primary energy embodied in materials, annualized over life-cycle									4,2	50%	2,1
Reference standard		Scoring		4,2		Intent:					
		Embodied energy of materials, annualized over the life-cycle of the Design, in MJ normalized for area. The Benchmark value assumes the same mix of occupancies and areas, and a structural system and a building envelope that would be typical for a conventional building in the region.				To assess the primary energy embodied in materials of the Design, relative to a Benchmark value and annualized over the life-cycle. Embodied energy in any portion of an existing building on the site that is re-used as part of the new Design is not counted as part of the total embodied energy of the Design. However, the Benchmark assumes that all materials are new.					
		35		-2,0		Assessor comments:					
		32		-1,0							
		30		0,0							
0 Alarm score		28		1,0							
2,3 Scale interval		25		2,0							
30,0 MJ/m2 *yr Benchmark		23		3,0							
20,3 MJ/m2 *yr Design		21		4,0							
68% ratio Design/Bmark		18		5,0							
						Green Centre, Rev. 01, Big Town, Any country, Performance Assessment					
R1.2 Net primary non-renewable energy used for building ops over the life-cycle						2,5	50%	1,3			
Reference standard		Scoring		2,5		Intent:					
		The annual primary non-renewable operating energy of the Design as a percent of the Benchmark, normalized for net area. The Benchmark value assumes the same mix of occupancies and areas, and a structural system and a building envelope that would be typical for a conventional building in the region. The "5" score is derived from the consumption stated the Best case in Bmark.				To assess the net annual primary non-renewable operating energy of the Design, relative to a Benchmark value.					
		581		-2,0		Assessor comments:					
		526		-1,0							
		470		0,0							
0 Alarm score		414		1,0							
56 Scale interval		359		2,0							
470 MJ/m2 *yr Benchmark		303		3,0							
329 MJ/m2 *yr Design		248		4,0							
70% percent Design/Bmark		192		5,0							

Figura C.7 . Estructura general GBC . Fuente (iisbe)

INTRODUCCION	Intro	Muestra la visión del conjunto de hojas de la herramienta
	ID (Project Identification)	Proporciona información básica sobre el nombre del edificio, ubicación, actualidad, etc
SECCIÓN 1	Contxt (Contexto)	Describe el vecindario micro-urbano. Abarca temas como densidad, clima, aire, ecología, naturaleza, infraestructura y transporte. Algunos campos estan ligados a la hoja de los pesos ponderados y otros estan influenciados por la informacion aportada en la hoja Bmark.
	Vote (voto)	Hoja clave del sistema. Permite asignar los pesos ponderados de las cuestiones o categorias mayores (issues) mas relevantes. Esta hoja proporciona una indicación explicita de las prioridades y tambien conforma la base para la obtención de la puntuación final del edificio.
	Energy generation and consumption Report (Engen)	Proporciona tablas a los usuarios para que introduzcan los valores de emisión para los combustibles y la producción relativa a sus regiones. Esta información se obtiene de las agencias gubernamentales. Lo sdatos son energía primaria, generación eléctrica, factores medioambientales.
	Valores de Referencia (Bmark)	Se ha diseñado para permitir la entrada de los valores de referencia que se adecuan a la región y al tipología de las edificaciones. Estos valores sientan las bases para asignar puntuaciones.
SECCIÓN 2	Arch (arquitectura)	Permite introducir al usuario las principales ocupaciones del edificio analizado al igual que las descripciones de otro tipo de elementos y rasgos arquitectónicos. Los datos equivalentes para los valores de referencia se importan directamente de la Bmark
	Area (área)	Permite la entrada de datos sobre numero de plantas, áreas construidas, áreas netas, muros, etc. Estos datos se utilizan para muchos cálculos posteriores. Se divide en 7 secciones.
	Technical System and Energy Consumption (Tech)	Proporciona espacio para la caracterización de los sistemas técnicos del edificio, incluyendo aire acondicionado, iluminación y los sistemas de control. Esta dividido en 8 partes. Los cálculos de energía pueden obtenerse de un análisis independiente o bien utilizando métodos dentro de GBTool
	Materials (Materiales)	Proporciona una tabla para recoger los datos de peso y volumen de algunos grupos fundamentales de materiales. La información se organiza en tres grupos.
	Building Operation Magna (OPS)	Describe distintas características relacionadas con la futura operación y gestión del edificio, incluyendo la distribución del espacio, # de ocupantes y horas de operación.
	Life Cycle Costing	Solo incluye costos de capital, vida estimada del diseño y valor actual de los costos de O & M. El nivel de descuento y costos de reposición de materiales no es tenido en cuenta.
	Transport	En desarrollo
SECCIÓN 3	Evaluación (Assess)	Es la hoja más importante de la herramienta GBTool. Contiene los campos de puntuación para todos los criterios y subcriterios y aplica a estos cálculos, los pesos ponderados fijados en las hojas "Vote" y " Weight".
SECCIÓN 4	Informe (Rprt)	Resumen de las características fundamentales del edificio y los datos de rendimiento de los valores de los edificios analizados. Los resultados se normalizan por área y por ocupación.
	Pesos Ponderados (Weight)	Los valores de los pesos ponderados para las cuestiones y categorias se trsladan desde la hoja "Vote". Para los criterios y subcriterios tambien se muestran en esta hoja, pero mediante menajes que reflejan su procedencia o aplicación.
	Resultado (Result)	Muestra los resultados de las evaluaciones efectuadas mediante puntuaciones y pesos ponderados. Hay dos tipo de resultados; indicadores de sostenibilidad ambiental (ESI) y puntuaciones de rendimiento de los pesos ponderados del edificio analizado en relación con los valores de referencia

Figura C.8. Hojas de trabajo de GBC . Fuente propia

C.2.9. GBA (Green Building Advisor)

- Descripción : Es un programa de software, que ayuda en el diseño de las edificaciones ambientales. Identifica acciones para reducir el impacto ambiental asegurando a la vez la salud y productividad en los espacios interiores.
- Datos de Entrada: Información concerniente a las características del proyecto como localización, tipo y tamaño de la edificación, características propias del proyecto. Especificaciones de la estructura, sistemas HVAC. Con los datos de la localización se determinan las características climáticas de la zona en estudio.

- Datos de Salida : Muestra estrategias para el diseño. Pueden ser clasificadas en un nivel de recomendación como Strong (Fuerte) o moderate (moderado). No hace evaluación cuantitativa si no cualitativa.
- Estructura General : Esta dividido en cuatro categorías principales que a su vez se subdividen en subcategorías para obtener una calificación cualitativa general o bien una por cada una de ellas (figura C.9).

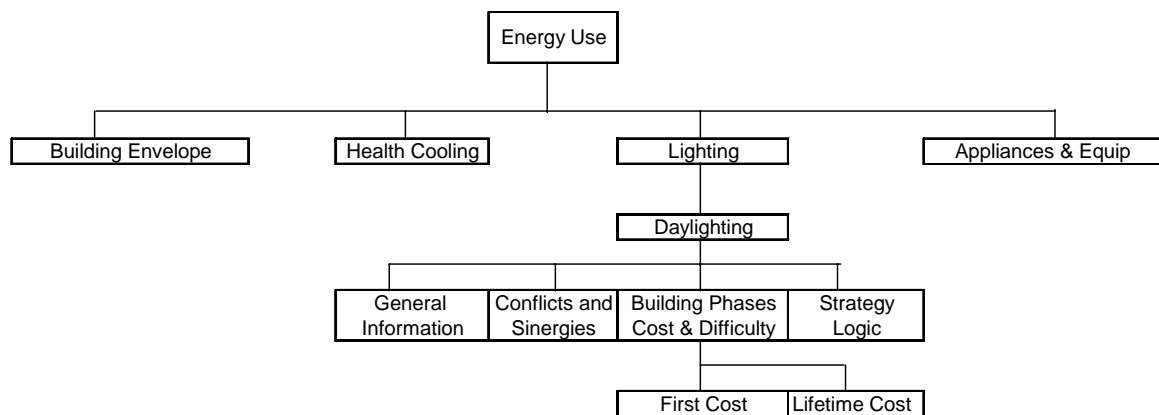


Figura C.9. Estructura general de una de las dos categorías del GBA " Energy Use". Fuente propia

- Mecanismo de Evaluación : Es un programa que funciona con algoritmos que se encargan de evaluar las estrategias y asignar un nivel específico de recomendaciones basado en las entradas que fueron asignadas al comienzo de la evaluación.

C.2.10. GREEN GUIDE TO SPECIFICATION

- Descripción : Es una guía de especificación de fácil uso basada en datos numéricos. Esta mide impactos ambientales de materiales de construcción en término de 13 parámetros.
- Datos de Entrada : Se requieren datos particulares de los elementos o componentes. Datos como las especificaciones de los materiales a ser usados.
- Datos de Salida : Evaluación del impacto ambiental o de los materiales usados de acuerdo a una escala pre-establecida.
- Estructura General : Los materiales y componentes son presentados en su forma elemental de construcción. Ellos son comparados como componentes con el criterio de satisfacer o bien las mismas funciones o similares. Por ejemplo, materiales o componentes que partan de la misma base del material (cemento, hormigón).

- Mecanismo de Evaluación : Los datos de un perfil ambiental son trasladados a unas etiquetas específicas para hacer básicamente, comparaciones entre materiales y componentes. Un sistema de clasificación de categorías es usado: a= Iguala por lo menos el impacto ambiental esperado; B y C = Disminuye gradualmente el impacto.

C.2.11. LEED (Leadership in Energy Environmental Design) Green Building Rating System

- Descripción : Es una guía para diseño sostenible y verde. Se basa en normas estándar de los Estados Unidos. Evalúa el rendimiento y funcionamiento en edificios sostenibles. Desarrolla proyectos nuevos y existentes, también evalúa construcciones comerciales.
- Datos de Salida : El sistema contiene una serie de restricciones o requisitos lo cual da la posibilidad de obtener créditos basados en el nivel de satisfacción de los criterios seleccionados. Usando los créditos del sistema hay 4 niveles del edificio que pueden ser certificados.
 - LEED –certified: (26 –32)
 - Silver Level (33-38)
 - Gold Level (39-59)
 - Platinum Level (52+, 69)

El número de parentesis denota la cantidad de puntos necesarios para cada nivel.

- Estructura General : Contiene 7 categorías y 60 indicadores individuales. El mecanismo de los puntos es acumulable. Las categorías a las cuales hace mención son : Sustainable sites, water efficiency, energy and atmosphere, materials and resources, Indoor environmental Quality, innovation y LEED accredited professional.

C.2.12. LISA (LCA in Sustainable Architecture)

- Descripción : Es una herramienta de soporte para diseñar edificios “verdes desde el punto de vista del análisis del ciclo de vida. Esta herramienta da a los diseñadores una evaluación de aspectos ambientales para el diseño.
- Datos de Entrada : Clase de material y cantidad , programación de trabajo como por ejemplo consumo de combustible, horas de servicio de HVAC, etc.
- Datos de Salida : Se muestran los resultados en forma gráfica junto con una tabla resumen de todos los impactos por cada etapa del ciclo de vida. Presenta resultados en términos de Resource Energy (fuentes de energía) en GJ, GGE (Greenhouse gas emission) en toneladas equivalentes de CO₂, SPM, NMVOC, WATER, Nox, Sox. Los datos de los materiales y sus

cantidades también son presentados. Las barras graficadas contienen el promedio NSW del impacto y el resultado de los datos proporcionados por el usuario.

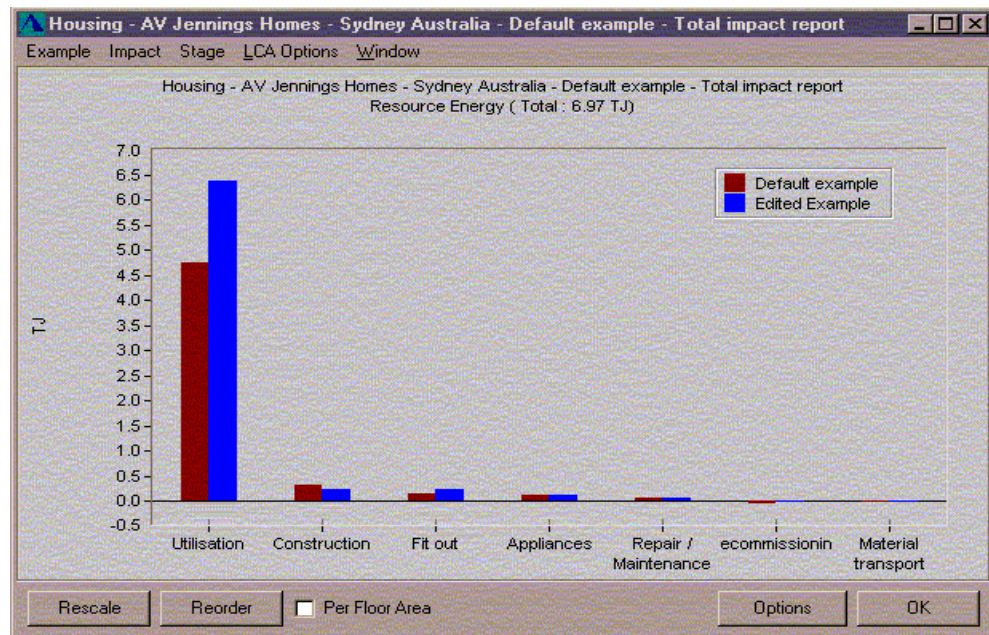


Figura C.10. Gráficos de salida . Fuente (software LISA)

- Estructura General : Herramienta de dos categorías cada una de las cuales se subdivide en subáreas.

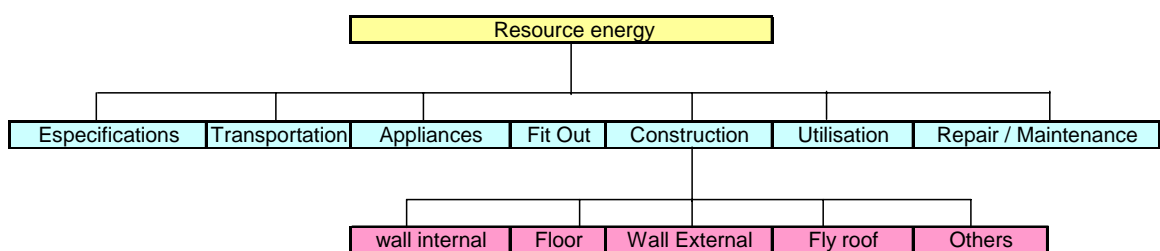


Figura C.11. Estructura General . Fuente Propia

- Mecanismo de Evaluación : Funciona mediante la programación de ecuaciones, las cuales calculan el material de consumo y muestra el impacto sobre ellos. Estos cálculos se hacen a partir de una caja de materiales que son aportados por LISA y que están asociados con la manufactura de cada uno de los materiales usados.

C.2.13. PIMWAQ

- Descripción : Es un método que define niveles ecológicos mínimos para edificaciones residenciales y evalúa el grado de eco-eficiencia de varios proyectos desarrollados.
- Datos de entrada : Se introducen datos cuantitativos que son referencia de la comparación de otras edificaciones. Se evalúa la contaminación, los recursos naturales y la salud. Adicionalmente datos cualitativos que tienen en cuenta producción de comida y Biodiversidad.
- Datos de Salida : Se obtiene un puntaje por categorías que en su comportamiento muestran el menor impacto ecológico. Tiene como referencia proyectos anteriormente evaluados y que arrojaron los mejores resultados. Arroja una tabla de resultados la cual presenta los puntos que el proyecto ha ido mejorando en una escala de 1 – 3 por criterio.
- Estructura General : Se usa una escala de evaluación llamada Pimwag en la cual se muestra al diseñador una serie de alternativas donde este escoge de acuerdo a su criterio y proyecto. La puntuación máxima no debe superar los 30 puntos.

C.2.14. TQ BUILDING ASSESSMENT SYSTEM (Total quality Building Assessment System)

- Descripción : Es un sistema computacional basado en indicadores que evalúa la calidad de la edificación como base para obtener una certificación. No todos los indicadores hacen parte del sistema de evaluación, algunos solamente aportan información.
- Datos de Entrada : Se introducen datos como cantidad de consumo energético, materiales, distancia de transporte.
- Datos de Salida : Presenta gráficas por categoría evaluadas sobre una escala de -2 hasta +5. La evaluación no se hace global si no por categorías. El perfil de los resultados también pueden presentarse mediante curvas de sensibilidad.
- Estructura General : El sistema de evaluación está basado sobre los objetivos de diseño. Por cada criterio hay una escala de evaluación con un intervalo de -2 hasta +5. El mejor puntaje es el 5. Cada intervalo de la escala corresponde a un objetivo del diseño. El diseño no apunta a evaluarla edificación una vez se haya terminado el diseño y la construcción. Este solamente apunta a evaluarlo en la etapa del prediseño.

- Mecanismo de Evaluación : A el comienzo del proceso de diseño, el cliente y el equipo definen los objetivos de la edificación mediante criterios de evaluación y los puntajes que se desean obtener. Después de la evaluación, un grupo de expertos certifica que toda la información usada para la evaluación es la correcta, para hacerla deben asignar unos pesos o porcentajes para tal fin.

C.3. BIBLIOGRAFÍA

Chau, C.; Lee, W.; Yik, F.; Burnett, J. (2000). Towards a successful voluntary Building Environmental Assessment Scheme. *Construction Management and Economic*. vol 18, pp 959 – 968.

Finch, E. (1992). Environmental Assessment of construction Projects. *Construction Management and Economics*. vol 10, pp 5 – 18.

Tood, J.; Gesissler, S. (1999). Regional and cultural issues in environmental performance assessment for buildings. *Building Research and Information*. Vol 27(4/5), pp 247 – 256.

Trusty, W (2001). Life Cycle Assessment(Athena Institute). An oral presentation at NRC VTT seminar; Ottawa 16 jan 2001.

ANEXO D

CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA INDICADORES

D.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA INDICADORES

La selección de indicadores es indispensable pues estos constituyen la base de la cuantificación para la elección de la mejor alternativa. A partir de su elección se materializan los indicadores relevantes para el proceso de evaluación.

Dados estos antecedentes, la selección de criterios para indicadores fue planteada por el equipo del proyecto MIVES los cuales se resumen en las siguientes características:

- **Cuantificables** : Eso significa que se puedan medir bien sea a partir de variables o atributos.
- **Validez científica**: Significa que debe ser además de consistente con el sistema, debe estar bien fundamentado.
- **Pertinente**: El indicador debe ser representativo respecto al problema planteado.
- **Vigente en el ciclo de vida**: el indicador debe señalar los cambios de tendencia en el medio o en las actividades relacionadas con éste.
- **Suficientemente independiente**: El indicador deberá medir variables independientes.
- **Suficientemente complementarios**: Que los indicadores estén interrelacionados en el momento de su evaluación.
- **Trazable / Auditable**:, Significa que deben garantizar la futura comparabilidad de los datos.

- Preciso: El indicador debe ser definido de forma clara de manera que aborde todo lo que se quiera evaluar. Entre mas preciso sea, mas precisa será la herramienta en el momento de la evaluación.
- Claridad: Esta claridad hace alusión a la fácil comprensión del indicador por parte de todo tipo de personas, es decir a las propias del proyecto y a las externas a el.

Aparte de estas características, en la literatura se encontró un modelo procedimental para el diseño de indicadores propuesto por (Letelier, 2000). Este modelo abarca una serie de etapas para llegar a definir y construir los indicadores las cuales se explican a continuación:

- Especificación del objeto de análisis
- Definición de perspectiva evaluadora
- Selección de macro – criterios evaluativos más relevantes
- Caracterización sistémica del objeto de análisis.
- Selección de variables relevantes
- Construcción de indicadores

La *especificación objetivo de análisis* corresponde al objeto, entidad o proceso a evaluar. Por ejemplo una unidad académica o administrativa, un proyecto de construcción, etc.

La *definición de la perspectiva evaluadora* se refiere a quien o quienes evalúan, y los fines de la evaluación. Dichos fines pueden privilegiar la calidad o eficacia, o la eficiencia, u otro criterio evaluativo.

La *selección de Macro criterios* son aquellos aspectos que constituyen los criterios para un análisis integral de las funciones y actividades desarrolladas en el proyecto.

La *caracterización sistémica del Objeto de análisis* hace referencia al marco de análisis de evaluación el cual utilizará una herramienta metodológica compuesta de 4 elementos: propósitos, actividades, medios y resultados.

La etapa de la *selección de variables relevantes* es una fase posterior al análisis macro-criterio en sus diversos componentes. Estos componentes se llevan a variables específicas, con el objeto de hacer factible su evaluación y medición. La especificación de variables para cada uno de los macro-criterios significa establecer los ámbitos relevantes de evaluación en cada una de las funciones que considere el evaluador.

La *construcción de indicadores* es un proceso que no obedece a normas fijas. En algunos casos, distintos indicadores responden a distintos propósitos, y a los intereses y necesidades de información y toma de decisión de diferentes actores.

En general, se pueden reconocer distintos tipos de indicadores, algunos de ellos se listan a continuación.

De existencia: Dan cuenta de la existencia o no de un referente o antecedentes respecto a una situación específica (por ejemplo reglamentos).

Cualitativos: Referencia que da cuenta del estado de comportamiento de una variable en un momento dado. Se construye a través de percepciones, representaciones, juicios, etc.

Cuantitativos: Referencia numérica que dan cuenta del estado del comportamiento de comportamiento de una variable en un momento dado.

Absolutos: Aquella información cuyo propósito es proveer una descripción neutral de una situación o proceso.

Relativos: Antecedentes que pone en relación dos variables. Generalmente es una razón numérica.

Compuestos: Antecedentes que pone en relación más de dos variables o criterios.

De tendencia: Da cuenta de la evolución en el tiempo de un cierto tipo de indicador

Adicionalmente a los tipos de indicadores existen unas características y atributos deseables que se presentan a continuación:

Homogeneidad: La información obtenida a través del indicador debe ser comparable a través del tiempo.

Objetividad: La información no debe ser sometida a manipulación por quienes efectúan la medición.

Relevancia: El indicador debe ser pertinente en la perspectiva de la medición.

Coste: La información contenida en el indicador puede ser obtenida a un costo razonable, es decir no implica desembolsos significativos.

Confiabilidad: Los indicadores deben estar medidos en datos consistentes.

Claridad: Entrega información simple, con significado directo y explícito.

D.2. BIBLIOGRAFÍA

Letelier, M.; Herrera, J.A.; López, L.; Canales, A. (2001). Indicadores universitarios: Experiencias y desafíos internacionales. Centro Interuniversitario de Desarrollo. Chile.

ANEXO E

SISTEMAS DE SOPORTE A LA DECISIÓN

E.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de soporte tienen como objetivo servir de apoyo al proceso de toma de decisión, de modo que su estudio favorezca la profundización en la comprensión del problema. Bajo ninguna circunstancia, se toma su resultado como algo absoluto que sustituya la decisión.

Los sistemas de soporte a la decisión nacen a principios de los años 70s con Scott Morton. Inicialmente lo define como "un sistema interactivo basado en ordenador, que ayuda a los tomadores de decisiones a utilizar datos y modelos para resolver problemas no estructurados" (Turban,2001).

Existen diferentes tipos de sistemas que dan apoyo a la decisión, dentro de estos sistemas se encuentran los sistemas expertos, los sistemas de inteligencia artificial, redes neuronales, y sistemas de información ejecutivos, entre otros; no obstante, todos estos sistemas tienen un mismo objetivo: mejorar el proceso de toma de decisión.

A continuación se mencionan algunas de las técnicas más usuales que se incluyen dentro de los sistemas de soporte a la decisión.

E.2. TÉCNICAS DE SOPORTE A LA DECISIÓN

E.2.1. Técnica "Decisión Conferencing" Proceso de decisión en conferencia

La técnica fue creada a finales de los años 70 por Cameron Peterson. Esta metodología se basa en un trabajo equipo durante dos o tres días cuyo fin es resolver un problema complejo. El trabajo consta de un diálogo e intercambio de pareceres sobre el tema en estudio. El debate lo modera y conduce una persona y otra utiliza medios informáticos de soporte orientados a la toma de decisión, tales como programas informáticos especializados o similares.

El objetivo por tanto es lograr una visión común del problema e intentar llegar a la solución en consenso del mismo lo que da lugar a una adecuada y mejorada toma de decisión.

E.2.2. Técnica DELPHI

Esta técnica tiene por objeto conocer la opinión de un grupo de expertos que están interesados en un diagnóstico, en la evaluación o planificación de una situación o tema en concreto.

Su desarrollo se inicia a partir de los cuestionarios que se hacen llegar al grupo de expertos informándose en cada uno de ellos de los resultados precedentes. De esta manera se puede llegar a un consenso sin necesidad de abrir un proceso de discusión y debate, puesto que las personas consultadas no tienen contacto directo entre ellas.

Los cuestionarios han de ser claros y precisos teniendo en cuenta que el número de personas que no contestan o abandonan el proceso es elevado. Adicionalmente ha de considerarse la cantidad de preguntas para que no supongan demasiado esfuerzo y tiempo para el experto.

El proceso a seguir consiste en enviar un primer cuestionario y luego de recoger y analizar las respuestas (para validar el cuestionario) se hacen llegar las conclusiones junto con un segundo cuestionario para matizar o priorizar dichas respuestas. Posteriormente, después de analizar la información del segundo cuestionario se ha de enviar un tercero donde aparezcan las conclusiones y la posibilidad de que se puedan hacer valoraciones sobre las conclusiones.

Finalmente, se elabora un informe donde se resume el objeto del estudio, los pasos seguidos durante el proceso y los resultados obtenidos.

E.2.3. Brain Storming (Tormenta de ideas)

Es una técnica de trabajo grupal que facilita el surgimiento de nuevas ideas sobre un tema o problema determinado. Fue creada por Alex Osborne en 1941. Se utiliza para oportunidades de mejora, liberar la creatividad de los equipos, crear un número extenso de ideas.

Esta técnica permite plantear y resolver los problemas existentes, plantear posibles causas, plantear soluciones alternativas, desarrollar la creatividad, discutir conceptos nuevos entre otras aportaciones.

El proceso a seguir consiste en:

- Definir el tema o el problema
- Nombrar un conductor del ejercicio
- Explicar las reglas antes de comenzar la "tormenta de ideas"

-
- Emitir ideas libremente sin extraer conclusiones en esta etapa
 - Listar las ideas
 - No repetir las ideas que hayan sido expuestas
 - No criticar las ideas expuestas
 - Terminar el ejercicio cuando ya no existan nuevas ideas.
 - Analizar, evaluar y organizar las ideas resultantes, para valorarla utilidad en función del objeto que se pretendía lograr.

E.2.4. Diagrama de afinidad

Es una herramienta que organiza un gran número de ideas en función afinidad, es decir, de las relaciones que existen entre ellas.

E.2.5. Diagrama Causa – Efecto

Es una técnica que analiza la causa y el efecto para la solución de problemas. Esta relaciona un efecto con las posibles causas que lo puedan ocasionar. Se utiliza para cuando se necesite encontrar las causas raíces de un problema.

Simplifica en gran parte, el análisis y mejora la solución de cada problema, ayuda a visualizarlos mejor y a hacerlos más entendibles, toda vez que agrupa el problema, o situación a analizar y las causas y subcausas que contribuyen a este problema o situación.

E.3. BIBLIOGRAFÍA

- Ormazabal, G. (2001). Un Nuevo sistema integrado de toma de decisión para la gestión de proyectos constructivos". Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Director de la tesis: Aguado, A.
- Turban,E.; Aronson, J. (2001). "Decisión support Systems and Inteligent System", 6ª Edición, Prentice Hall
- <http://www.cimas.eurosur.org/>

ANEXO F

APLICACIÓN INFORMÁTICA DE LA HERRAMIENTA

F.1. INTRODUCCIÓN

La cuantificación y valoración del edificio industrial durante el desarrollo de la tesis se lleva a cabo desde dos entornos y dos enfoques. Dos entornos por que por un lado se muestra la aplicación analítica de la metodología en el capítulo 6 y por otro lado, objetivo de este anexo, se presenta la aplicación informática en conexión con el caso práctico expuesto en el capítulo antes mencionado.

Respecto a la presencia de dos enfoques para este anexo se toma únicamente la evaluación del componente estructura que como se concluyó en el capítulo 6 es el factor diferencial de una alternativa respecto a la otra.

F.2. DESARROLLO INFORMÁTICO DE LA TERMINAL Y REPARACIÓN DE AUTOBUSES

F.2.1. Análisis

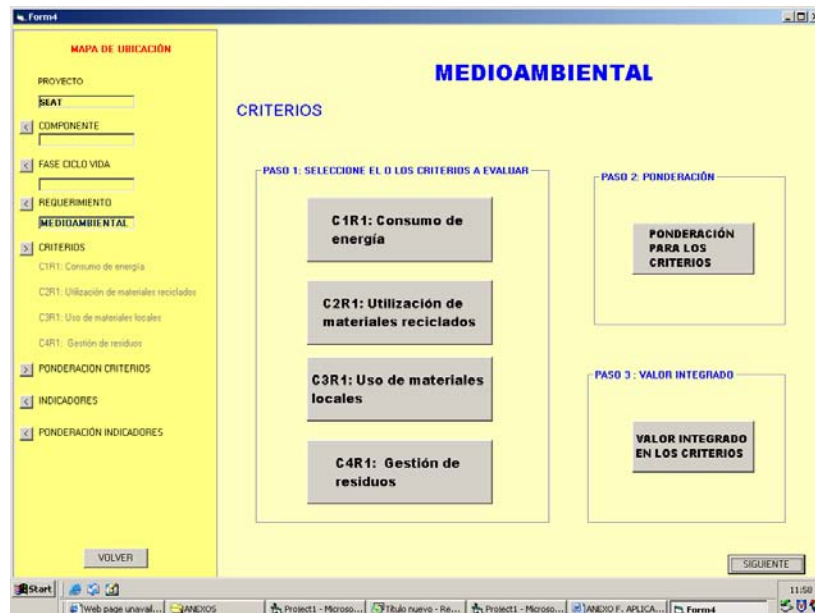
A través de la consecución de las distintas pantallas se define el alcance del caso práctico. Como se ha dicho en capítulos anteriores se comienzan definiendo los requerimientos, componentes, y las fases del ciclo de vida. A su vez se especifica el árbol de requerimientos que se deriva de cada plano de requerimientos previamente descrito.

A continuación se presentan las pantallas correspondientes a la definición del alcance. Se debe aclarar que no todos los indicadores o criterios presentados se evalúan en el caso pues no tienen correspondencia alguna con el desarrollo del caso práctico.

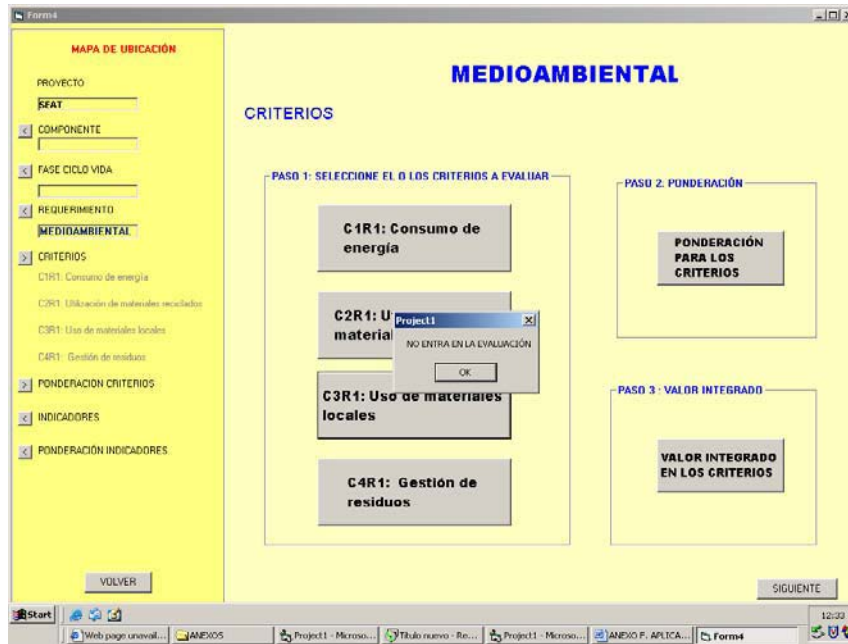
Definición de los requerimientos: A diferencia de la herramienta general para el desarrollo del caso práctico solo se toman en cuenta 5 requerimientos de los 6 planteados inicialmente.



Al presionar el requerimiento medioambiental se despliegan los criterios asignados al mismo. Se presentan 4 criterios de los cuales entran 3 en evaluación.

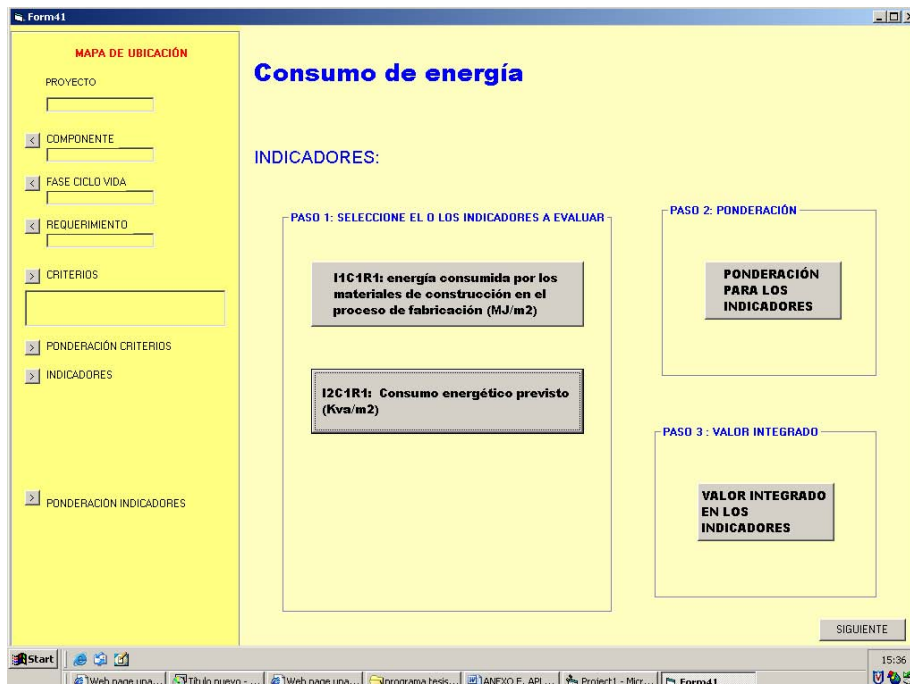


Al seleccionar el criterio que no entra en la evaluación aparece un aviso que indica que no se tendrá en cuenta como se muestra en la siguiente figura



Asignados los criterios medioambientales a evaluar, se inicia el despliegue de cada uno de ellos a nivel de indicadores. Con el despliegue de los indicadores se selecciona cuales entran en evaluación y se da paso a la fase de la evaluación. A continuación se muestra el despliegue de algunos criterios en sus respectivos indicadores

- Consumo de energía

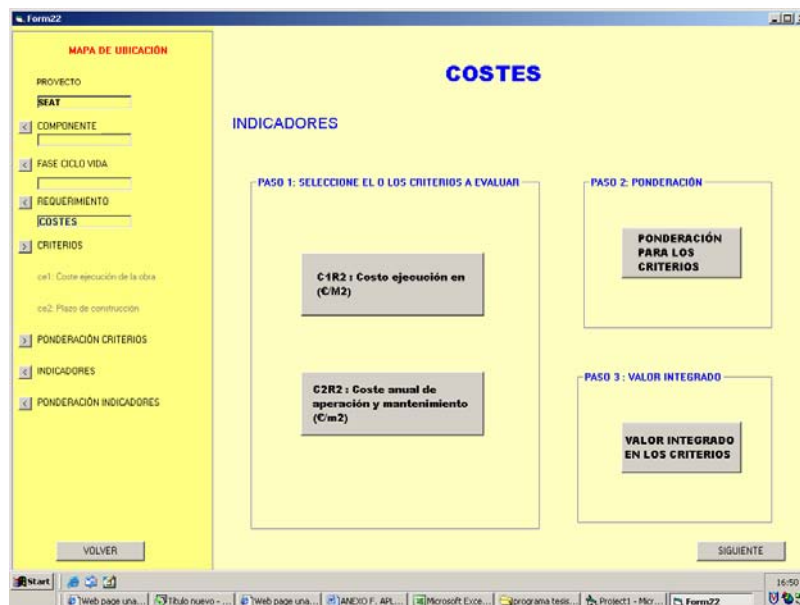


- Utilización de materiales reciclados



A continuación se presentan los indicadores pertenecientes al criterio costes:

- Costes



En la siguiente pantalla se observan algunos criterios del plano funcional

- Modificabilidad y flexibilidad

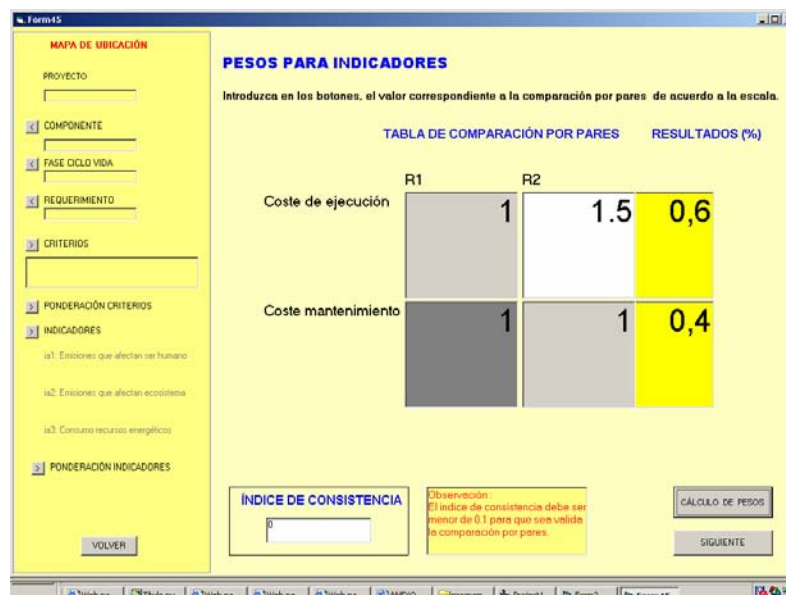


Estas pantallas se despliegan consecutivamente hasta llegar al nivel de indicadores que es donde se inicia el proceso de calificación y evaluación.

F.2.2. Evaluación

La evaluación se inicia con la ponderación de pesos. Esta se realiza mediante el proceso analítico de jerarquías (A.H.P). Para facilidad del usuario, la herramienta calcula directamente los pesos una vez este haya realizado la comparación por pares. A continuación se muestran algunas pantallas de los cálculos realizados.

- ponderación a nivel de indicadores



- Ponderación a nivel de criterios

PESOS PARA CRITERIOS

Introduzca en los botones, el valor correspondiente a la comparación por pares de acuerdo a la escala.

TABLA DE COMPARACIÓN POR PARES **RESULTADOS (%)**

	R1	R2	
Constructibilidad	1	2	0,67
Modificabilidad y flexibilidad	1/2	1	0,33

ÍNDICE DE CONSISTENCIA

Observación: El índice de consistencia debe ser menor de 0.1 para que sea válida la comparación por pares.

CÁLCULO DE PESOS

SIGUIENTE

- Ponderación a nivel de requerimientos

PESOS PARA CRITERIOS

Introduzca en los botones, el valor correspondiente a la comparación por pares de acuerdo a la escala.

TABLA DE COMPARACIÓN POR PARES **RESULTADOS (%)**

	R1	R2	3	4
Medio ambiente	1	1/2	1	3
Económico	2	1	2	6
Estético	1.0	1/2	1	3
Funcional	1/3	1/6	1/3	1

ÍNDICE DE CONSISTENCIA

Observación: El índice de consistencia debe ser menor de 0.1 para que sea válida la comparación por pares.

CÁLCULO DE PESOS

SIGUIENTE

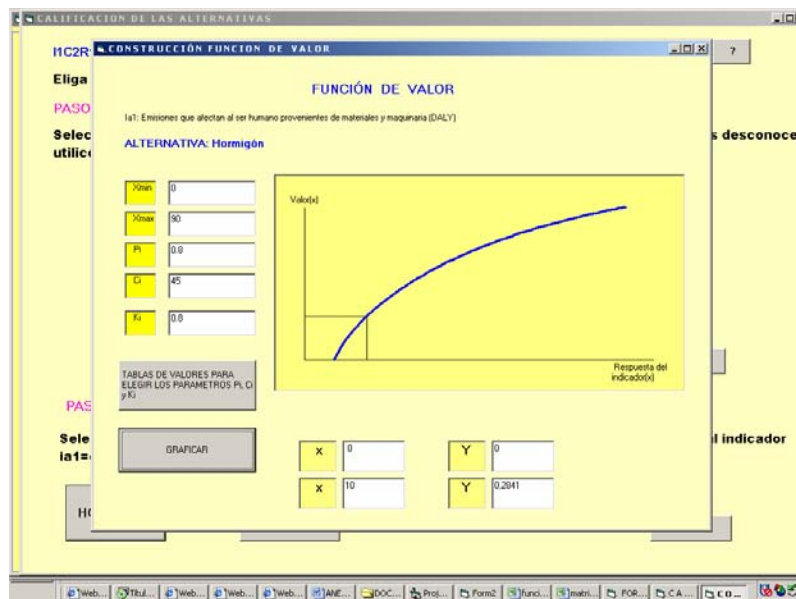
Como se aprecia en las pantallas anteriores, es posible calcular los pesos en cada uno de los niveles jerárquicos indiferente del tamaño de la matriz que se esté evaluando. Adicionalmente, se pueden calcular indistintamente del nivel de jerarquía. Por comodidad y mejor entendimiento, se calculan de indicadores a requerimientos, es decir, en un orden ascendente.

Ahora bien, para continuar con los pasos de la metodología, corresponde calcular y construir la función de valor. Como bien se ha mencionado esta solamente se realiza a nivel de indicadores. Este procedimiento se realiza en todos y cada uno de los indicadores. A continuación se mostrará el procedimiento seguido para un indicador medioambiental: "Uso de materiales reciclados".

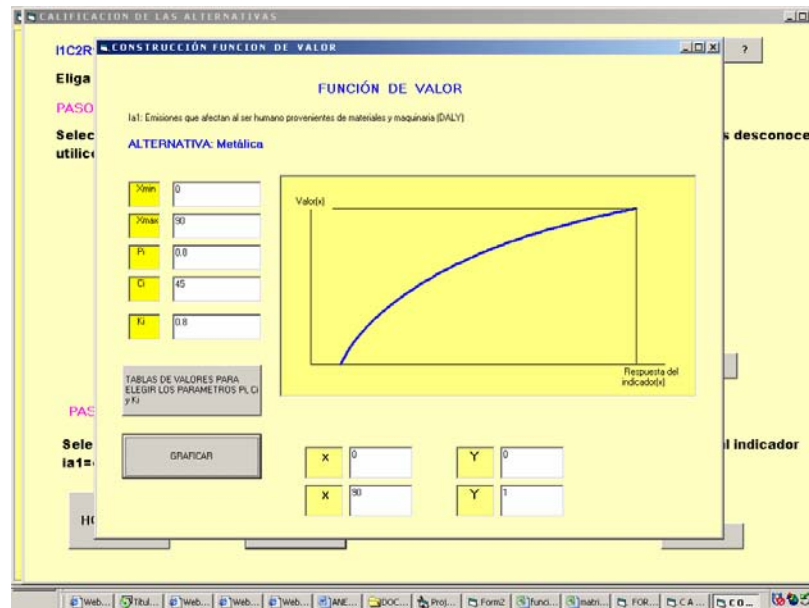


En esta figura anterior se observa los valores asignados a las dos alternativas del componente estructuras. Se asigna un 10% de material reciclado para el hormigón y un 90% para la estructura metálica. Estos valores son dados en la caso práctico.

Función de valor para el componente estructura y la alternativa hormigón



Función de valor para el componente estructura y la alternativa metálica



Estas gráficas se repiten consecutivamente para todos los indicadores y lo único que el usuario debe introducir son los parámetros de P , C y K los cuáles son referenciados en el capítulo 4. Por su parte la herramienta se encarga de graficar y dar en escala de valor la correspondiente respuesta de la alternativa.

Dados las ponderaciones y el valor de la alternativa, se inicia el cálculo del valor final en todos y cada uno de los niveles hasta llegar a los requerimientos en donde a partir de la suma del valor más alto se selecciona la alternativa óptima.

Para concluir este anexo, la herramienta realiza consecutivamente cada uno de los procedimientos matemáticos lo que facilita la obtención numérica además de servir como herramienta de apoyo a la toma de decisión.