

Bibliografía

J.B. ANDERSON, & H.J. FREIBERG, Using self-assessment as a reflective tool to enhance the student teaching experience. *Teacher education quarterly*, 1995. V22, 77-91.

D. ALLEN, Learning from students work, on *Assessing students learning, from grading to understanding*. Teachers college press., New York. 1998

J. ARTER, Using assessment as a tool for learning. In R. Blum & J. Arter *Student performance assessment*. Alexandria, VA. Association for Supervision and Curriculum Development. 1997

J. BIGGS, Teaching for quality learning. *The society for research in higher education*. 1999

BIRENBAUM & DOCHY, *Alternatives in assessment of achievement, learning processes and prior Knowledge*. Boston, MA. Kluwer. 1996

P. BLACK, & D. WILLIAM, Assessment and classroom learning. *Assessment in Education*, 5 (1), 1998. 7.73.

B. BLOOM & T. HASTINGS, & G. MADAUS, *Evaluación del aprendizaje*, Troquel, Buenos Aires. 1975

BLYTHE & ALLEN & SCHIEFFELIN-POWELL. *Looking together at student work*. Teachers College Press, NY. Columbia University. 1999

D. BOUD, *Implementing student self assessment*. Higher education research. 1991

D. BOUD & N. FALCHIKOV, Quantitative studies of self-assessment in higher education: a critical analysis of findings. *Higher education*, 1989. V 18, 529-549.

BROWN & KNIGHTS, *Designing course to promote reflective practice*. Research and development in higher education, 16, 1994. p. 229-234

P. BROADFOOT, *Exploring the forgotten continent: a traveler tale*. Scottish Educational Review. 26, 1993, 88-96

FJ. DOCHY & L. MCDOWELL, *Assessment as a tool for learning*. *Studies in educational evaluation*. V. 23. 1997, 273-298.

F. DOCHY & M. SEGERS & D. SLUIJSMANS, The use of self-, peer and co-assessment in higher education: a review. *Studies in Higher education*, V. 24, 1999. I3, 331-350

K. ECCLESTONE & J. PRYOR, *Learning careers or assessment careers?: the impact of assessment systems on learning*. British Educational Research Association Conference, University of Leeds, September 2001.

N. FALCHIKOV, *Product comparisons and process benefit of collaborative group and self assessments*. *Assessment and evaluation in Higher education*, 11, 2, 1986. 146-166.

L. FUCHS & D. FUCHS & C. KARNIS & C. HAMLETT, & M. Katzaroff, *Mathematics performance assessment in the classroom*. *American Educational Research Journal*, Fall, Vol. 36, No. 3. 1999

R. M. GAGNÉ, *Essentials of learning for instruction* (2nd Ed.) Hinsdale, IL. The Dryden Press. 1974

K. HALL, *Co-assessment participation of students with staff in the assessment process*. Conference on assessment and evaluation. 1995

S.J. HANRAHAN & G. ISAACS, *Assessing self and peer assessment: the student views*, on *Higher education research and development* V20. No. 1. 2001

HIGGINS & SKELTON & HARTLEY, *The conscientious consumer: re-considering the role of assessment feedback in student learning*. 2001

J. MACDONALD, & R. MASON, & N. HEAP, *Assessment and evaluation in higher education*. V24, I 3, 1999, 345-354.

D. MAGIN, & A. CHURCHES, *¿What do students learn from self and peer assessment?* on *Designing for Learning in Industry and Education*. AJET Publications, Canberra. 1988

P. ORSMOND, & S. MERRY, & K. REILING, *The use of student marking criteria in peer and self assessment*, on *Assessment and Evaluation in Higher Education*. V. 25. 2000, No. 3.

M. REYNOLDS, & K. TREHAN, *Assessment: a critical perspective*. *Studies in higher education*. V 25, I 3, 2000. 267-278.

C. ROSALES, *Criterios para una evaluación formativa*. Narcea, Madrid. 1998

R. SADLER, *Formative assessment and the design of instructional systems*, *Instructional Science*, 18, 1989, pp.119.144

D.A. SCHÖN, *Educating the reflective practitioner*. San Francisco, CA, Jossey-Bass. 1987

S. SEIDEL, & J. WALTERS, *Collaborative assessment: examining and evaluating students work*, on *Portfolio practices: thinking through the assessment of children's work*. The Apple project, project Zero, Harvard graduate school of education. NEA Professional Library Publication, Washington, D.C. 1997

L. SHEPARD, *The role of assessment in a learning culture*. *Educational researcher*, Vol. 29, No. 7. 2001

A. SIVAN, *The implementation of peer assessment: an action research approach*. *Assessment in education*. 7, 2, 193-213. 2000

H. SOMERVELL, *Issues in assessment*. *Assessment and evaluation in higher education*. V 18, 221-232. 1993

SLUIJSMANS & DOCHY & MOERKERKE, *Creating a learning environment by using self, peer and co-assessment*. *Learning Environments research* 1, 293-319. 1998

AJ. STEFANI, *Assessment in partnership with learners*. *Assessment and evaluation in higher education*. V 23, I.4 339-350. 1998

R. STIGGINS, *Assessment for learning*, *Educational researcher*, Vol 27, No. 6. 2002

K. THOMSON, & N. FALCHIKOV, "Full on until the sun comes out": the effects of assessment on student approaches to studying. *Assessment and evaluation in higher education*. V. 23, I.4, 1998, 379-390

H. WOODWARD, *Reflective journals and portfolios: learning through assessment*. *Assessment and evaluation in higher education*. V 23, I.4. 1998

H. WOODWARD, & C. SINCLAIR, *Reflective journal writing: Can student teachers be taught to be reflective?* REFLECT, *The journal of reflection in learning and teaching*. 4 (1), 1998. pp. 32-38

Luz natural en el espacio interior. Estudio de estados lumínicos en el Stata Center

Andrés Pinzón Latorre

Arquitecto egresado de la Universidad de los Andes en 2002. Candidato al título de MSc in Architecture and Architectural Engineering cursado en Delft University of Technology, Países Bajos y en Massachusetts Institute of Technology, Estados Unidos. Vinculado al Área Técnica, de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de los Andes desde 2003 hasta la actualidad.

Resumen

El ver, es el resultado de la interacción entre el cerebro, las fuentes lumínicas del entorno inmediato y los objetos que se observan. Los ojos perciben la luz y su encuentro con los materiales, las texturas y las formas que definen una arquitectura. Las cualidades de un estado lumínico tienen un efecto directo en la habitabilidad de un espacio interior, que será el ambiente para a lo largo del tiempo, la luz natural se interne, y se mueva a través de éste modificando su apariencia.

Con el propósito de conocer y predecir la transformación de luz en un espacio determinado, es necesario entender sus características como fenómeno natural. Mas allá de describir sus cualidades y calificar su presencia de acuerdo a los sentidos, es necesario cuantificar sus valores inherentes establecidos por cantidades y unidades científicas desarrolladas para tal fin. Esto permitirá encontrar y aplicar métodos apropiados para corregir deficiencias en los espacios proyectados.

Este artículo presenta un caso de estudio específico que atiende al tema de la luz natural, su importancia en arquitectura, y su desempeño en un espacio interior de un edificio educativo. Las actividades realizadas a diario por los usuarios de dicho espacio, son el punto de partida para reflexionar sobre el fenómeno de la luz en sí, entender su complejidad, y establecer estrategias de mejoramiento en los estados actuales de iluminación.

Palabras claves

Luz natural, Arquitectura, Iluminancia, Luminancia, Iluminación Artificial. Factor de Luz Natural, Reflectores Parabólicos.

Introducción

El edificio que ha sido escogido para adelantar este análisis es el Stata Center localizado en Cambridge-Massachusetts (Figura 1). Esta edificación se caracteriza por una multiplicidad formal y material. Su geometría curvilínea y sus superficies reflectivas generan condiciones espaciales especiales que introducen nuevas situaciones en el escenario de funcionamiento y confort lumínico.

El Stata Center diseñado por el arquitecto Frank Gehry ha sido la obra de mayor importancia dentro de la renovación del campus del Instituto de Tecnología de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT). Desde su apertura en marzo de 2004, distintos comenta-

rios han surgido sobre su funcionamiento. Este edificio es el resultado de los últimos avances digitales en el diseño, fabricación y ensamblaje de componentes estructurales y de cerramiento. Sin embargo, varias críticas se centran en problemas de habitabilidad, manifestados por sus usuarios.

A pesar de su alto costo de diseño y construcción, la calidad de luz natural en sus espacios interiores no es satisfactoria. Paradójicamente, muchas áreas han debido ser reacondicionadas para obtener estándares lumínicos adecuados, por lo que estudiantes y profesores han encontrado en el Stata Center un escenario inmejorable



Figura 1. Stata Center Massachusetts Institute of Technology. Arquitecto Frank Gehry

para adelantar sus investigaciones y evaluar el desempeño en el comfort de la luz natural. Dentro de esta serie de exploraciones, el grupo de tecnología constructiva del departamento de arquitectura ha iniciado un estudio que se enfoca en el problema que presentan los espacios acristalados en la arquitectura. En el caso del Stata Center, estos constituyen cerca del diez por ciento de su volumen y funcionan como atrios de luz para los niveles bajos del edificio.

Esta exploración se centra en el diagnóstico de un área en particular dentro del edificio, el entendimiento de sus estados lumínicos brinda una mejor comprensión acerca de los parámetros de diseño (aparte del simple uso de superficies acristaladas) que se deben considerar para fortalecer la calidad espacial en lo que a iluminación se refiere. A través de este análisis se mostrará como solucionar una baja afluencia lumínica por medio del diseño de reflectores de geometría parabólica.

Contexto y descripción del espacio interior de estudio

El Stata Center tuvo un costo alto de diseño y construcción comparado con similares edificaciones educativas construidas recientemente en Norteamérica, su inversión inicial de 285 millones de dolares no redundaba en los mejores beneficios para su cliente directo MIT. Una muestra de esta situación quedó evidenciada en octubre de 2007 cuando MIT demandó al arquitecto Frank Gehry por "proveer servicios de diseño y planimetría deficientes". Estos han causado problemas tales como infiltraciones de agua, grietas en mampostería, alta humedad interior, problemas de desagüe y falta de acondicionamiento para evitar el bloqueo por nieve o escombros en las salidas de emergencia.



Figura 2. Ubicación del hall dentro de la sección transversal del Stata Center.

En general, el espacio interior del Stata Center se caracteriza por su estructura no convencional, con columnas y muros girados en pronunciados ángulos, superficies que describen curvas aleatorias y materiales que cambian continuamente desde ladrillo o concreto, pasando por madera laminada hasta paneles de aluminio reflectivos o corrugados, y superficies en llamativos colores.

Dentro de sus 70.000 metros cuadrados de área construida, el Stata Center cuenta con tres niveles de aparcamiento, dos niveles de públicos con restaurantes, auditorios, y gimnasio, 7 niveles para oficinas y centros de investigación repartidos en dos torres que rodean un atrio central donde están el Café, las escaleras principales y una terraza con vista al Campus y a la ciudad.

Los pisos superiores del Stata Center son ocupados por las dependencias del Laboratorio de Informática e Inteligencia Artificial (Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, CSAIL). En su mayoría, estas

son instalaciones de oficina abierta de doble altura con acceso directo a luz natural. La entrada al laboratorio se sitúa en el piso 4, donde la transición entre el núcleo de ascensores y las áreas comunes del laboratorio se realiza a través del hall que constituye el caso de este análisis lumínico (Figura 2).

El hall tiene una longitud de 25 metros con un trayecto acristalado de 6 metros en el centro de su recorrido, su frecuencia de uso es alta durante las horas de las comidas (especialmente al mediodía) y debido a que conecta directamente con el atrio principal donde se localiza el café de la torre sur. Sumado a esto, una de las paredes laterales del hall se utiliza como la galería para los presentar los resultados de las investigaciones en curso del CSAIL.

Pórticos en perfiles de acero constituyen la estructura del hall y su ventanería es en perfilera de aluminio sobre la que se dispone un sistema de vidrio de doble hoja



Figura 3. Imagen del hall desde el vestíbulo de ascensores con cámara de aislamiento en argón.

En los extremos del hall, la estructura se cubre con paneles de cartón yeso de superficie clara, que contrasta con el tono oscuro utilizado para la alfombra.

A pesar de tener superficies transparentes en paredes y cubiertas, las ganancias por luz solar directa son mínimas en este espacio. Esto se puede constatar a través de las modelaciones del curso solar en Boston a lo largo del año: esto evidencia el bloqueo que las torres aledañas del Stata Center generan sobre el atrio vecino y por consiguiente en el hall. Por medio del diagrama estereográfico o girasol, se puede observar que solamente durante una hora al día en primavera y verano (en los meses de abril hasta septiembre) hay luz solar directa, y en otoño e invierno (desde octubre hasta marzo) la situación es más crítica con tan sólo 30 minutos de luz solar al interior del espacio por día¹ (Figura 4).

Como paso inicial para el diagnóstico lumínico del hall, se deben conocer sus dimensiones interiores, su localización dentro del edificio y su orientación, puesto que estas modelaciones son hechas utilizando el volumen tridimensional del hall y sus espacios contiguos. Alturas, áreas y la forma espacial son incluidas en la modelación para cuantificar el efecto de bloqueo o enmascaramiento sobre el espacio en estudio.

¹ El diagrama estereográfico del sol se conoce también como Girasol y la forma en que este funciona puede ser encontrada en: Rafael, VILLAZÓN. Eficiencia Lumínica en Arquitectura. 2004. pg. 46-50

² ECOTECT® es un software de análisis desarrollado por Square One research Ltd. Su aplicabilidad cubre un amplio rango de simulación y análisis de los fenómenos físicos tales como luz, sonido, temperatura o flujo de aire. La modelación en tres dimensiones de estas características, permite entender cómo un edificio opera y cómo formular estrategias para su funcionamiento energético sostenible.

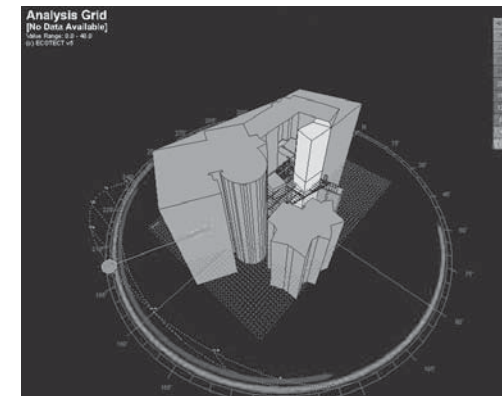


Figura 4. Diagrama de trayectoria del sol en el espacio del hall

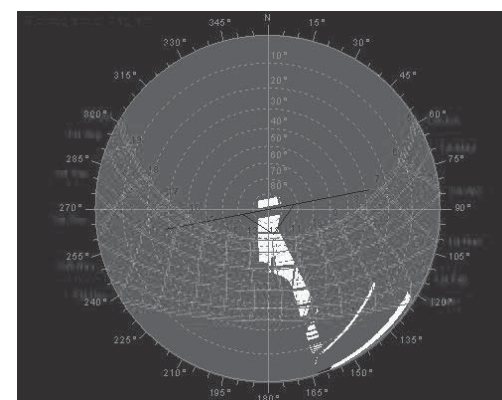


Figura 5. Modelo con recorrido del sol, donde las áreas en blanco corresponden al tiempo a lo largo del año donde el espacio recibe luz natural directa.

Por esta razón, la volumetría general del edificio fue dibujada en AutoCAD, y para el caso específico del hall se requirió de un levantamiento espacial adicional de los elementos de perfilera, ventanería y lámparas que intervienen en el desempeño lumínico del hall. El modelo completo se exportó a ECOTECT, una aplicación informática que calcula la penetración directa de la luz solar en el espacio². ECOTECT permite el análisis energético de los espacios, no sólo en términos de análisis y diseño de luz natural, sus sombras y sus reflexiones en superficies; sino también en parámetros de iluminación artificial, análisis térmicos y acústicos, ventilación y flujos de aire (Figura 5).

De la percepción a la medición

Para establecer con precisión numérica las condiciones lumínicas del espacio se tomaron mediciones a los niveles de *iluminancia*³ en 35 puntos sobre el piso del hall. (Figura 6). Estos valores se obtuvieron por medio de un luxómetro y evidenciaron el alto contraste entre la porción acristalada del hall y los extremos más oscuros, donde la variación en iluminación tiene un rango de 1.200 luxes que es una cantidad excesiva de acuerdo con los estándares óptimos de iluminación natural y artificial. Los valores más altos de iluminancia se encontraron en las áreas del pasillo con mayor número de superficies en vidrio (pared externa y cubierta) y los más bajos fueron registrados en las áreas con superficies en cartón yeso localizadas en los extremos del hall.

La iluminancia en el hall a lo largo de su recorrido fue ilustrada a través de una matriz donde en el eje vertical se tabularon los valores en luxes de los distintos puntos, y en el eje horizontal se tabuló la distancia en metros con que estos puntos se distribuyeron a lo largo del espacio (Figura 7). La función obtenida permitió particularizar cuatro campos o regiones de iluminancia a lo largo de la circulación desde los ascensores hasta la cafetería. Estas representan la variación en una longitud menor a 10 metros, las magnitudes se agrupan en región baja (0-200 lux), media (200-1000 Lux), alta (1000-1400 Lux), media baja (0-1000 Lux).

La alta variación existente en la luz natural no es atendida por el sistema de luz artificial, este es ineficaz para solucionar el fuerte contraste y el deslumbramiento generado a transitar entre las regiones descritas y particularmente con las luminarias incandescentes de *iluminación directa*⁴ utilizadas en el hall se incrementa el desequilibrio visual en términos de confort lumínico. Adicionalmente, las luminarias permanecen encendidas incluso en los días con cielo despejado cuando el hall es iluminado por la luz día, situación que redundó en un alto gasto energético. (Figuras 8 y 9).

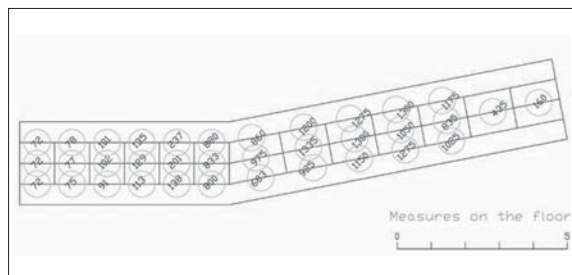


Figura 6. Planta del hall con las variaciones de iluminación.

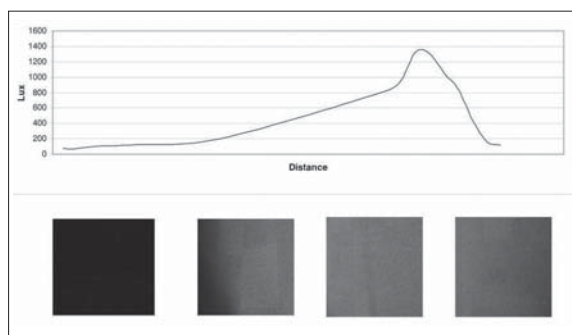


Figura 7. Variación en Iluminancia en el hall.



Figura 8 y 9. Luz artificial en el hall

3 Propiamente definida, "Luz" es el nombre dado a la radiación electromagnética que estimula una respuesta visual. Mediciones pueden determinar la brillantez de una superficie (Luminancia) o la cantidad de luz incidente (Lúmen) sobre un área en particular (Iluminancia). Estas cantidades están formuladas para encontrar la definición más adecuada de la respuesta espectral del ojo humano, en el caso de la Iluminancia, sus unidades (el lux y los pies por candelita) definen la cantidad de flujo lumínico sobre un área. Estimating Luminance and Illuminance. Technical Data Equipment ©Eastman Kodak Company, 1999

4 Las luminarias de iluminación directa son aquellas donde el 90% del flujo luminoso se concentra en el plano, con tan solo el porcentaje restante para el semiespacio superior.

Como parte complementaria a la evaluación de la iluminancia en el hall, se estudió también su *luminancia*⁵ para determinar la claridad visual que tenían las distintas superficies al transitar por el espacio. De esta forma se tomaron fotografías del hall en Alto Rango Dinámico (High Dynamic Range, HDR)⁶ que son imágenes que calculan las propiedades del iris humano e imitan su funcionamiento para representarlo en una imagen. Al entrar en un cuarto oscuro, el iris se abre permitiendo un mayor acceso de rayos lumínicos dando la sensación de que el cuarto se ilumina ligeramente. Al entrar a un cuarto altamente iluminado, el iris se cierra protegiendo la retina controlando los rayos lumínicos y dando la sensación de que el cuarto se oscurece ligeramente. (Figura 10).



Figura 10. Imagen del Alto Rango Dinámico del hall, con puntos de luminancia.

El método efectuado consistió en tomar una serie de fotografías desde el mismo punto y con el mismo objetivo pero con distintas exposiciones variando la velocidad del obturador, estas imágenes fueron unificadas en un programa de edición conocido como (PHOTOSPHERE)⁷ que las renderizó adaptándolas a la luminancia general de la zona de estudio. El resultado permitió hacer un mapeo de la luminancia en el espacio, este mapeo se sobrepuso al diagrama de las áreas de sensibilidad del ojo humano⁸ para indicar los puntos donde resplandores o deslumbramientos impedirían el confort visual adecuado para transitar por el hall (Figura 11).

Este diagrama representa las áreas de visión binocular, las áreas de visión ocular y las áreas bloqueadas por cejas y nariz. El área de la circunferencia en blanco se conoce como ergorama o visión central y corresponde al campo de visión binocular. Alrededor del ergorama se

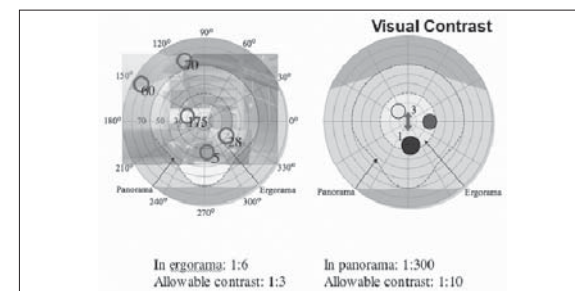


Figura 11. Contraste Visual entre Imagen HDR y Diagrama de sensibilidad del ojo. El área en blanco en el diagrama corresponde a la visión binocular, áreas en azul claro corresponden a visión ocular, y áreas en azul más oscuro corresponden a las áreas bloqueadas por cejas y nariz

encuentra la visión lejana o panorama esta es representada por el área en tonos naranja. Las áreas laterales en azul más claro corresponden al campo de visión ocular. Y las superficies superior e inferior en color azul más oscuro representan las áreas que son bloqueadas por las cejas y nariz correspondientemente.⁹

5 La luminancia se conoce también como brillo o densidad luminosa. Es la relación entre la intensidad luminosa (candelas) en una dirección determinada y la superficie aparente del objeto sobre el cual está incidiendo la luz. La luminancia es el concepto luminotécnico que corresponde a la sensación subjetiva de claridad de una fuente lumínica o de un objeto iluminado. La intensidad luminosa, el flujo luminoso y la iluminancia, no producen en nuestro ojo sensación inmediata de claridad; la luz no se hace visible hasta que tropieza con un cuerpo, que la refleja o la absorbe. La mayor o menor claridad con la que vemos distintos cuerpos depende de su luminancia, aunque todos estén igualmente iluminados. Rafael, VILLAZÓN. Eficiencia Lumínica en Arquitectura. 2004. pg. 34

6 El ojo humano es capaz de adaptar luminancias tan altas como un millón de cd/m^2 y tan bajas como $0.000.00.1 cd/m^2$. Una vez adaptado, el ojo puede cubrir un rango de luminancia de 1:1000. Sin embargo, puede llegar a un rango de 1:10000 en partes específicas de una escena observada. La mayoría de los formatos de imágenes digitales han sido diseñados de acuerdo a las capacidades gráficas computacionales. Una imagen convencional de 24 bits, con tres grupos de 8 bits en rojos, verdes y azules, puede almacenar 256 valores por cada color, resultando en 16 millones de colores. Con esta cantidad, la tecnología de visualización está lejos de entregar imágenes que tengan un rango luminoso cercano al que el ojo humano puede procesar. La información guardada en un archivo de imagen no está expresada en términos fotométricos, en lugar de describir la luminancia de un pixel en cd/m^2 , el valor se describe como más o menos oscuro. Ante estas condicionantes, las imágenes de Rango Dinámico Alto (HDR), ofrecen la posibilidad de guardar información en un formato con distintos órdenes de magnitud. Asimilando el rango luminoso del ojo humano en una forma fotométrica similar. Low Energy Architecture Research Unit of the London Metropolitan University. School of Architecture and Spatial Design (ASD) <http://www.learn.london-met.ac.uk>

7 Photosphere desarrollado por Anywhere es una herramienta que permite la creación de imágenes de Alto Rango Dinámico (HDR) a partir de imágenes del mismo objetivo pero de distinta exposición.

8 PHILLIPS, Derek. "Daylighting: Natural Light in Architecture, Human factors". Architectural Press, Oxford. 2004.

Contar con un adecuado confort visual en un ambiente de iluminación natural requiere de una distribución armónica de luminancia sin fuertes contrastes y adecuados niveles de iluminancia, en adición a un control de reflexiones y resplandores. Dos valores de luminancia altamente contrastantes en área contiguas del ojo afectarán la visión central o ergorama impidiendo un desempeño óptico satisfactorio.

En el hall, el diagrama de las áreas de sensibilidad del ojo humano y las luminancias evidencian las molestias visuales experimentadas, y que son generadas por el fuerte contraste entre las secciones más oscuras sin iluminación natural en el hall y el área central de mayor intensidad y brillo. El contraste obtenido en el ergorama calculado en (1:5)¹⁰ es superior al radio óptico visual, el cual es de proporción (1:3). Dada la corta longitud del área acristalada (6 metros) el iris se debe ajustar rápidamente mientras se transita desde el extremo oscuro hacia el centro luminoso y de nuevo hacia a la oscuridad hacia el fin del recorrido. En días claros, este contraste se incrementa generando un resplandor que constituye la mayor complicación visual en el espacio.

Esto afecta el fin del hall como punto de observación del atrio, que es el espacio donde el arquitecto ha dispuesto de una mayor complejidad geométrica en el diseño interior. Las superficies acristaladas del hall presentan problemas en detrimento de la calidad espacial, en especial la superficie de la cubierta que acumula escombros como hojas secas y polvo y requiere de un lavado regular (Figura 12).

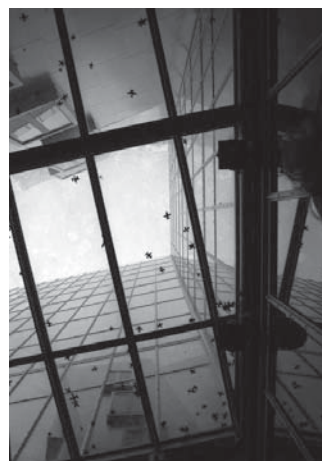


Figura 12. Cubierta del hall. Superficie acristalada horizontal.

Ideas en términos de luz natural

Los objetivos de Eficiencia Lumínica para el hall, están definidos en mejorar su calidad visual en tres áreas: distribución y rendimiento de la luz natural, así como en la adecuación de un nuevo sistema de luz artificial.

Control de variaciones de iluminación natural en rangos no superiores a 300 luxes.

La captación y transferencia de luz natural y el tratamiento de la luz artificial presentan deficiencias en este espacio. En su trayecto de 25 metros, el hall se comunica con un cuarto de juegos, un restaurante y un espacio de lectura, sin entregar mayores contribuciones en términos de luz a dichos espacios y desaprovechando

un porcentaje que puede ser utilizado para iluminar las zonas oscuras. La iluminación artificial no suple las deficiencias para un día de cielo nublado, tampoco lo hace el tipo de luminaria ni el tipo lámpara que producen un flujo y color inadecuados para el ojo del transeúnte, el cual se tiene que ajustar forzosamente a un cambio abrupto de la calidad lumínica.

El primer objetivo consiste en dispersar la cantidad de la luz recibida en el centro del hall hacia sus extremos, de modo que estos no requieran de luz artificial. Iluminado durante el día por luz natural, el hall no tendrá la sobreexposición entre las distintas regiones, se controlará el resplandor sobre las superficies acristaladas laterales

- 9 De acuerdo con las Guías de Diseño para Luz Natural en Edificaciones del Instituto Nacional de Estándares Norteamericanos y la Sociedad de Ingeniería Lumínica de Norte América (American National Standard Institute - Illuminating Engineering Society of North America ANSI-IESNA), establecen variaciones máximas de constaste entre superficies cercanas y superficies lejanas dentro del campo visual del usuario.
 Variaciones de luminancia dentro del ergorama (superficies cercanas: áreas de trabajo, lectura y escritura) no deben sobrepasar de 1 a 3.
 Variaciones de luminancia dentro del panorama (superficies lejanas: paredes, cielorraso, piso) no deben exceder de 1 a 10.
 Variaciones de luminancia entre ergorama y panorama no deben ser mayores de 1 a 2.5- 3.
- 10 Esta proporción está dada entre los valores obtenidos dentro del mismo campo.

que impide la visión en de las edificios circundantes en días soleados.

Alcanzar un mínimo de 250 lux a través del vestíbulo.

El transitar no es considerada como una tarea visual de alto rendimiento, siendo 70 lux el promedio de iluminación requerido en un hall. Sin embargo, en este caso se requiere de un promedio superior puesto que el laboratorio contiguo al hall depende de la captación solar del hall.

El uso de luz natural a lo largo del espacio reúne los distintos segmentos lumínicos contrastantes entre sí. Algunas de las partes más oscuras del hall reciben alrededor de 70 luxes, cantidad de iluminación inadecuada puesto que se requiere de luz artificial durante el día entero en estas áreas. Se debe contar con tres veces más la cantidad de iluminación natural existente para tener valores óptimos en los extremos del pasillo y ahorrar el uso de luz artificial y gasto energético.

Mejorar la eficacia de la iluminación artificial.

En el hall se utilizan lámparas incandescentes de 120 watts ineficaces en su equivalente luminoso energético, puesto que la relación entre energía que estas consumen en un tiempo específico (watts) y su flujo luminoso¹¹ (Lúmenes) es bastante bajo, generando pérdidas por transferencia de calor en espectros de onda invisible al ojo humano. Adicionalmente, tan sólo un 50% del área del hall se beneficia directamente por el tipo de luminarias usadas, la otra mitad depende de las luminarias del cuarto de juegos que permanecen apagadas la mayor parte del día.

Propuesta de Iluminación para el hall

Derivado del análisis previo, el concepto inicial para el mejoramiento lumínico del hall consiste en la adición de

una serie de espejos parabólicos (de geometría cóncava dispuestos en distintos ángulos) que capturan la luz natural recibida en la superficie acristalada reflejando esta hacia los extremos del hall. Este sistema además de controlar la variabilidad de iluminación natural del hall, aumenta el promedio de intensidad lumínica mejorando su estética lumínica. Inicialmente, se consideró el uso de espejos convencionales (superficie plana), sin embargo debido a que la superficie con más ganancia solar es la cubierta acristalada, los espejos parabólicos direccionan la luz difusa recibida sobre esta superficie.

Los espejos parabólicos son diseñados de tal modo que la luz reflejada desde un ángulo paralelo al eje de rotación es redireccionada al foco de la parábola. La luz que es enfocada es de mayor flujo luminoso puede ser usada en distintas aplicaciones desde hornos de radiación solar para exteriores, calefacción de agua, o concentración de calor la generación de fuego¹². La luz difusa también se concentra con estos espejos, aunque no en un solo punto.

El modelo espacial del hall y el Stata Center fue analizado en TracePro¹³, ECOTECT y Radiance¹⁴, aplicaciones para la visualización y el diseño de luz natural y artificial en espacios. El objetivo de la simulación se centró en comparar dos posibles esquemas de diseño para espe-

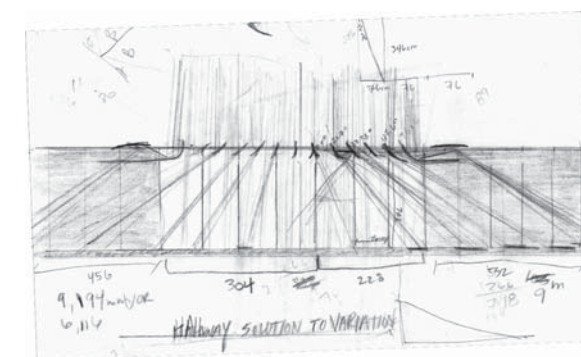


Figura 13. Croquis concepto inicial de diseño

- 11 El flujo luminoso describe la potencia emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Unidad: Lumen (lm).
 12 La antorcha de los Juegos Olímpicos es encendida a través de espejos parabólicos. Cuando el espejo es orientado en dirección del sol, la curvatura parabólica enfoca los rayos en un mismo punto hacia el centro de este en donde la concentración calórica crea una chispa para encender el fuego olímpico.
 13 TracePro® es una aplicación computacional que a partir de los principios de la óptica permite calcular y representar la trayectoria de los rayos solares para un lugar determinado, combinando modelación espacial y parámetros ópticos en una interfase gráfica. Arquitectos e Ingenieros pueden predecir los índices de iluminancia y la intensidad del flujo luminoso en un rango geométrico idealizado.
 14 Radiance es una herramienta usada para el análisis y visualización de luz natural y artificial en el diseño arquitectónico, este software permite investigar y evaluar nuevas tecnologías de iluminación. Con la información tridimensional se pueden especificar geometría, materiales, luminarias, fecha, hora y condiciones del cielo para el cálculo de luz natural. Los valores obtenidos incluyen radiación espectral (luminiscencia + color), irradiación (iluminancia + color) e índices de resplandores; expresados en mapas cromáticos, tablas numéricas o diagramas de contorno lumínicos.

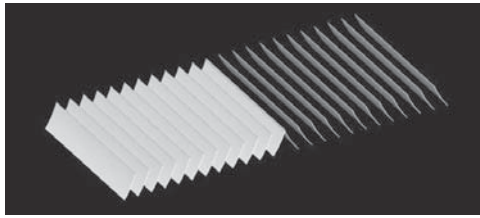


Figura 14. Primera propuesta espejos parabólicos simples a largo del hall.

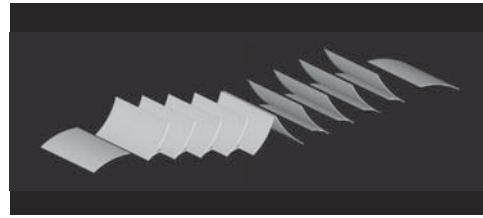


Figura 15. Segunda propuesta espejos parabólicos dobles a largo del hall.



Figura 16. Diagrama de trayectoria de los rayos solares sobre espejos parabólicos simples a lo largo del hall.



Figura 18. Diagrama de trayectoria de los rayos solares sobre espejos parabólicos dobles a lo largo del hall.

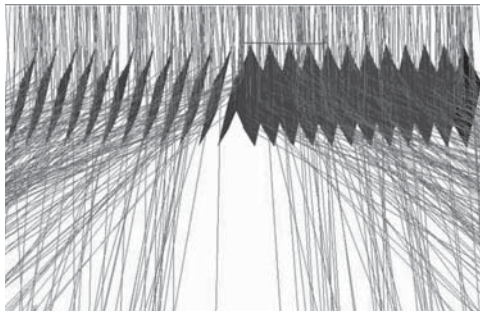


Figura 17. Detalle trayectoria de los rayos solares sobre espejos parabólicos simples a lo largo del hall.

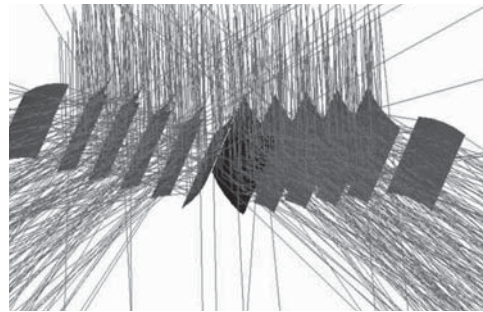


Figura 19. Detalle trayectoria de los rayos solares sobre espejos parabólicos dobles a lo largo del hall.

jos parabólicos sobre el cielorraso siendo este el plano de mayor captación de luz natural en el espacio. Una primera propuesta se centró en el uso de espejos parabólicos simples que reflejan la luz hacia los bordes del pasillo (Figura 14). Otra alternativa consistió en el juego de reflexiones entre dos espejos de distintos tamaños, uno de mayor dimensión donde se lleva a cabo una primera reflexión de luz natural enfocándose sobre un espejo de menor dimensión que redirecciona la luz en donde esta es requerida con mayor precisión (Figura 15). Esta segunda alternativa con un dispositivo de mayor área de colección solar, tiene una captación más efectiva de luz difusa debido al espacio existente entre espejos y a su direccionamiento sobre una mayor porción del cielo.

La luz que se pierde con la instalación de los espejos, se compensa con la reflexión dada por los espejos, que generalmente alcanzan una reflectividad de 90 a 95%.

Sumado a esto, la luz reflejada sobre la geometría parabólica de los espejos tiene mayor alcance hacia las zonas distantes en el pasillo.

Trayectoria de los Rayos Solares

Las distintas geometrías parabólicas de los espejos fueron estudiadas a través de los diagramas de trayectoria de los rayos solares obtenidos en TracePro, gracias a que esta herramienta permite la modelación de la luz difusa a través de la variación del ángulo de la viga incidente de luz solar y la modificación del ángulo de la viga incidente de luz solar y la curvatura de los espejos parabólicos observando su reflectividad.

La eficacia para dirigir la luz en el diseño de un sistema parabólico depende de la curvatura de la parábola y de su orientación hacia el cielo. Por ejemplo, la curvatura

se puede modificar para concentrar la luz mas cercana espejo curvado (a la izquierda del punto del foco)(Figuras 16 y 17) o más distante de este (a la derecha del punto del foco) (Figura 18 y 19); y el ángulo se rotará para determinar que tanto cielo cada colector capta y determinar la dirección en que la parábola su luz. Estos dos factores se deben balancear para alcanzar resultados óptimos.

Mapa del Factor de luz natural

Una vez se obtienen distintas propuestas de reflectores parabólicos se realiza una simulación del factor de luz natural día. El modelo tridimensional realizado en AutoCAD se importa a ECOTECT¹⁵ donde cada elemento del espacio recibe sus características como material en términos de reflexión, transmisión y absorción. Como paso siguiente se fija un valor para las condiciones exteriores del espacio, en este caso se utilizó un día de cielo nublado con una iluminancia de 6000 luxes, este valor permite simplificar el tiempo necesario para calcular los resultados.

Con estos parámetros el modelo representa la luz en su estado original, sin reflectores parabólicos en el hall, se observa un factor de luz natural de 40% (muy alto)¹⁶ directamente bajo la cubierta acristalada orientada en ángulo normal al cielo. (Figura 20). Una vez los espejos son incluidos, se observa una reducción total al factor de la luz natural en esta área pero ningún cambio importante en los extremos del hall (Figuras 21y 22).

Imágenes renderizadas de iluminancia

Para conocer la iluminación obtenida en metros cuadrados con los diseños parabólicos y comparar estos valores con los del actual hall se utilizó Radiance. En ECOTECT se localizan dos cámaras dentro del modelo de tres dimensiones del hall que muestran la visual que se tiene al transitar en los dos sentidos (*de la misma forma que se utiliza en aplicaciones como 3D Max o 3D Studio*). Esta información es exportada a Radiance donde se calculan los valores de iluminancia de las imágenes

15 Los diagramas de factor de luz natural en ECOTECT representan la iluminancia en planta (superficie del suelo) de un espacio en particular. Para tal fin, el espacio se zonifica a través de una cuadrícula donde cada unidad tiene un valor numérico y cromático.

16 En el caso del hall, el diagrama de factor de luz natural tiene un rango de valores organizados en una escala porcentual y cromática de diez niveles. El nivel de menor iluminancia tiene un valor de 0% con una representación en tonos azules y magentas, y el nivel de mayor iluminancia tiene un valor de 40% con una representación en tonos amarillos y naranjas. Las unidades intermedias son representadas en tono rojo. Los valores mostrados en el diagrama de factor de luz natural, están escalados al más alto píxel, de tal forma que la unidad de información pueda brindar la información necesaria para apreciar las variaciones de iluminancia en la imagen.

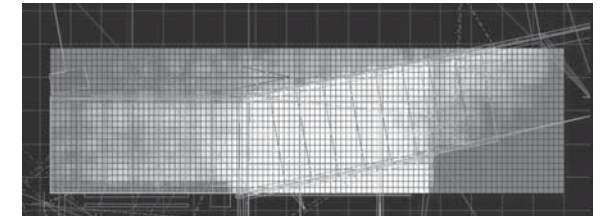


Figura 20. Mapa del Factor de luz natural del hall sin espejos parabólicos.

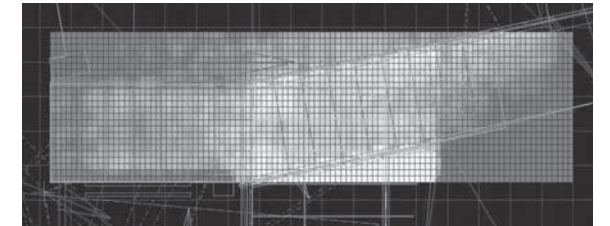


Figura 21. Mapa del Factor de luz natural del hall con espejos parabólicos simples.

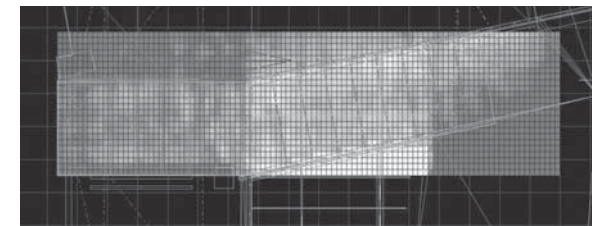


Figura 22. Mapa del Factor de luz natural del hall con espejos parabólicos dobles.

renderizadas para poder visualizar la relación entre el flujo luminoso que recibe el hall sobre su extensión y comparar el desempeño de los sistemas parabólicos sobre este espacio (Figuras 23-25).

Los resultados obtenidos en Radiance coincidieron con los mostrados por los diagramas de luz natural generados en ECOTECT (Figuras 26-28). Ambos análisis muestran una disminución de la iluminación en el centro del hall, pero carecen de una mejora sustancial en las zonas colindantes. Esto se debe a una deficiencia en el diseño de los espejos parabólicos en relación a su orientación hacia el cenit. Debido a que el cenit es la porción más brillante del cielo cada sistema parabólico debe centrarse en captar luz natural en esa dirección. Sin embargo, las propuestas acentuaron excesivamente la importan-

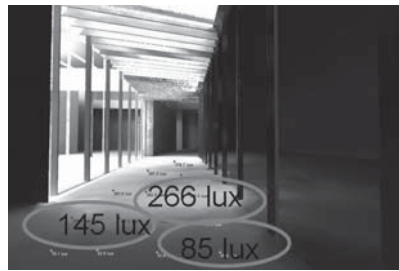


Figura 23. Mapa del Factor de luz natural del hall (sin espejos parabólicos)



Figura 24. Mapa del Factor de luz natural del hall (con espejos parabólicos simples)

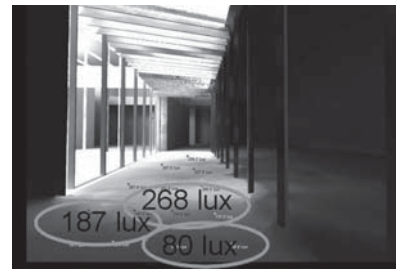


Figura 25. Mapa del Factor de luz natural del hall (con espejos parabólicos dobles)



Figura 26. Iluminación simulada en ECOTECT (sin espejos parabólicos)

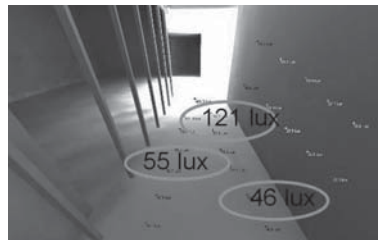


Figura 27. Iluminación simulada en ECOTECT (con espejos parabólicos simples)



Figura 28. Iluminación simulada en ECOTECT (con espejos parabólicos dobles)

cia en la dirección del cenit y descompensaron la captación proveniente de los otros ángulos de la luz difusa.

Consecuentemente, el diseño es modificado para recoger de manera mas eficiente la luz irradiada desde el cenit y los ángulos complementarios, por lo que se proponen dos nuevos sistemas con mayor numero de espejos posicionados con menor distancia entre si. Una menor distancia entre parábolas permite una mejor reflexión de los rayos incidentes de luz hacia nuevos ángulos direccionados a zonas de oscuridad.

Comparación de la información obtenida

Aunque la extensión del flujo luminoso o viga se fijo a 15 grados, los modelos fueron probados con las vigas cercanas al sistema parabólico, y su extensión no tuvo mayor influencia en el trazado de los rayos solares al interior del espacio. Las parábolas demostraron tener mejor comportamiento para reflejar la luz directa que para hacerlo con la luz difusa. Esta situación explica el por qué de los resultados que fueron obtenidos con TracePro (donde la luz es reflejada en los extremos del hall), no son consistentes con las imágenes obtenidas en Ra-

diance. Mientras en el cálculo del modelo en TracePro se incrementa en 250 luxes en los extremos del pasillo; en el cálculo del modelo en ECOTECT, los sistemas parabólicos son simplemente obstáculos con efectos mínimos en el cambio de dirección de la luz.

Propuesta de Iluminación artificial para el hall

Un nuevo sistema de iluminación es propuesto para cumplir con los objetivos concernientes a los valores de luz artificial, este consiste en el uso de un nuevo tipo de luminaria de geometría longitudinal de lámparas fluorescentes que reemplaza las luminarias de tipo local. Para tal fin se propone aislar el circuito de iluminación del hall de sus espacios contiguos (vestíbulo de ascensores y cuarto de juegos). Las luminarias fluorescentes se ocultan sobre parte de los espejos parabólicos y se enfocan en iluminación directa sobre los extremos del hall al reflejar la luz emitida de la misma forma en que la luz natural se refleja sobre los espejos parabólicos (Figuras 29 y 30).

Esta nueva propuesta de iluminación artificial representa un ahorro energético respecto al sistema utilizado ac-

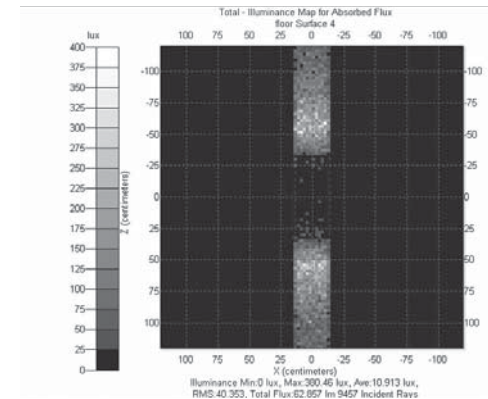


Figura 29. Simulación de iluminancia en TracePro (con espejos parabólicos simples)

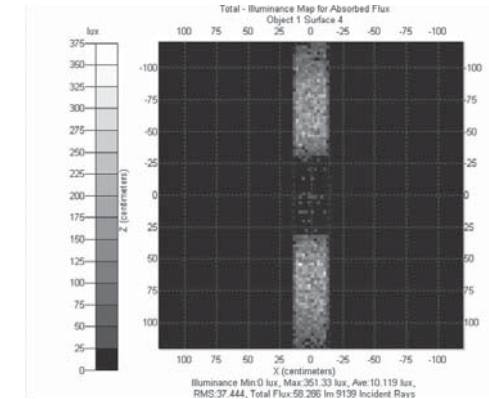


Figura 30. Simulación de iluminancia en TracePro (con espejos parabólicos dobles)



Figura 31. Efecto lumínico en TracePro (con nuevo sistema de iluminación artificial)

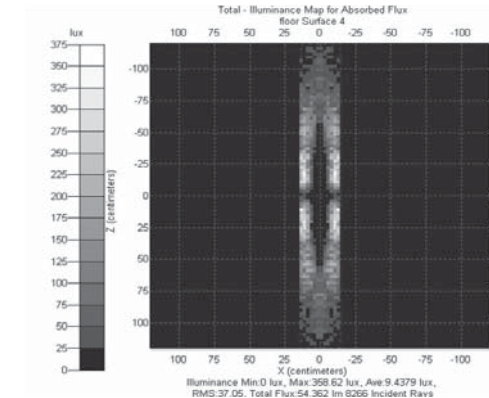


Figura 32. Simulación de iluminancia en TracePro, con luz artificial

tualmente en el hall (figuras 31 y 32) A través de simples comparaciones, se obtiene que el nuevo sistema de luces fluorescentes reduce el gasto energético en un 600% puesto que actualmente el hall utiliza seis luminarias incandescentes de 120 watts, que además de emitir luz emiten una mayor cantidad de calor que no es utilizado. Las luminarias incandescentes contribuyen en una cantidad insignificante con 10 lumen/watt de electricidad comparado a los 110 lúmenes/watt de la luz natural o luz día. De igual forma, las luminarias en el hall son parte del circuito del cuarto de juegos, y permanecen la mayor parte del tiempo encendidas incluso cuando la luz día es satisfactoria. En resumen este tipo de luminarias solo contribuye con 7200 lúmenes al espacio y consumen al año 6.300 KWH.

Por otro lado, las luminarias planteadas tienen una eficiencia de 70 lúmenes/watt, y comparadas con las incandescentes tienen siete veces mayor rendimiento en la energía que es usada para generar luz. Al independizar los espacios contiguos, sus luminarias en invierno permanecerían encendidas durante catorce horas por día. Por lo tanto se tendrían alrededor de 17.000 lúmenes en el espacio del hall al año con un consumo aproximado de 1200 KWH, comparado con el actual sistema. Esta nueva propuesta utiliza 1/6 de la energía, esto redundaría en un ahorro de 400 dólares al año por costos eléctricos acorde con las tarifas eléctricas del estado de Massachusetts (11 centavos de dólar por 1 KWH).

Conclusiones

El sistema de espejos reflectivos en el hall alcanzó una variación de menos de 300 lux en el área central, un valor mínimo de 250 lux a lo largo del hall¹⁷, y un sistema de luz artificial más eficiente al utilizado. Estos factores se combinan en una solución estética que integra el tratamiento de la luz natural (captación y redistribución) con un esquema complementario de iluminación, direccionando las carencias presentadas en el espacio actual. El análisis del factor de luz natural demuestra que aunque la variación a través del hall es disminuida con la adición del sistema parabólico, ésta se debe en gran parte al bloqueo de este sistema sobre la cubierta acristalada.

Sumado a esto, los espejos parabólicos no contribuyeron perceptiblemente a la iluminación total del espacio, esto se comprobó simulando el sistema con un material no reflectivo como el concreto (Figuras 33 y 34). El hall simulado con espejos reflectivos no fue significativamente más brillante que el hall simulado con superficies parabólicas en concreto, donde más allá del material prima la geometría dada al dispositivo para mejorar las condiciones espaciales¹⁸.

Sin embargo, más allá del resultado obtenido en el proyecto, las enseñanzas derivadas del estudio de este espacio son las siguientes:

1. El uso del dispositivo de espejos parabólicos no obtiene el mayor rendimiento debido a la carencia de luz difusa para distribuir esta adecuadamente a través del hall, esto debido a que el espacio del atrio es bloqueado por las torres circundantes, y tan solo una pequeña porción del cielo contribuye con luz difusa en el espacio. Para redistribuir la luz con eficacia se necesitaría capturar una porción más grande del cielo.



Figura 33. Efecto de espejos parabólicos con superficies reflectivas

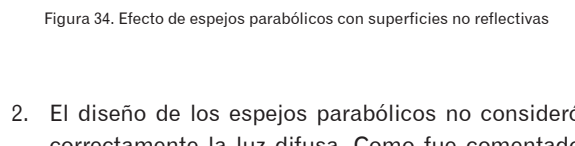


Figura 34. Efecto de espejos parabólicos con superficies no reflectivas

2. El diseño de los espejos parabólicos no consideró correctamente la luz difusa. Como fue comentado el espaciado entre los espejos parabólicos fue muy pequeño para centrarse en dirección de la luz del cenit. Un mayor espacio permitiría que estos elementos capturaran a través de una gama más amplia, rayos de ángulos más agudos.
3. La cantidad de luz que es redireccionada no es perceptiblemente mayor que la cantidad de luz que es bloqueada por los reflectores.
4. Las imágenes obtenidas requieren de mayor desarrollo. Las condiciones de radiación seleccionadas se centraron en el uso de la cantidad más baja de luz difusa. Quizás la ligera contribución bajo estas condiciones necesitaría ser refinada con valores más altos de luz difusa para apreciar la diferencia del sistema de espejos reflectivos sobre el espacio.

Profundización del estudio

Si se continuase en el desarrollo de este proyecto, se apuntaría al análisis de los factores que carecen o contribuyen con un estado de iluminación apropiado. Las propuestas podrían incluir un tratamiento de reflectores parabólicos a nivel de la cubierta del edificio como los utilizados en el edificio Genzyme Center en Cambridge,

Massachusetts¹⁹. En el caso del Stata Center estos podrían instalarse en la cubierta contigua a la cubierta del atrio en el quinto piso del edificio. Este tipo de sistema tendría el valor agregado de no bloquear en absoluto la luz natural, sin embargo modificaría sustancialmente la arquitectura del espacio, contradiciendo la filosofía del diseño de este proyecto.

La investigación es pieza fundamental para el desarrollo de este tipo de proyectos así como la participación de distintos profesionales interesados en el desarrollo tecnológico de los edificios²⁰. Con un entendimiento de los avances tecnológicos no solo en disciplinas como luminotecnia, sino también en ramas como acústica, estructuras, y energía, el arquitecto está en capacidad de trabajar sobre una misma plataforma con los distintos profesionales de ingeniería que participan en el desarrollo de un proyecto. Las nuevas herramientas tecnológicas como los distintos softwares mostrados en

este artículo, permiten que el diseño arquitectónico sea estudiado desde un componente científico a través de disciplinas exactas que aportan respuestas concretas a los problemas del confort espacial. Por lo que un mayor conocimiento de estos recursos permitirá que el diseñador utilice un lenguaje tecnológico donde prevalecen los intereses estéticos de su profesión.

Las innovaciones tecnológicas se centran en el reconocer las conexiones entre los usuarios y sus espacios. Estas son producto de la reflexión de los arquitectos: Los métodos para alcanzarlas son diversos: desde experimentar con modelos físicos hasta simular ambientes interactivos de información. Ya sea de una u otra forma, el valorar un tema como la luz natural en el proceso de diseño, conocerlo, moldearlo y potenciarlo redundará en la producción de nuevas ideas y conceptos que direccionan la creatividad en arquitectura.

Bibliografía

Referencia Directa

Derek PHILLIPS, Daylighting: Natural Light in Architecture, Human factors. Architectural Press, Oxford, 2004

Ben STEIN, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings. John Willey & Sons, Inc. New York, 2000

Rafael VILLAZÓN, Eficiencia Lumínica en Arquitectura. Ediciones Uniandes. Bogotá, 2004

Consulta Técnica

The ASHRAE GreenGuide. ASHRAE Press, 2004

American National Standard Institute - Illuminating Engineering Society of North America ANSI-IESNA

Estimating Luminance and Illuminance. Technical Data Equipment ©Eastman Kodak Company, 1999

17 El General Lighting Design tiene como estrategia proveer uniformemente la luz a través del espacio, este enfoque produce generalmente un patrón lumínico de altos niveles ligeramente más altos que el promedio en el centro del espacio y ligeramente más pequeños en las esquinas de este. Los valores de iluminancia para un hall en un edificio de uso educativo como el Stata Center de MIT están en un rango mínimo de 100 lux, un rango recomendado de 150 lux y un rango óptimo de 200 lux. pg. 33 Villazon, Rafael. 2004. Eficiencia Lumínica en Arquitectura.(pg. 33)

18 El uso de superficies reflectivas con geometrías parabólicas en materiales como el concreto ha sido un recurso clave en la definición espacial y lumínica en proyectos tales como la Biblioteca El Tintal del Arquitecto Daniel Bermúdez. En el caso de Bogotá a diferencia de Boston, la preocupación está dada por controlar la iluminación directa a lo largo del año y no por su captación en invierno y su protección en verano. Sin embargo, la geometría parabólica de los "bolsillos de iluminación" permite que el espacio de lectura se proteja de luz natural directa y obtiene luz indirecta en una mayor profundidad dentro del espacio.

19 El Genzyme Center (2000-05) diseñado por los arquitectos Behnisch, Behnisch and Partners (Stuttgart Alemania) ha sido reconocido por el U.S Green Building Council con un rango importante dentro del sistema de evaluación de sostenibilidad en edificios. Este es la certificación Platinum, y se otorga dentro del Consejo de Iniciativas en Energía y Diseño Ambiental (Council's LEED: Leadership in Energy and Environmental Design).

El diseño lumínico de este edificio incorpora diferentes dispositivos que incrementan la cantidad de luz natural al interior del edificio. El Genzyme Center es un edificio de oficinas que se ilumina a través de un atrio central de doce pisos de altura con una cubierta acristalada, y con reflectores parabólicos como parte de las estrategias para contar con luz natural en los niveles inferiores del atrio. El resultado obtenido es un ahorro de un 42% de la energía consumida en electricidad comparado con un edificio de oficinas de las mismas características.

20 Este proyecto se desarrolló como parte del Curso en Iluminación Natural ofrecido por el Building Technology Program de Massachusetts Institute of Technology en el segundo semestre de 2006. El equipo de investigación fue conformado por: Jason Alcaraz (Ingeniero Civil), Andres Pinzon Latorre (Arquitecto), David Quinn (Ingeniero Civil), y Kellie Stokes (Ingeniera Mecánico).