



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# Otimização da geometria de plantas de edifícios para satisfação de requisitos de iluminação, conforto térmico e consumo energético

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

**Autor**

**Mara Filipa Tavares Pereira**

**Orientadores**

**Álvaro F. P. C. O. Gomes (Prof. Auxiliar, DEEC, FCTUC)**

**Eugénio M. S. Rodrigues (Investigador, ADAI-LAETA, INESCC)**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira  
Gomes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

---

Coimbra, Julho, 2015

“Success is not final, failure is not fatal. It is the courage to continue that counts.”

Winston s. Churchill

Aos meus pais e irmã.

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus orientadores Professor Doutor Álvaro Gomes, Professor Doutor Adélio Gaspar e Doutor Eugénio Rodrigues pelo seu apoio incansável. Durante todo este percurso estiveram sempre disponíveis e apoiaram o meu trabalho discutindo e analisando as minhas ideias e dúvidas de forma construtiva. Agradeço também pela amabilidade, amizade e boa disposição em todos os momentos e que fizeram com que chegasse ao fim deste trabalho com um enorme sentimento de satisfação. Sem o constante estímulo e confiança que depositaram em mim certamente não teria chegado tão longe.

Expresso também a minha gratidão aos meus amigos e a todos os que acompanharam e fizeram parte do meu percurso académico, especialmente às minhas colegas de casa Carla e Patrícia, e à Marta com a qual partilhei alguns dos momentos mais marcantes e importantes da minha vida

Por último agradeço profundamente aos meus pais e à minha irmã Isabel por sempre acreditarem em mim e nas minhas capacidades e sempre me apoiaram em todas as minhas decisões. Sem vocês tudo o que consegui até hoje não seria possível. Muito obrigada!

## Resumo

No sentido de incorporar ferramentas de simulação numa fase mais inicial de projeto, investigadores da Universidade de Coimbra tem vindo a desenvolver algoritmos acoplados à simulação dinâmica de edifícios. Estes algoritmos permitem auxiliar os projetistas na fase inicial do projeto ao gerar, avaliar e otimizar soluções alternativas de plantas de arquitetura. O primeiro algoritmo, chamado de Programa Evolucionário para o Problema de Alocação de Espaços (EPSAP), permite criar diferentes soluções de plantas de acordo com as preferências do cliente. O segundo algoritmo, chamado de Programa de Otimização de Desempenho de Plantas (FPOP), avalia-as e otimiza-as de acordo com o seu desempenho térmico.

Contudo, este algoritmo não leva em consideração outros objetivos que concorrem com o desempenho térmico do edifício, como as necessidades de iluminação artificial e a sua influência no consumo energético. Assim, na presente dissertação, o algoritmo FPOP será estendido para incluir os objetivos de otimização de consumo energético total, resultante da agregação das necessidades energéticas de iluminação, aquecimento e arrefecimento.

Para tal, quer a função objetiva, que anteriormente estava formatada para o cálculo do desempenho térmico, quer a parametrização dos objetos de simulação irão ser alterados a fim de incorporar a iluminação artificial no modelo de simulação e quantificar as necessidades energéticas. As plantas geradas pelo algoritmo EPSAP irão então ser importadas, avaliadas e otimizadas no algoritmo FPOP. A otimização irá procurar minimizar os consumos energéticos alterando as variáveis de decisão através de operadores geométricos específicos, tais como a orientação do edificado, localização dos vãos, posição relativa do vão na parede, translação de paredes, reflexão da planta, dimensionamento dos vãos, e dimensionamento das palas horizontais e verticais.

Esta abordagem foi testada em diferentes casos de estudo e o desempenho do novo algoritmo analisado. Os resultados demonstram que a introdução de sistemas controlados de iluminação e sombreamento melhoram significativamente o desempenho energético das plantas de arquitetura geradas.

**Palavras-chave:** Controlo da iluminação, Controlo de sombreamentos, Geração automática de plantas, Simulação energética de edifícios, Otimização do desempenho energético.

## **Abstract**

To incorporate simulation tools at an earlier stage of the project, researchers from the University of Coimbra have developed algorithms coupled with dynamic simulation in buildings. These algorithms assist designers in the initial stage of the project by generating, evaluating and optimizing alternative solutions to architectural plans. The first algorithm, called Evolutionary Program for Space Allocation Problem (EPSAP), allows the creation of different floor plan solutions according to customer preferences. The second algorithm, called the Floor Plan Performance Optimization Program (FPOP), evaluates them and optimizes them according to their thermal performance.

However, this algorithm does not take into consideration other goals that compete with thermal performance of the building as the need for artificial lighting and its influence on energy consumption. Thus, in this thesis, the FPOP algorithm will be extended to include the total energy consumption optimization objectives, resulting from the aggregation of the energy needs of lighting, heating and cooling.

To do this, either the objective function, which was previously formatted for the calculation of thermal performance, whether the parameterization of the simulation objects will be amended to incorporate the artificial lighting in the simulation model and quantify the energy requirements. The floor plans generated by EPSAP algorithm will then be imported, evaluated and optimized on the FPOP algorithm. The optimization will seek to minimize energy consumption by changing the decision variables through specific geometric operators, such as the floor plan orientation, opening translation, floor plan reflection, opening dimension, wall translation and fin and overhang dimension.

This approach was tested in different case studies and the performance of the new algorithm analyzed. The results demonstrate that the introduction of controlled lighting and shading systems significantly improve the energy performance of generated architectural plans.

**Keywords** Daylighting Control, Shading Control, Automated Floor Plan Design, Energy Efficiency in Buildings, Energy Performance Optimization.

---

## Índice

|  |      |
|--|------|
| Índice de Figuras .....  | viii |
| Índice de Tabelas .....  | x    |
| Simbologia e Siglas .....  | xi   |
| Siglas .....   | xi   |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 1    |
| 1.1. Enquadramento .....   | 1    |
| 1.2. Objetivos .....   | 3    |
| 1.3. Estrutura da dissertação .....  | 5    |
| 2. ESTADO DA ARTE .....  | 6    |
| 2.1. Desempenho Energético em Edifícios .....  | 6    |
| 2.1.1. Características exteriores ao edifício .....  | 7    |
| 2.1.2. Características da construção .....   | 8    |
| 2.2. Geração automática de plantas .....   | 11   |
| 2.3. Simulação energética em edifícios .....   | 14   |
| 2.4. Simulação de iluminação .....   | 16   |
| 3. METODOLOGIA .....   | 20   |
| 3.1. <i>Evolutionary Program for Space Allocation Problem (EPSAP)</i> .....                | 20   |
| 3.2. <i>Floor Plan Performance Optimization Program (FPOP)</i> .....                       | 22   |
| 3.3. Simulação da iluminação .....   | 25   |
| 3.3.1. Controlo da iluminação .....  | 26   |
| 3.3.2. Controlo dos sombreamentos .....  | 30   |
| 3.3.3. Controlo dos sistemas de climatização .....   | 35   |
| 3.4. FPOP – Incorporação dos objetos e função objetivo .....                               | 36   |
| 3.4.1. Objetos .....   | 36   |
| 3.4.2. Função Objetivo .....   | 38   |
| 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO .....   | 40   |
| 5. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....  | 54   |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 56   |
| ANEXO A – Algoritmo de Controlo da Iluminação .....  | 59   |
| ANEXO B – Objetos WindowMaterial:Blind e WindowProperty:ShadingControl .....               | 60   |
| ANEXO C – Objetos HVACTemplate:Thermostat e<br>HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem ..... | 61   |



Otimização da geometria de plantas de edifícios para satisfação de requisitos de iluminação, conforto térmico e consumo energético.

Índice

---

|   |    |
|---|----|
| ANEXO D – Sistemas de Construção das Plantas .....              | 62 |
| ANEXO E – Influência dos operadores nos consumos por zona ..... | 63 |

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1. Distribuição dos concelhos por zona climática de acordo com o RCCTE (2006).<br>.....   | 7  |
| Figura 2.2. Comparação entre diferentes abordagens de acordo com os objetivos, variáveis de projeto e aspetos topológicos (Rodrigues et al., 2013b, 2013c). .... | 13 |
| Figura 2.3. Custo das decisões e impacto na eficiência da construção ao longo das várias fases de projeto (Al-Homoud, 2001). ....                                | 14 |
| Figura 2.4. Estratégia de otimização baseada na simulação da eficiência em edifícios (Nguyen et al., 2014). ....   | 15 |
| Figura 2.5. Estimativa de utilização dos programas mais usados em simulação energética de edifícios (Nguyen et al., 2014). ....                                  | 16 |
| Figura 2.6. Circuito fechado de sombreamento combinado e circuito fechado de controlo de iluminação (Mukherjee, 2010). ....                                      | 18 |
| Figura 2.7. Controlo integrado da iluminação artificial e da iluminação natural (Shen et al., 2014). ....  | 19 |
| Figura 3.1. Fluxograma EPSAP (Rodrigues et al., 2013b, 2013c). ....  | 21 |
| Figura 3.2. Fluxograma FPOP (Rodrigues et al., 2014a, 2014b). ....   | 24 |
| Figura 3.3. Exemplo de aplicação de pontos de referência. ....   | 27 |
| Figura 3.4. Representação da regulação contínua da iluminação artificial ( <i>InputOutput Reference – EnergyPlus Manual</i> (2013)). ....                        | 29 |
| Figura 3.5. Características das lâminas para sistemas do tipo persiana ( <i>InputOutput Reference – EnergyPlus Manual</i> ). ....                                | 31 |
| Figura 3.6. Exemplo de construção para o elemento persiana. ....   | 32 |
| Figura 3.7. Posições possíveis para os sombreamentos do tipo persiana ( <i>InputOutput Reference – EnergyPlus Manual</i> ). ....                                 | 32 |
| Figura 3.8. Solução para atuação parcial das persianas. ....   | 33 |
| Figura 3.9. Plantas geradas pelo EPSAP e utilizadas para os cálculos do desempenho energético global (Planta (a) e Planta (b)). ....                             | 35 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.10. Metodologia seguida para a integração do objeto <i>Daylighting Control</i> no FPOP. ....                     | 37 |
| Figura 3.11. Metodologia seguida para a integração dos objetos <i>WindowMaterial:Blind e ShadingControl</i> no FPOP. .... | 37 |
| Figura 4.1. Plantas utilizadas para o presente estudo de caso (Planta (a), Planta (b) e Planta (c)). ....                 | 40 |
| Figura 4.2. Evolução das necessidades energéticas totais para os diferentes tipos de controlo em cada planta. ....        | 42 |
| Figura 4.3. Evolução dos consumos por indicador para os diferentes tipos de controlo – Planta (a). ....                   | 47 |
| Figura 4.4. Evolução dos consumos por indicador para os diferentes tipos de controlo – Planta (b). ....                   | 48 |
| Figura 4.5. Evolução dos consumos por indicador para os diferentes tipos de controlo – Planta (c). ....                   | 49 |
| Figura 4.6. Plantas obtidas após otimização. ....   | 51 |
| Figura 4.7. Reduções energéticas por operador nos diferentes tipos de controlo. ....                                      | 52 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1. Operadores do FPOP e respetivas transformações geométricas associadas.....   | 23 |
| Tabela 3.2. Potência utilizada por espaço tipo de acordo com os Critérios CPE da UE relativos à iluminação interior.....                 | 25 |
| Tabela 3.3. Horário de funcionamento dos dispositivos de iluminação.....   | 26 |
| Tabela 3.4. Perfil de ocupação dos espaços.....  | 26 |
| Tabela 3.5. Níveis de Iluminância por espaço tipo ( <i>IESNA The Lighting Handbook</i> , 2000).<br>.....                                 | 28 |
| Tabela 3.6. Valores recomendados para o índice de desconforto máximo de brilho ( <i>InputOutput Reference – EnergyPlus Manual</i> )..... | 29 |
| Tabela 3.7. Consumo energético global resultante de cada tipo de controlo de sombreamentos.....  | 35 |
| Tabela 4.1. Consumos energéticos finais totais por planta.....   | 41 |
| Tabela 4.2. Operadores geométricos de otimização energética.....   | 43 |
| Tabela 4.3. Soma das frações de tempo (horas por ano) em que as persianas estão ativas - Planta (a).....                                 | 44 |
| Tabela 4.4. Consumos energéticos finais por indicador - Planta (a). ....   | 45 |
| Tabela 4.5. Consumos energéticos finais por indicador - Planta (b). ....   | 45 |
| Tabela 4.6. Consumos energéticos finais por indicador - Planta (c). ....   | 45 |

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Siglas

IESNA – *Illuminating Engineering Society of North America*

UE – União Europeia

CPE – Contratos Públicos Ecológicos

IEA – *International Energy Agency*

UC – Universidade de Coimbra

EE – Estratégia Evolucionária

EPSAP – *Evolutionary Program for Space Allocation Problem*

FPOP – *Floor Plan Performance Optimization Program*

SHC – *Stochastic Hill Climbing*

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers*

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico em

Edifícios

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Desde que o homem procurou refugio em habitats construídos pelo mesmo até aos dias de hoje o avanço na construção de edifícios tem sido notória. Passou a ser cada vez mais importante não só que a construção preenchesse as necessidades mais básicas, como a proteção contra condições atmosféricas adversas como a chuva ou o vento, mas também que aliasse a estas a eficiência energética e térmica permitindo assim que se reduzam os gastos e desperdícios associados. O conforto aliado aos baixos consumos de energia tornou-se fundamental, e é cada vez mais importante adotar medidas e estratégias que permitam que estes requisitos sejam satisfeitos.

Contudo, estes princípios de eficiência em edifícios ainda não estão completamente integrados na nossa sociedade. Segundo as estatísticas da IEA (International Energy Agency, 2012), o consumo de energia elétrica tem aumentado significativamente durante os últimos 40 anos. Os edifícios comerciais e residenciais são responsáveis por aproximadamente 62% do consumo final de energia elétrica em Portugal. Desde o ano de 1970 até 2010 o consumo de energia por parte destes quase duplicou fazendo deste um aspeto sensível e que deve ser melhorado.

Nos edifícios comerciais os gastos com a iluminação são relativamente elevados, representando 44% dos consumos totais (International Energy Agency, 2012). Nos edifícios residenciais estes gastos não são tão significativos, no entanto assumem também uma percentagem considerável de 13,6% (Instituto Nacional de Estatística, 2011). O uso de estratégias adequadas pode reduzir significativamente o consumo energético relativo à iluminação artificial. Nestas estratégias destacam-se duas vertentes: reduzir as necessidades e reduzir o consumo de energia, quer aumentando a eficiência do equipamento quer melhorando a utilização do consumo de energia.

As ferramentas de simulação energética e térmica são extremamente importantes no projeto e construção de edifícios. Este tipo de *softwares* de simulação permite determinar variáveis que posteriormente auxiliam os projetistas na decisão sobre as melhores medidas a tomar em conta. Atualmente são necessários instrumentos que possam responder a questões e necessidades específicas durante a fase inicial do projeto de um edifício, uma vez que é durante esta etapa que se implementam medidas significativas que permitem reduzir as necessidades energéticas e térmicas do mesmo. Através do uso destes instrumentos, torna-se possível prever o comportamento térmico e simular os gastos energéticos mesmo antes da construção, permitindo assim que se faça a melhor escolha de forma a melhorar o desempenho energético do edifício.

A maioria dos arquitetos, mesmo quando têm em consideração o comportamento térmico dos edifícios, baseiam-se muito em experiências e trabalhos anteriores aquando da construção de um novo edifício. Além disso, o seu trabalho tem muitas vezes como objeto um número muito reduzido de potenciais soluções construtivas, deixando de parte outras soluções que poderiam possivelmente ter um melhor desempenho. Considerando o quão importante é a análise e comparação de várias soluções para uma tomada de decisão mais informada, urge dotar os profissionais envolvidos no projeto de ferramentas que tornem possível essa análise mais abrangente.

Apesar do elevado potencial dos programas de simulação de edifícios, estes ainda não são usados de forma massificada nos trabalhos de arquitetura. Isto deve-se maioritariamente à complexidade associada ao seu uso, nomeadamente à construção dos modelos de simulação, à dificuldade na interpretação dos resultados, e à necessidade de especificações que normalmente são inexistentes nas fases iniciais do projeto. Para além disto, a necessidade de repetição de simulações leva a que este seja um processo lento e, portanto, nem sempre condizente com as necessidades inerentes.

Têm vindo a ser desenvolvidas novas técnicas para o aperfeiçoamento das soluções de construção, no entanto, estas focam-se nas fases finais do projeto, o que não tem tanto interesse pois as principais decisões que poderiam vir a melhorar o desempenho do edifício são normalmente tomadas (ou ignoradas) na fase inicial do mesmo.

Tendo em conta os problemas descritos anteriormente, foi desenvolvido um algoritmo de geração e otimização automática de plantas (Rodrigues, Gaspar, & Gomes, 2013a, 2013b, 2013c), algoritmo este que se foca na fase inicial do projeto. Este algoritmo trata então, numa primeira fase, da geração automática de diferentes soluções de plantas de arquitetura de acordo com as especificações dadas, e numa segunda fase da análise e otimização térmica destas mesmas soluções.

O primeiro algoritmo, EPSAP (*Evolutionary Program for Space Allocation Problem*), consiste numa técnica de computação evolucionária que combina uma Estratégia Evolutiva com uma técnica de *Stochastic Hill Climbing* (SHC). Este, visa otimizar um conjunto de objetivos, considerando preferências e requisitos definidos pelo projetista. O segundo algoritmo, FPOP (*Floor Plan Performance Optimization Program*), procura otimizar o desempenho térmico das plantas geradas anteriormente com recurso a simulação dinâmica. Aqui a transformação faz-se por alterações geométricas nas plantas obtidas anteriormente que, respeitando ainda o programa funcional, permite um melhor desempenho térmico (Rodrigues et al., 2013a, 2013b, 2013c).

## 1.2. Objetivos

Como referido anteriormente, foram criados dois algoritmos que permitem a geração automática de plantas de arquitetura e a sua análise térmica. No entanto, este algoritmo executa transformações geométricas e alterações das divisões, das paredes e suas conexões, dos vãos envidraçados, etc., deixando de parte fatores importantes como o controlo da iluminação artificial, ou a influência dos sombreamentos na performance térmica e energética das mesmas.

A presente dissertação tem como objetivo a inclusão, no trabalho de investigação referido anteriormente, da componente iluminação no processo de otimização, onde serão analisados os impactos de diferentes estratégias de iluminação neste mesmo processo. Sendo este fator um dos principais responsáveis pelos elevados consumos e gastos de energia elétrica e contribuir para os ganhos térmicos da construção, que podem ser desejados ou não,



revela-se fundamental implementar no programa criado funções que englobem o contributo da iluminação artificial no processo de otimização.

É importante, no entanto, quando falamos em iluminação artificial, ter em conta também a contribuição da luz natural proveniente do ambiente exterior, pois esta última afeta consideravelmente a quantidade de iluminação artificial necessária em determinada zona. Não podemos também deixar de parte os sombreamentos, como persianas ou cortinas, que melhoram significativamente o conforto visual e que podem contribuir para alterar a carga térmica nos espaços e também para variar a necessidade de utilização dos sistemas de iluminação artificial.

É imperativo desenvolver estratégias que minimizem o uso de energia para os fins anteriormente citados. O controlo avançado de sistemas de iluminação oferece um dos melhores métodos de redução destes consumos, ao mesmo tempo que melhora significativamente a satisfação dos ocupantes. O controlo da iluminação artificial em conjunto com o controlo adequado da iluminação natural são essenciais para a otimização das condições de iluminação de uma determinada zona dentro de um edifício. Explorando a luz natural vinda do exterior podemos aumentar ou diminuir a quantidade de luz artificial, variando a energia consumida. É também essencial que a iluminação artificial e os sistemas de sombreamento se completem para criar um ambiente visualmente confortável.

O uso de *dimming*<sup>1</sup> associado ao controlo automático dos sistemas de sombreamento podem bloquear a luz solar direta, fornecer a iluminância necessária para cada espaço tipo e poupar energia mantendo níveis adequados de iluminação nos espaços. Este tipo de sistemas podem resultar em poupanças entre 30-77% no consumo de iluminação artificial (Shen, Hu, & Patel, 2014).

A abordagem proposta pretende então aliar ao algoritmo previamente criado, o FPOP, a análise energética das plantas previamente geradas pelo EPSAP, tendo em conta fatores como o controlo automático dos sistemas de iluminação artificial e também o controlo automático dos sistemas de sombreamento.

---

<sup>1</sup> Dimming: controlo da intensidade da corrente elétrica média de uma carga (controlo da intensidade de luz produzida por uma lâmpada – aumento ou diminuição da intensidade luminosa).

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

O segundo capítulo fala do Estado da Arte e de aspetos como o desempenho energético em edifícios, a geração automática de plantas, simulação energética de edifícios e a simulação de sistemas de iluminação.

O terceiro capítulo aborda a metodologia usada para a criação dos algoritmos EPSAP e FPOP e uma explicação resumida do seu modo de funcionamento. É feita também uma caracterização dos objetos usados através do programa *EnergyPlus* e posteriormente o modo como estes foram implementados no algoritmo FPOP e o desenvolvimento da função objetivo para o caso da otimização energética.

O quarto capítulo apresenta os casos de estudo realizados com base nas alterações feitas anteriormente, a sua análise e a sua discussão.

Por fim, no capítulo cinco são apresentadas as conclusões finais e propostas de desenvolvimentos futuros.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Desempenho Energético em Edifícios

A avaliação do desempenho energético em edifícios é crucial na determinação do uso de energia nos mesmos e é a base para qualquer decisão no que diz respeito ao aumento da eficiência energética. O termo eficiência energética é definido como: “usar menos energia sem comprometer o desempenho do edifício” (Wang, Yan, & Xiao, 2012), e pode ter diversas contribuições tais como: a utilização de fontes luminosas mais eficientes, redução das necessidades de iluminação artificial através da utilização ótima de luz natural e da adequada alocação aos diferentes tipos de espaços, e utilização criteriosa do serviço de iluminação, por exemplo, reduzindo as necessidades. Resumidamente, este termo indica a qualidade de um edifício em termos energéticos. É importante também ter em conta os indicadores de desempenho energético. Estas são medidas quantificáveis para avaliar o desempenho do edifício, sendo que o mais frequentemente usado para muitos tipos de construção é o da densidade do uso de energia, ou seja, kWh/m<sup>2</sup>. Além disso, o controlo integrado da iluminação artificial com a iluminação natural pode passar pelo controlo de dispositivos de sombreamento (persianas, cortinas, etc.) que além de alterar a quantidade de luz incidente no espaço em análise podem também alterar a componente de carga térmica desse espaço. É de salientar que a análise do impacto dos sistemas de iluminação artificial no desempenho de edifícios terá necessariamente que levar em conta duas vertentes: a iluminação propriamente dita e a componente térmica. Os sistemas de iluminação artificial além da radiação no espectro visível (luz) também emitem calor. Daí ser essencial efetuar uma análise integrada iluminação/térmica dos edifícios.

No presente subcapítulo apresentam-se diversas características que influenciam o desempenho energético em edifícios. Devido à grande extensão deste tema, que vai desde as características exteriores do edifício até aos equipamentos e iluminação que integram o seu

interior, irá apenas ser realizada uma abordagem de alguns dos aspetos mais importantes sobre este tópico.

### 2.1.1. Características exteriores ao edifício

#### Localização (Clima)

A localização de um edifício é muito importante no que respeita às necessidades térmicas do espaço interior. Estas necessidades estão descritas no Decreto-Lei 80/2006, de 4 Abril, RCCTE (Conselho de Ministros, 2006) que estabelece os requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos edifícios de serviços sem sistemas de climatização, nomeadamente ao nível das características da envolvente, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos.

De acordo com o RCCTE, Portugal Continental é dividido em seis zonas climáticas, três zonas climáticas de Inverno e três zonas climáticas de verão (Figura 2.1). A numeração de cada zona atribui o grau de severidade do clima tanto no Verão como no Inverno. As zonas assinaladas com o número 1 apresentam condições climáticas menos severas enquanto que as zonas assinaladas com o número 3 indicam que a zona correspondente é afetada por condições climáticas mais rigorosas.

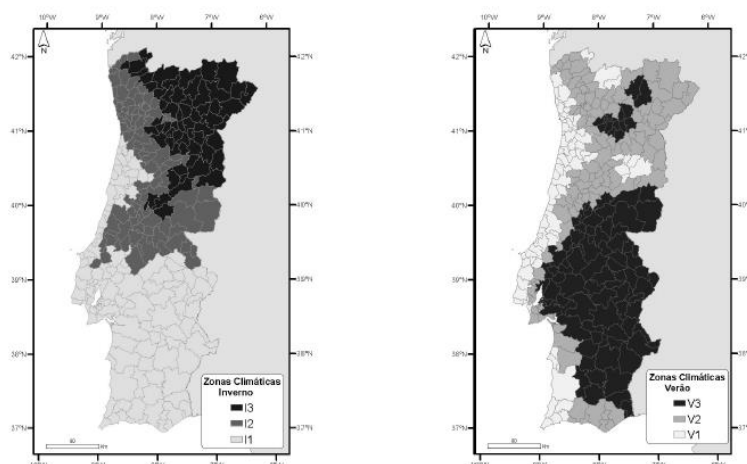


Figura 2.1. Distribuição dos concelhos por zona climática de acordo com o RCCTE (2006).

## **Orientação e captação solar**

O sol é uma excelente fonte de calor e de luz que pode ser aproveitada na construção de modo a melhorar o desempenho de um edifício. Para que este desempenho seja eficiente é importante que o edifício tenha a capacidade de se adaptar às diferentes condições climáticas, ou seja, captar a radiação solar nos períodos onde existe uma necessidade de aquecimento (Inverno), e também impedir esta mesma radiação de entrar nos espaços nas estações do ano mais quentes, onde esta não é benéfica para a climatização dos mesmos. É necessário manter um certo grau de conforto oferecido aos ocupantes e reduzir ao máximo os gastos em energia.

Apesar de Portugal apresentar um clima temperado, devido às alterações climáticas que têm vindo a sentir-se nos últimos anos, as estações são cada vez mais rigorosas, existindo uma diferença significativa entre as temperaturas de Verão e de Inverno. Deste modo, é importante ter em conta estas variações na construção de um edifício, pois a solução mais eficiente para a estação mais quente pode representar uma má solução quando aplicada à estação oposta.

### **2.1.2. Características da construção**

As condições de conforto interior de um edifício estão relacionadas também com o tipo de materiais usados na construção envolvente. Assim sendo, a inércia térmica<sup>2</sup> do material e a sua capacidade de isolamento são as principais características que se devem ter em consideração relativamente aos ganhos e perdas energéticas. Se a construção for constituída por bons isolamentos e inércia de paredes, pavimentos e coberturas as cargas térmicas dos espaços diminuem consideravelmente, permitindo assim a redução das necessidades de climatização uma vez que as variações de temperatura dentro da habitação vão ser menores.

---

<sup>2</sup> Inércia térmica: este conceito está diretamente ligado à capacidade de um edifício de contrariar as variações de temperatura no seu interior. Isto acontece devido à sua capacidade de acumular calor nos elementos construtivos. A velocidade de absorção e a quantidade de calor absorvida determina a inércia térmica de um edifício.

## **Vãos envidraçados**

O dimensionamento adequado das áreas envidraçadas em função da orientação solar e da disponibilidade de luz no interior dos edifícios é uma medida que contribui consideravelmente para o conforto térmico. Os vãos envidraçados são o elemento construtivo que permite a maior interação com a envolvente exterior, sendo portanto importante adequar as suas características ao respetivo clima. A entrada de radiação solar através dos envidraçados é favorável na estação fria, mas, por outro lado, pode também contribuir muito para as perdas de calor, se não forem adequados. É importante encontrar um equilíbrio para estes fatores de modo a obter uma solução eficiente. Estima-se que 25% a 30% das necessidades de aquecimento são devidas a perdas de calor com origem nos vãos envidraçados (Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética, 2008).

Por isso, para uma mesma caixilharia, a capacidade de isolamento de uma janela é dada pelo tipo de vidro que a constitui. Por exemplo, janelas com vidros duplos têm maior capacidade de isolamento do que janelas de vidros simples, pois o espaço de ar existente entre os vidros reduz substancialmente as perdas de calor.

## **Sombreamento**

Os dispositivos de sombreamento revelam-se de maior importância na estação de Verão. Devido às elevadas temperaturas que normalmente caracterizam esta estação e provocam o sobreaquecimento dos edifícios torna-se imprescindível evitar a situação a que normalmente chamamos de “efeito estufa”. A radiação solar incide no interior do edifício através dos vãos envidraçados, provocando um aumento de temperatura. No entanto, este calor gerado é impedido de sair pelos mesmos. O sombreamento é uma das soluções que pode ser adotada para evitar este tipo de situações. Este pode ser interior (cortinas, etc.) ou exterior (persianas) e impede a incidência da radiação solar no interior do espaço, funcionando como uma barreira.

## **Climatização**

A climatização constitui um fator de grande relevância na qualidade e no desempenho energético de um edifício, o qual é fortemente influenciado pelas soluções construtivas e pelas condições de manutenção e utilização dos aparelhos.

Em primeiro lugar é fundamental atuar preventivamente na redução das necessidades de climatização, principalmente na fase de conceção do edifício, através da otimização de soluções que passam pelo isolamento térmico, controlo da ventilação, utilização da inércia térmica adequada, aproveitamento dos ganhos térmicos no Inverno e proteção solar no Verão, entre outros.

O conforto térmico de uma casa é um fator determinante na qualidade do espaço. As temperaturas consideradas de conforto para o interior de uma habitação são de aproximadamente 23°C (ASHRAE, 1995). É no sentido de manter o edifício próximo desta temperatura que, de acordo com o clima da região onde está localizado, se irá escolher e dimensionar o sistema de climatização.

## **Iluminação**

Quer seja artificial ou natural, a luz é essencial para qualquer espaço em qualquer edifício. Fornecer quantidades necessárias de luz com qualidade é um requisito de projeto.

A iluminação de um edifício não deve ser feita ao acaso. É necessário ter em conta determinados aspetos para a sua correta utilização e regulação, tais como o impacto na climatização dos espaços (libertação de calor), iluminância adequada a cada espaço tipo, equipamentos mais eficientes entre outros. A saúde, o conforto e a produtividade de um indivíduo são afetados pela qualidade e quantidade de iluminação. É necessário fornecer ao espaço fontes de luz natural e artificial balanceadas e equilibradas. Demasiada luz natural pode causar desconforto aos ocupantes do espaço e o excesso de luz artificial é energeticamente inviável e produz calor que pode ser desejado ou não. Por exemplo, no Inverno a libertação de calor das lâmpadas é favorável pois estas ajudam no aquecimento do espaço e por consequência afetam positivamente a climatização da zona, no entanto em

períodos com temperaturas elevadas, como no Verão, este aquecimento revela-se contraproducente.

O principal impacto ambiental da iluminação artificial, na fase de utilização, é o consumo de energia e os gases com efeito de estufa associados. Para contrariar estes efeitos, é necessário adotar certas medidas (União Europeia, 2011):

- Garantir, na fase de conceção, que as novas instalações de iluminação têm baixa densidade de potência tentando respeitar as exigências das tarefas visuais;
- Usar lâmpadas de substituição com elevada eficiência;
- Utilizar dispositivos de controlo e comando de iluminação que possibilitem uma maior redução do consumo de energia;
- Recorrer a balastos reguláveis sempre que as circunstâncias o permitam;
- Na fase de instalação, assegurar que o sistema funciona como previsto, do ponto de vista da eficiência energética;
- Promover a utilização de lâmpadas com um teor de mercúrio mais baixo;
- Reutilizar ou recuperar os resíduos gerados pela instalação.

## 2.2. Geração automática de plantas

O projeto de edifícios eficientes não é linear. Todos os edifícios são únicos, e não existem protótipos de edifícios eficientes. O seu *design* deve atingir elevados níveis de eficiência com os mínimos custos possíveis. Existem inúmeros processos que levam ao conflito entre objetivos, como por exemplo a diminuição dos consumos de iluminação artificial através do aumento das janelas pode entrar em conflito com os consumos para a climatização e levar ao seu aumento, sendo o conjunto de soluções possíveis bastante vasto. Estes desafios tornaram cada vez mais vantajoso o uso de métodos computacionais de otimização.

Têm havido esforços continuados para melhorar os diferentes aspetos do processo de construção de um edifício. Estas resultaram em mudanças com um nível marginal de otimização. Uma das áreas que requer maior atenção é o planeamento das plantas de arquitetura pois é nesta fase que se podem começar a implementar medidas tendentes a



construir de forma mais eficiente e, quanto mais tarde se procura corrigir os erros mais difícil e mais caro será. O processo de geração de plantas é uma atividade fundamental em arquitetura em que o projetista tem de organizar o *layout* do edifício de forma a satisfazer e assegurar os requisitos específicos do programa funcional. Uma vez que, tipicamente, ocorre na fase inicial do projeto, esta atividade é particularmente importante porque irá afetar as fases subsequentes do planeamento do edifício.

O *design* de plantas de arquitetura frequentemente requer a resolução de conflitos de objetivos. Uma das alternativas para resolver este problema é a otimização de Pareto, que consiste na otimização de problemas com múltiplas funções objetivo simultaneamente. As soluções são chamadas de não dominadas, ou seja, nenhuma das funções objetivo pode ser melhorada sem que outra seja afetada negativamente.

Os algoritmos evolucionários são algoritmos de otimização que aplicam os princípios da teoria evolutiva e seleção natural de Charles Darwin, ou seja, a sobrevivência do mais apto, mantendo uma população de soluções das quais os menos aptos, ou seja, aqueles que oferecem menos aproximação às condições requeridas, vão sendo eliminados a cada geração (Evins, 2013). Dois dos operadores comuns usados neste tipo de algoritmos são a mutação (introdução de variabilidade genética nas soluções) e recombinação (variar parâmetros entre soluções). Alguns algoritmos evolucionários já foram usados na tentativa de resolução de problemas relativos aos métodos de geração automática de plantas. Estes podem ser divididos em seis grupos, de acordo com o tipo e o propósito de cada um (Rodrigues et al., 2013b, 2013c): atribuição de áreas, partição de áreas, alocação de espaços, construção hierárquica, exploração conceptual e adaptação do *design*.

Os algoritmos genéticos são uma classe particular dos algoritmos evolutivos. Num algoritmo deste tipo, a população de indivíduos (neste caso, possíveis soluções) para um determinado problema de otimização é desenvolvida a fim de obter as melhores soluções. Cada indivíduo tem um conjunto de propriedades que podem ser mudadas e alteradas no decorrer deste processo. A evolução para as soluções ótimas normalmente começa por uma população de indivíduos gerados aleatoriamente, em que cada população de cada iteração é chamada de “geração”. Em cada geração, as características de cada indivíduo são avaliadas e comparadas com as desejadas na função objetivo. Os indivíduos mais aptos, ou seja, com

as características mais próximas do pretendido, são selecionados da população atual, e cada genoma desses indivíduos é alterado e modificado (recombinado e mutado) de forma a gerar uma nova população. A nova população sofre o mesmo processo até ser atingido o número máximo de iterações, ou até serem encontradas as condições impostas pela função objetivo. No entanto, estudos realizados (Rodrigues et al., 2013b, 2013c) para o problema da geração automática de plantas referem que o algoritmo genético poderá não ser a solução mais adequada, uma vez que a recombinação do material genético poderá resultar numa baixa diversidade de plantas do ponto de vista topológico e geométrico.

A Figura 2.2 apresenta algumas das abordagens feitas por outros autores. Como podemos ver, algumas destas abordagens têm em conta apenas os aspetos geométricos, enquanto que outras acrescentam também aspetos topológicos e fatores como o aquecimento e arrefecimento relacionados com a eficiência energética. As variáveis de projeto podem ser os vãos envidraçados, portas, dimensões das paredes, etc. A abordagem seguida em Rodrigues et al. (2013a, 2013b, 2013c) é a mais completa comparativamente com as restantes, faltando ainda no entanto tratar alguns aspetos como a climatização dos espaços, e equipamentos presentes no edifício.

| Approach<br>Authors                 | Methods        | Perf.<br>oF | Design variables |    |    |    |   |     |    |    |    | Top. feat. |    |   |
|-------------------------------------|----------------|-------------|------------------|----|----|----|---|-----|----|----|----|------------|----|---|
|                                     |                |             | wD               | eD | eW | iD | S | fl. | eF | bB | aB | oO         | sA |   |
| [3,4] Jo and Gero, 1996             | GA             | g           |                  |    |    |    |   | •   | •  |    | •  |            |    |   |
| [42,43] Schnier and Gero, 1997      | GA             | g           |                  |    |    |    |   | •   |    |    |    |            |    |   |
| [32-34] Rosenman, 1997              | GA             | g           |                  |    |    |    |   | •   |    |    |    |            |    |   |
| [5,6] Gero and Kazakov, 1997        | GA             | g           |                  |    |    |    |   | •   | •  |    | •  |            |    |   |
| [11] Jagielski and Gero, 1997       | GP             | g           |                  |    |    |    |   | •   | •  |    | •  |            |    |   |
| [7] Bentley, 1998                   | GA             | g t         |                  |    |    |    |   | •   | •  |    | •  |            |    | • |
| [39-41] Garza and Maher, 1999       | GA             | g t         |                  | •  | •  |    | • | •   |    |    |    |            |    | • |
| [29-31] Elezkurtaj and Franck, 1999 | GA/ES          | g t         |                  |    |    |    | • | •   |    |    |    |            |    | • |
| [21,22] Michalek, 2001              | GA+SA/SQP      | g t h c l   |                  |    |    |    | • | •   |    |    | •  |            |    | • |
| [37] Jackson, 2002                  | GP+L-system    | g           |                  |    |    |    |   |     |    |    |    |            |    |   |
| [36] Virirakis, 2003                | GP             | g t         |                  | •  | •  |    | • | •   |    | •  |    |            |    | • |
| [23,24] Makris, 2005                | GA             | g t         |                  |    |    |    |   | •   |    |    |    |            |    | • |
| [25] Bausys and Pankrasovaite, 2005 | GA             | g h l       |                  |    |    |    | • | •   |    |    | •  |            |    | • |
| [35] Homayouni, 2007                | GA             | g t         |                  |    |    |    |   | •   |    |    |    |            |    | • |
| [18] Doulgerakis, 2007              | GP             | g t         |                  |    |    |    | • | •   | •  |    |    |            |    | • |
| [19] Banerjee et al., 2008          | GA             | g t         |                  |    |    |    |   | •   |    |    | ?  |            |    | • |
| [38] Serag et al., 2008             | GA             | g           |                  |    |    |    |   | •   |    |    |    |            |    | • |
| [8,9] Inoue and Takagi, 2008        | GA+VD          | g t l s     |                  |    |    |    |   | •   |    |    | •  |            |    | • |
| [27] Wong and Chan, 2009            | GA             | t           |                  |    |    |    |   |     |    |    |    |            |    | • |
| [12,13] Thakur et al., 2010         | GA/DA          | g t s       |                  |    |    |    | • | •   |    |    |    |            |    | • |
| [14] de la Barrera Poblote, 2010    | GA+VD          | g           |                  |    |    |    |   | •   |    |    | •  |            |    | • |
| [15-17] Knecht, 2010                | GA/ES+K-D tree | g t         |                  |    |    |    |   | •   |    |    | •  |            |    | • |
| [26] Flack, 2011                    | GA/GP          | g t         |                  |    |    |    | • | •   | •  |    | •  |            |    | • |
| Rodrigues, Gaspar and Gomes, 2012   | ES+SHC         | g t         | •                | •  | •  | •  | • | •   | •  |    | •  | •          | •  | • |

GA genetic algorithms; GP genetic programming; ES evolutionary strategy; SA simulated annealing; SQP sequential quadratic progr.; L-system Lindenmayer system; VD Voronoi diagram; DA Dijkstra's algorithm; SHC stochastic hill climbing;  
 ? undetermined; • implemented; g geometric; t topological; h heating; c cooling; l lighting; s walk distance;  
 oF objective function; wD walls dimensions; eD exterior doors; eW windows; iD interior doors; S space units; fl. floor levels;  
 eF equipment/furniture; bB building boundary; aB adjacent buildings; oO openings orientation; sA spaces adjacency.

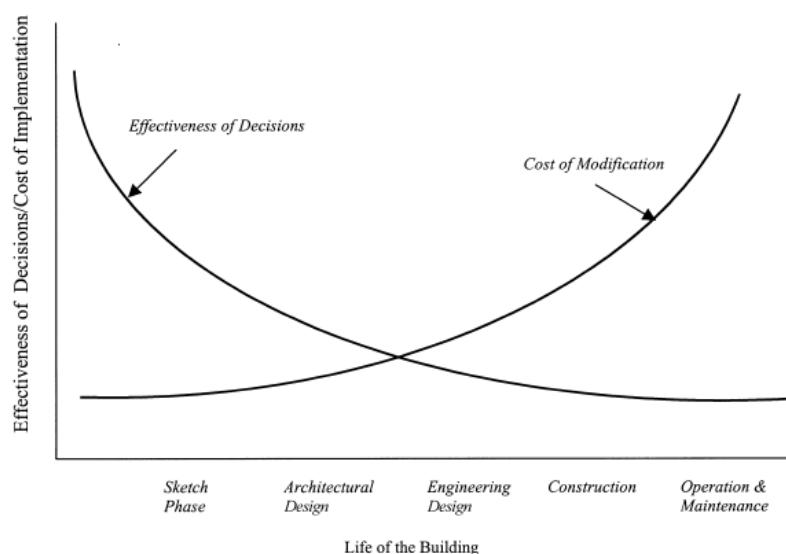
**Figura 2.2.** Comparação entre diferentes abordagens de acordo com os objetivos, variáveis de projeto e aspetos topológicos (Rodrigues et al., 2013b, 2013c).

## 2.3. Simulação energética em edifícios

Dada a situação económica global assim como as restrições das fontes de energia, o problema da eficiência energética assume um papel muito importante no projeto e operação de edifícios. Decisões cuidadosas na construção de um edifício podem melhorar significativamente a sua eficiência térmica e consequentemente reduzir os consumos de energia. Estratégias alternativas de construção, o cumprimento de normas e a otimização dos gastos podem ser avaliadas usando técnicas de análise energética. Estas técnicas vão desde métodos de análise manuais simplificados para obtenção da aproximação dos gastos energéticos até detalhadas simulações computadorizadas (Al-Homoud, 2001).

Um edifício corretamente projetado pode reduzir de forma significativa as necessidades de climatização e atingir o conforto desejado. Os requisitos destes sistemas dependem da sua função e dos horários de ocupação, assim como do clima que influencia a eficiência térmica do edifício.

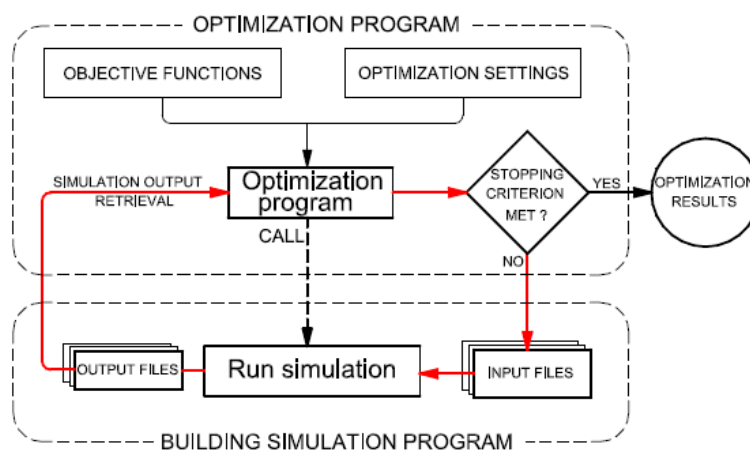
O impacto das decisões relativas à eficiência térmica de um edifício diminuem ao longo das diferentes fases do projeto, como ilustrado na Figura 2.3. Decisões construtivas tomadas durante as fases iniciais acarretam menores custos e têm um impacto mais significativo na performance do edifício.



**Figura 2.3.** Custo das decisões e impacto na eficiência da construção ao longo das várias fases de projeto (Al-Homoud, 2001).

Os avanços nas tecnologias computadorizadas, assim como a maior facilidade de uso, fazem dos programas de simulação de edifícios uma ferramenta frequentemente usada na avaliação da sua eficiência energética.

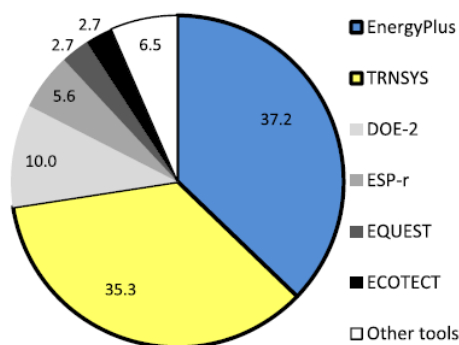
De reforçar que “otimização” não quer dizer necessariamente encontrar a solução ideal para um problema, uma vez que este pode ser restringido por vários parâmetros e ter objetivos em conflito. Num estudo convencional de otimização de edifícios, este processo é geralmente automatizado consistindo na conjugação de várias estratégias e algoritmos (Figura 2.4). Nos dias de hoje, a otimização através da simulação tem-se tornado numa medida que satisfaz muitos dos requisitos rigorosos de edifícios eficientes (edifícios de baixo consumo, *green buildings*, etc) (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).



**Figura 2.4.** Estratégia de otimização baseada na simulação da eficiência em edifícios (Nguyen et al., 2014).

Durante os últimos 50 anos, imensos programas de simulação energética em edifícios foram desenvolvidos, melhorados e estão ainda em uso (Nguyen et al., 2014). As ferramentas principais no campo da eficiência energética são os programas que simulam todo o edifício e que fornecem aos utilizadores indicadores chave como os gastos em energia, temperatura, humidade e custos. A Figura 2.5 apresenta alguns dos programas mais usados para a simulação energética em edifícios. O uso deste tipo de ferramentas de forma mais intensiva na fase de projeto pode melhorar significativamente o desempenho dos edifícios, uma vez que poderiam auxiliar na tomada das decisões mais importantes para a eficiência dos

mesmos. Como referido anteriormente, depois desta fase inicial a maioria das decisões que possam vir a ser tomadas não irão ter um impacto tão significativo no desempenho.



**Figura 2.5.** Estimativa de utilização dos programas mais usados em simulação energética de edifícios (Nguyen et al., 2014).

## 2.4. Simulação de iluminação

As necessidades de evitar os desperdícios de energia elétrica, seja mantendo as lâmpadas apagadas em ambientes desocupados ou em ambientes onde a luz natural satisfaça as necessidades durante alguns períodos ou durante todo o dia, tornou necessária a evolução e o aperfeiçoamento de alguns mecanismos de controlo. O controlo da iluminação artificial é feito através de equipamentos que ligam, desligam e controlam o nível de iluminância dos ambientes reduzindo assim o consumo energético em iluminação.

No entanto, em Portugal, não há legislação ou regulamentações que especifiquem de forma obrigatória ou quantifiquem diretamente requisitos para o uso da iluminação artificial e natural em edifícios, como a sua potência máxima, ou seja, não há qualquer incentivo de carácter mandatário por parte dos membros governamentais para que os projetistas adotem soluções que façam uso das potencialidades tanto da iluminação natural como artificial, sem esquecer as características térmicas que devem ser mantidas (Almeida & Martins, 2014).

Existem no entanto diretivas que podem ser usadas, como a Diretiva para edifícios 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010 (Parlamento Europeu, 2010), que especifica a aplicação dos requisitos mínimos para o desempenho térmico em edifícios relativo aos sistemas de

iluminação, instalados pela primeira vez ou renovados, e leva em conta o consumo energético da iluminação artificial nos cálculos da energia necessária para satisfazer as necessidades totais energéticas, de modo a avaliar a performance global do edifício.

A Resolução do Conselho de Ministros nº80/2008 aprova o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética – Portugal Eficiência 2015. Esta resolução apresenta um conjunto de medidas consideradas fundamentais pela Diretiva nº2006/32/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, relativas à eficiência na utilização final de energia e serviços energéticos. Em Portugal, foram estabelecidas metas de melhoria de eficiência energética de pelo menos 10% do consumo final de energia até final de 2015. O “Programa Renove a Casa” apresenta medidas relacionadas com a eficiência energética na iluminação, no entanto apenas dá ênfase ao problema da utilização de lâmpadas pouco eficientes (lâmpadas incandescentes), e somente incentiva a utilização de alternativas de elevado rendimento como lâmpadas fluorescentes compactas e LED. Apesar de esta medida representar uma melhoria nos consumos finais de energia, não deve ser implementada isoladamente, de modo a maximizar o seu impacto. Estas estratégias devem ser complementadas e combinadas com os benefícios provenientes do uso da iluminação natural e aplicadas logo na fase inicial do projeto.

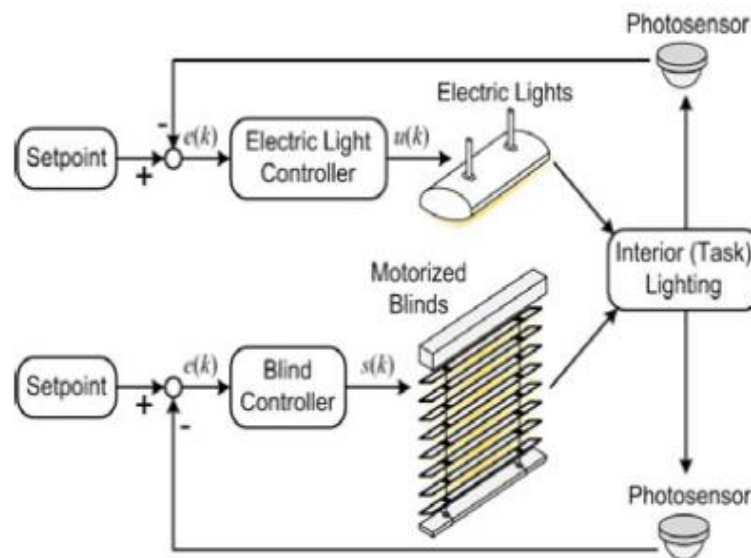
De acordo com o capítulo 27 do IESNA *Lighting Handbook* (IESNA, 1993), o controlo da iluminação em edifícios é implementado para oferecer aos ocupantes “estética e controlo da gestão de energia” sobre a iluminação artificial. Os modelos de simulação oferecem uma análise comparativa da eficiência energética de diferentes tipos de sistemas de controlo de iluminação.

O *Lighswitch-2002* apresenta um modelo para o controlo manual e automático da iluminação artificial e dos sombreamentos (Reinhart, 2004). Neste estudo é proposto um algoritmo de simulação dinâmico e estocástico que permite avaliar o impacto em termos energéticos dos sistemas de iluminação e sombreamento manuais e automáticos. Dinâmico, pois ao invés de procurar um dia “médio” num mês ou num ano, o perfil de ocupação, as iluminâncias interiores e o resultante estado da iluminação artificial e dos sombreamentos são considerados em intervalos de tempo de 5 minutos durante o ano. Estocástico, pois cada vez que o utilizador é confrontado com uma decisão de controlo, por exemplo, desligar ou

não a luz, um processo estocástico que determina o efeito dessa decisão é iniciado. O diagrama com o princípio de funcionamento deste algoritmo encontra-se no ANEXO A.

Este estudo (Reinhart, 2004) comprovou que, num exemplo de um edifício de serviços, um perfil de utilização bem estruturado pode traduzir-se em poupanças energéticas globais de até 20%, enquanto que para o caso do controlo da iluminação artificial estas poupanças podem chegar até aos 59%. Este estudo encontra no entanto algumas limitações significativas como a não consideração dos aspetos térmicos envolvidos neste tipo de controlo, e o facto de os sombreamentos, neste caso persianas, apresentarem apenas dois estados (completamente fechadas ou completamente abertas).

Mukherjee and Birru (Mukherjee, 2010) propuseram também um modelo otimizado em que foram utilizados circuitos abertos e fechados de controlo de iluminação artificial e dos sombreamentos e os seus benefícios avaliados. Neste modelo, a iluminação artificial e os sombreamentos são controlados de um modo integrado através da partilha de informação do nível de iluminação medido num ponto de referência e minimizando assim o consumo energético mantendo sempre o nível de iluminação requerido para o espaço (Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Circuito fechado de sombreamento combinado e circuito fechado de controlo de iluminação (Mukherjee, 2010).

Mais recentemente, alguns autores como Shen et al. (2014) propuseram métodos de análise de eficiência da iluminação que envolviam o controlo dinâmico dos sombreamentos, iluminação artificial e também dos sistemas HVAC e da inclinação das lâminas das persianas, com base no perfil de ocupação dos espaços. Este estudo veio mostrar que a integração da informação dos sistemas HVAC, e a partilha de informação entre todos os outros sistemas traz benefícios notórios na eficiência global de um edifício. A Figura 2.7 mostra um esquema que define o sistema de controlo integrado criado neste estudo.

O objetivo de uma estratégia de controlo é manter a iluminância requerida para cada tarefa próxima do *setpoint* desejado no espaço ocupado, enquanto que aproveita a luz natural e minimiza a utilização de iluminação artificial. O controlo da iluminação é integrado com a informação do controlo dos sombreamentos.

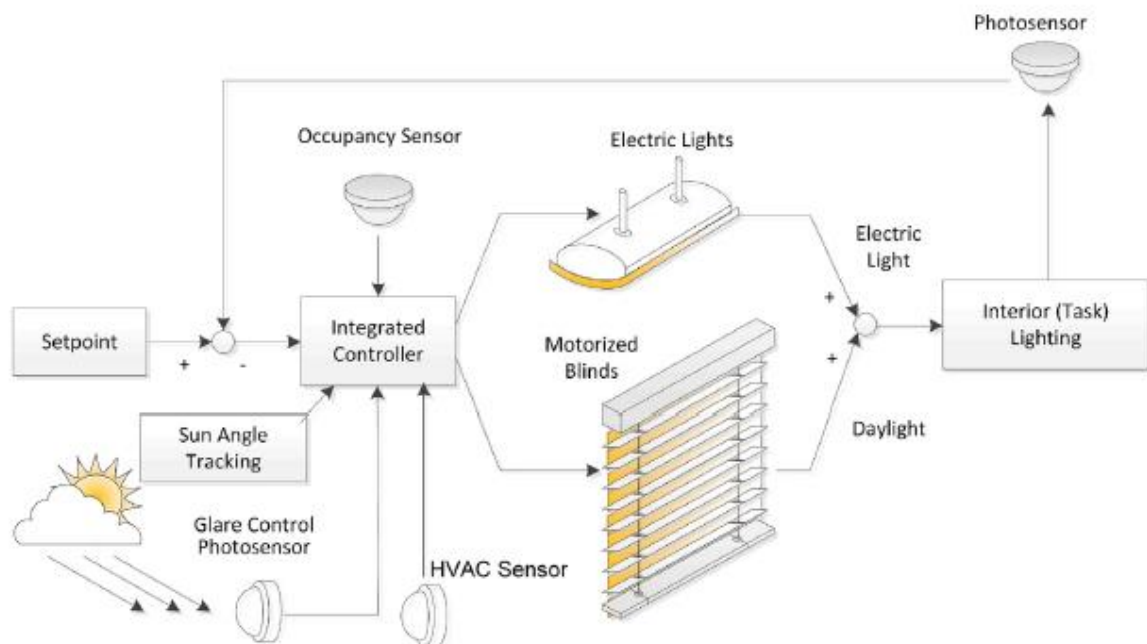


Figura 2.7. Controlo integrado da iluminação artificial e da iluminação natural (Shen et al., 2014).



## 3. METODOLOGIA

### 3.1. *Evolutionary Program for Space Allocation Problem (EPSAP)*

O EPSAP consiste numa técnica evolucionária híbrida, que combina uma estratégia evolucionária (EE) com uma técnica de pesquisa local *Stochastic Hill Climbing* (SHC), para gerar plantas de arquitetura de acordo com as preferências e restrições impostas pelo utilizador durante a fase inicial de projeto (Rodrigues et al., 2013c). O método EE é uma abordagem elitista que irá filtrar os indivíduos mais aptos e substituir os restantes por novos gerados aleatoriamente. Na EE, o operador mutação atuará, impondo variabilidade genética nos indivíduos, através de transformações geométricas sobre os elementos construtivos das plantas. Esta técnica híbrida concilia a capacidade de pesquisa global da EE com a capacidade de pesquisa local da SHC.

O EPSAP é constituído por duas fases (Figura 3.1). A primeira fase é o método de procura EE no qual a população inicial de indivíduos é gerada aleatoriamente. O algoritmo começa por iniciar esta primeira fase (pesquisa EE) gerando aleatoriamente a população. Depois inicia-se a segunda fase do processo (pesquisa SHC), na qual os indivíduos são avaliados e classificados de acordo com a função objetivo. A avaliação dos indivíduos foca-se nos seguintes eixos de avaliação: conectividade/adjacência, sobreposição de pisos, orientação das aberturas, dimensão dos pisos, compacidade da planta e sobredimensionamento dos espaços. Estes eixos são reunidos de acordo com os seus respetivos pesos na função objetivo que irá ser minimizada. Os diferentes pesos permitem que cada objetivo possa ser quantificado de acordo com a sua importância.

O próximo passo desta fase é determinar se a condição de finalização é satisfeita para a próxima fase. Se a média móvel do *fitness* do grupo de elite nos últimos cinco ciclos de pesquisa SHC for maior do que a média dos pesos dos avaliadores negativos, então a segunda

fase termina e volta à fase da pesquisa EE. Se isto não se verificar, a pesquisa SHC continua a aplicar um grupo de operadores SHC a cada indivíduo. Esses operadores realizam transformações geométricas estocásticas nas aberturas, nos conjuntos de espaços, e no indivíduo como um todo. Posteriormente, os indivíduos são avaliados e classificados e a condição de finalização é de novo avaliada.

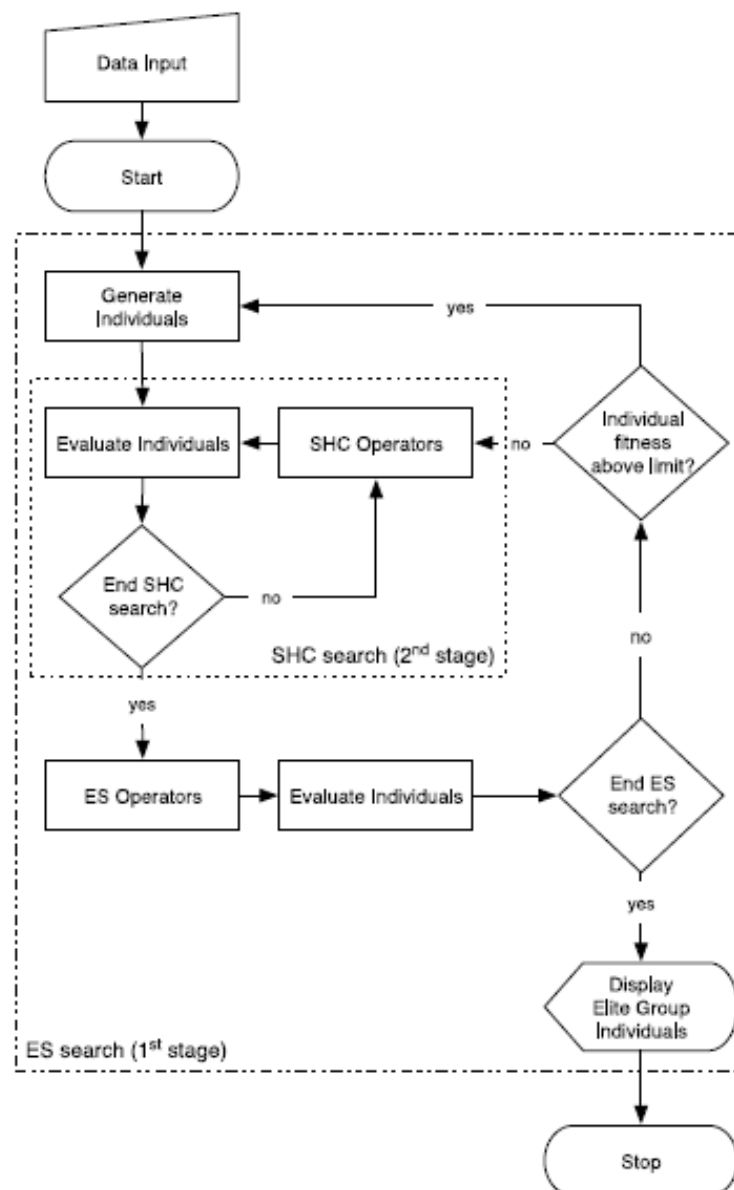


Figura 3.1. Fluxograma EPSAP (Rodrigues et al., 2013b, 2013c).

Quando a condição de finalização da pesquisa SHC é encontrada, a segunda fase termina e a primeira fase é retomada. Continuando a pesquisa EE, os indivíduos são sujeitos a uma série de operadores EE. Este conjunto de operadores de mutação são também transformações geométricas estocásticas, no entanto, ao invés de lidar com um elemento da planta de cada vez, o trabalho é realizado no indivíduo produzindo alinhamentos de paredes ou removendo espaços vazios no perímetro. Os operadores EE são fundamentais para a planta se formar como um todo e não como um conjunto de retângulos. Eles dão aos indivíduos a coerência de uma planta de arquitetura. Mais tarde, eles são novamente avaliados e classificados. Os indivíduos que tiverem um valor de *fitness* abaixo da média de *fitness* da população são selecionados para fazerem parte da próxima geração. Os restantes são descartados e repostos por novos indivíduos gerados aleatoriamente. Similarmente com a condição de finalização da segunda fase, se a diferença entre a média do *fitness* da geração corrente do grupo de elite e da geração anterior for maior do que a média dos pesos dos avaliadores negativos, o processo termina e os indivíduos do grupo de elite são mostrados.

### **3.2. Floor Plan Performance Optimization Program (FPOP)**

Após a geração automática de plantas, estas podem ser alvo de otimização. Com este fim foi criado o FPOP (Rodrigues, Gaspar, & Gomes, 2014a, 2014b).

O FPOP consiste na otimização sequencial de variáveis geométricas das plantas de arquitetura previamente geradas pelo EPSAP e na análise do seu comportamento térmico usando o programa de simulação dinâmico *EnergyPlus* (Figura 3.2). Este algoritmo importa as plantas geradas, estando a informação adicional necessária para realizar a análise térmica das plantas guardada numa base de dados (propriedades dos materiais, dados de ocupação, horários, sistemas construtivos para cada elemento, etc.). Esta base de dados tem a informação organizada de acordo com a função de cada espaço, ou seja, por exemplo, a sala de estar (espaço de lazer) tem associada informação como os seus horários de ocupação, sistemas de iluminação, ventilação, entre outros, que são exclusivos para cada espaço tipo/tarefa. Estando toda esta informação especificada numa base de dados torna-se rápida e

fácil a alteração de determinados parâmetros de acordo com as necessidades que o utilizador possa vir a ter.

Seguidamente, é realizada uma análise térmica de cada planta usando o programa de simulação *EnergyPlus* que está acoplado ao algoritmo. Com os resultados obtidos através desta simulação, o desempenho térmico de cada planta é calculado através da soma das diferenças entre a temperatura horária interior de cada espaço e os limites da temperatura de conforto. Quanto maior for a diferença entre a temperatura de conforto e a temperatura real do espaço menos eficiente vai ser o desempenho térmico da planta. A soma de todas estas diferenças é a penalização das plantas em termos de desempenho térmico.

Depois da avaliação inicial, e de acordo com a estratégia de otimização do utilizador, as plantas vão ser submetidas a transformações no seu *design* através de um processo iterativo. Este processo iterativo transforma as variáveis de diferentes objetos usando operadores específicos. Estes operadores apresentam-se na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Operadores do FPOP e respetivas transformações geométricas associadas.

| <b>OPERADOR</b>                    | <b>TRANSFORMAÇÃO</b>  |
|------------------------------------|---|
| <b>Orientação da planta</b>        | Este operador roda a planta até que a orientação que tem o menor número de penalizações seja encontrada.  |
| <b>Reflexão da planta</b>          | O segundo operador consiste na reflexão da planta usando o centro geométrico como referência para a linha de reflexão. É condicionado pela existência de requisitos topológicos e elementos adjacentes. |
| <b>Translação das aberturas</b>    | Este operador faz a translação das janelas ao longo do perímetro da parede disponível em cada espaço.   |
| <b>Dimensão das aberturas</b>      | Este operador redimensiona o comprimento e a largura das janelas. A altura de uma janela é apenas redimensionada se não for possível a modificação da sua largura.                                      |
| <b>Translação das paredes</b>      | Este operador faz a translação de uma parede (interior ou exterior), que seja comum a vários espaços. Isto permite ajustar o volume dos espaços a fim de minimizar as penalizações.                     |
| <b>Dimensão das palas</b>          | Estes operadores identificam quais os espaços que necessitam de equipamentos de sombreamento e dimensiona-os de modo a minimizar os efeitos de sobreaquecimento.  |
| <b>Dimensão das palas laterais</b> |   |

Depois de uma transformação ser realizada, as preferências topológicas e geométricas previamente definidas pelo utilizador no EPSAP vão ser testadas. Se a transformação resultar numa inconsistência, esta é reposta ao estado original e o mesmo operador vai produzir outras transformações até serem atingidos resultados satisfatórios dentro dos limites estabelecidos. Quando estes resultados forem obtidos, a planta é simulada e avaliada a fim de verificar se o seu desempenho térmico resulta numa solução otimizada. Se isto acontecer, o operador de transformação é finalmente aceite. Se a simulação produzir uma solução menos eficiente a transformação não é aceite. Quando não é possível a realização de mais transformações em todas as variáveis possíveis em todo o conjunto de plantas o algoritmo é terminado.

Os resultados de cada zona das plantas em análise serão então apresentados ao utilizador que pode então analisar o comportamento térmico das mesmas durante todo o ano.

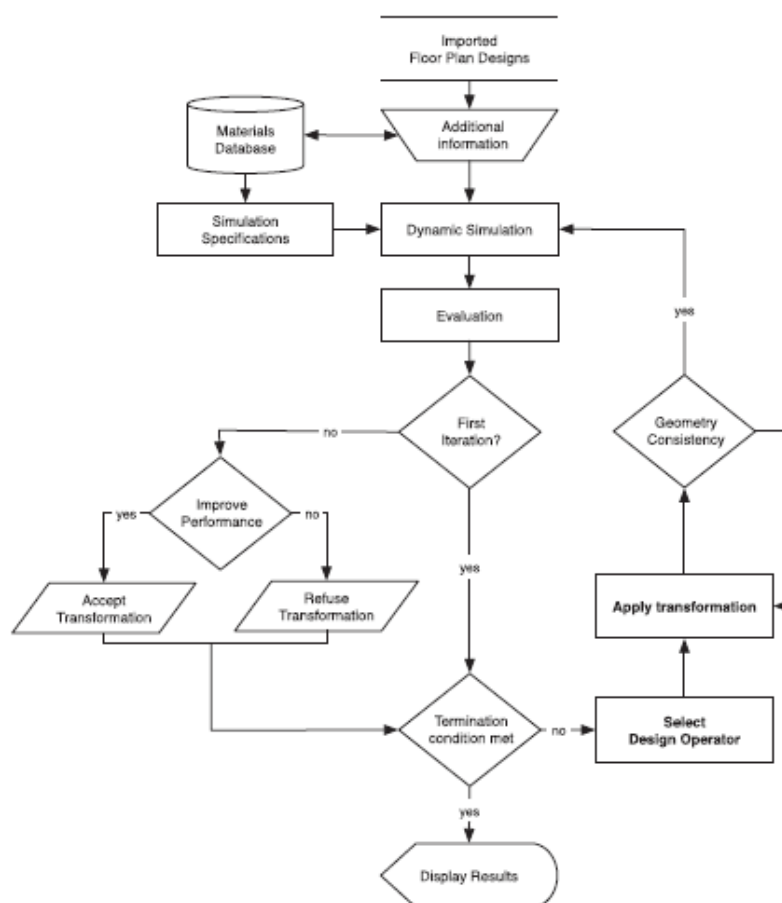


Figura 3.2. Fluxograma FPOP (Rodrigues et al., 2014a, 2014b).

### 3.3. Simulação da iluminação

Como já foi referido, o objetivo deste trabalho tem por base a incorporação na metodologia descrita previamente dos sistemas de iluminação artificial, que não eram até agora considerados no processo de otimização. Esta incorporação requer a adição e o respetivo controlo de elementos como os sombreamentos e o controlo automático da iluminação artificial. Para além disso, é ainda realizada a alteração da função objetivo.

Como os *outputs* do FPOP que irão ser simulados no programa *EnergyPlus* são ficheiros IDF, torna-se essencial analisar os objetos correspondentes e como estes são apresentados neste programa de simulação. Os objetos que terão de ser acrescentados a fim de obtermos uma correta análise da influência da iluminação artificial e natural na geração automática de plantas são: *Daylighting Control* e o *Shading Control*.

Uma breve análise aos valores de potência de iluminação por espaço tipo (União Europeia, 2011) permitiu verificar que os valores originais usados não seriam os mais corretos. A Tabela 3.2 mostra os valores máximos de potência de iluminação por área e por cada 100 lux ( $W/m^2/100\text{lux}$ ) que devem ser adotados de acordo com cada espaço tipo de acordo com os critérios CPE da UE relativos à iluminação interior.

**Tabela 3.2.** Potência utilizada por espaço tipo de acordo com os Critérios CPE da UE relativos à iluminação interior

| Zonas          | Máximo de potência de iluminação consumida |
|----------------|--|
| Circulação     | 3,2 $W/m^2/100\text{lux}$                  |
| Cozinha        | 5 $W/m^2/100\text{lux}$                    |
| Casa de Banho  | 5 $W/m^2/100\text{lux}$                    |
| Sala de Estar  | 7,5 $W/m^2/100\text{lux}$                  |
| Sala de Jantar | 7,5 $W/m^2/100\text{lux}$                  |
| Quarto         | 7,5 $W/m^2/100\text{lux}$                  |
| Garagem        | 2,2 $W/m^2/100\text{lux}$                  |
| Dispensa       | 3,2 $W/m^2/100\text{lux}$                  |

Os espaços do tipo “Cozinhas” e “Salas de estar pequenas” são os que devem permitir uma maior potência de iluminação enquanto que as “Áreas de circulação” exigem menores valores máximos, uma vez que as tarefas executadas neste último espaço pelos seus ocupantes são mínimas, apenas sendo necessário luminosidade suficiente para percorrer o espaço com segurança, enquanto que nos anteriores (cozinhas e salas) são executadas tarefas que exigem maior concentração, como utilizar utensílios de cozinha, ler, preparar comida, etc.

Os dispositivos de iluminação artificial têm um horário de funcionamento de acordo com o perfil ilustrado na Tabela 3.3. O perfil de ocupação dos espaços irá ser usado para os sistemas de climatização e está representado na Tabela 3.4.

**Tabela 3.3.** Horário de funcionamento dos dispositivos de iluminação.

| Espaço          | Hora |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                 | 1    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Entrada         |      |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  |
| Cozinha         |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    |    |    |
| Sala de Estar   |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |
| Casa de Banho   |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  |    |    |    |    |    | 1  |    | 1  |    |    |    | 1  |
| Corredor        |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  |
| Quarto          |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    | 1  |
| Quarto          |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |    | 1  |
| Quarto          |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |    | 1  |
| Casa de Banho P |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  |    |    |    | 1  |
| Escadas         |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  |

**Tabela 3.4.** Perfil de ocupação dos espaços.

| Espaço          | Hora |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                 | 1    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Entrada         |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |    |
| Cozinha         |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |
| Sala de Estar   |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  |    | 1  |
| Casa de Banho   |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  |    |    |    |    |    | 1  |    | 1  |    |    |    | 1  |
| Corredor        |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  |
| Quarto          | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Quarto          | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Quarto          | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Casa de Banho P |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  |    |    |    |    |    | 1  |    | 1  |    |    |    | 1  |
| Escadas         |      |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    | 1  |

### 3.3.1. Controlo da iluminação

Neste objeto, os níveis de iluminância da iluminação natural são calculados e usados posteriormente na determinação da quantidade luz que é necessária ser fornecida pelo sistema de iluminação artificial para satisfazer os requisitos de iluminação de cada zona. O

nível de iluminância de uma zona devido à iluminação natural depende de vários fatores como as condições atmosféricas, posição do sol, localização, reflexão de superfícies interiores, dispositivos de sombreamento, etc. A redução da energia elétrica da iluminação artificial pode ser significativa se tivermos em conta a contribuição da luz natural para a iluminação do espaço. Esta redução depende do nível de iluminância no interior do espaço e do seu *setpoint*, ou seja, do nível de iluminância pretendido para cada espaço, e também do tipo de controlo que é aplicado.

Foi utilizado apenas um ponto de referência por zona. Este ponto irá ser usado para o cálculo da iluminância, ou seja, as medições serão feitas naquele ponto. O controlo da iluminação artificial vai responder de acordo com os valores de iluminância nos pontos de referência, que correspondem ao centro geométrico de cada zona (Figura 3.3).

A altura do ponto de referência (coordenada z) usada é geralmente a altura do plano de trabalho, ou seja, 0,8m. É assumido que toda a área de determinada zona é controlada pelo seu único ponto de referência, ou seja, a iluminação artificial em toda a zona é controlada exclusivamente pelo seu respetivo ponto de referência.



Figura 3.3. Exemplo de aplicação de pontos de referência.

O nível de iluminação requerido por zona varia consoante a tarefa que se vai executar na mesma sendo necessário por isso a consulta de normas ou critérios a fim de identificar os



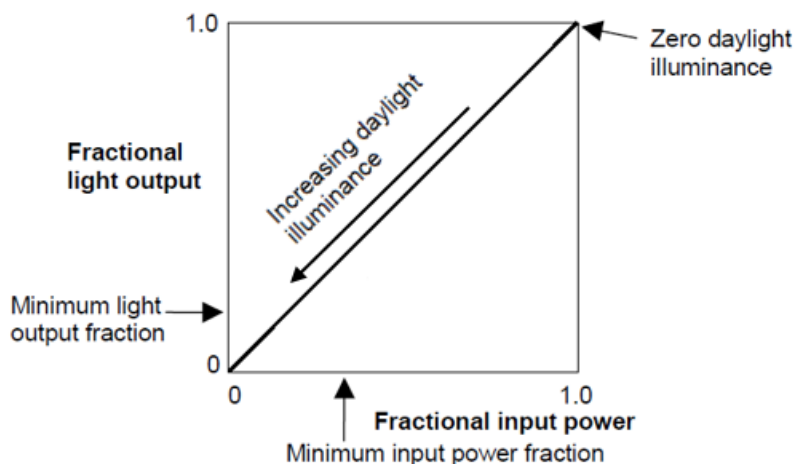
níveis de iluminância necessários para cada espaço tipo. Na tabela abaixo (Tabela 3.5) encontram-se as iluminâncias típicas usadas (IESNA The Lighting Handbook, 2000).

**Tabela 3.5.** Níveis de Iluminância por espaço tipo (IESNA The Lighting Handbook, 2000).

| <b>Espaço</b>       | <b>Iluminância</b> | <b>Altura de medição</b> |
|---------------------|--------------------|--------------------------|
| Quarto              | 300 lux            | 0,8 m                    |
| Cozinha             | 500 lux            | 0,8 m                    |
| Áreas de Circulação | 50 lux             | 0,8 m                    |
| Casa de Banho       | 300 lux            | 0,8 m                    |
| Sala de estar       | 400 lux            | 0,8 m                    |

O controlo de iluminação adotado é do tipo contínuo/off, isto quer dizer que os dispositivos de iluminação artificial diminuem o seu consumo elétrico continua e linearmente à medida que a iluminância proveniente da iluminação natural aumenta. Quando o ponto de regulação mínimo é atingido as luzes desligam completamente. Salienta-se que para a potência elétrica máxima temos o nível de luz artificial máximo e vice-versa. Logo, quanto menor for a quantidade de luz artificial necessária para satisfazer as iluminâncias definidas para cada espaço, menor também vão ser os seus consumos elétricos (Figura 3.4).

O controlo do brilho é também um fator importante a ter em consideração. Neste caso, como temos sombreamentos nos vãos envidraçados, estes vão fazer a regulação necessária para que os limites de brilho nos espaços estejam dentro dos valores impostos. Os pontos de referência para as medições são os mesmos da iluminância. Caso os valores do brilho medidos estejam acima do valor imposto, os sombreamentos vão atuar de maneira a repor o conforto visual. Se uma zona tiver mais do que um vão envidraçado com controlo de brilho, os dispositivos de sombreamento vão ser ativados um a um pela ordem em que estão organizados até que o nível de brilho no ponto de referência seja mais baixo que o valor máximo de brilho permitido. Os valores típicos para os valores máximos de brilho estão descritos na Tabela 3.6.



**Figura 3.4.** Representação da regulação contínua da iluminação artificial (InputOutput Reference – EnergyPlus Manual (2013)).

Depois de feita a análise do objeto com o *EnergyPlus* este foi acrescentado ao algoritmo FPOP. Toda a informação necessária para este objeto foi adicionada numa tabela na base de dados (exceto os pontos de referência que são calculados para cada espaço). Assim como para o objeto “*Lights*”, as características para o controlo da iluminação, “*Daylighting Control*”, encontram-se associadas a cada espaço tipo. É necessário ter no entanto em consideração que zonas sem janelas não devem ter associadas a si o controlo de iluminação, uma vez que não existe luz natural para que se possa fazer a regulação da iluminação artificial. Nestas zonas as luzes irão estar ligadas ou desligadas (On/Off) de acordo com o horário de funcionamento definido anteriormente (Tabela 3.3).

**Tabela 3.6.** Valores recomendados para o índice de desconforto máximo de brilho (*InputOutput Reference – EnergyPlus Manual*).

| Recommended Values of Maximum Allowable Discomfort Glare Index |  |
|--|--|
| Activity or zone type  | Maximum Allowable Discomfort Glare Index |
| Art Galleries  | 16                                       |
| Factories  |  |
| Rough work   | 28                                       |
| Engine assembly  | 26                                       |
| Fine assembly  | 24                                       |
| Instrument assembly  | 22                                       |
| Hospital wards   | 18                                       |
| Laboratories   | 22                                       |
| Museums  | 20                                       |
| Offices  | 22                                       |
| School classrooms  | 20                                       |

### 3.3.2. Controlo dos sombreamentos

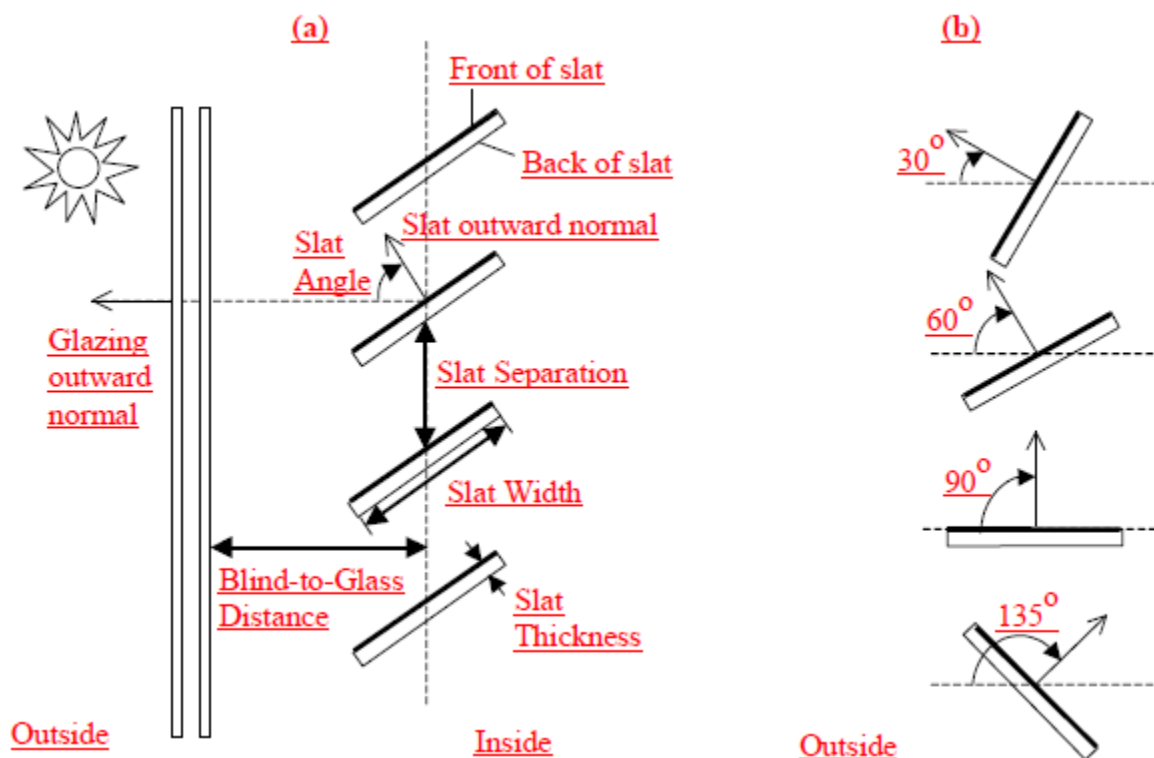
Os sombreamentos vão também assumir um papel importante no controlo da iluminação e no conforto dos ocupantes do espaço. Com estes dispositivos é possível controlar o brilho e o excesso de iluminação proveniente do ambiente exterior. Outro aspeto que é influenciado pelos sombreamentos são as cargas térmicas. Estas podem ser diminuídas se for feito um controlo adequado dos sombreamentos. É recomendado que nas estações mais quentes, estes estejam programados para fecharem durante o dia a fim de impedirem a entrada de calor para os espaços e conseqüentemente impedir o aumento da carga térmica. Por outro lado, nas estações mais frias, estes devem estar completamente abertos durante o dia no caso da existência de radiação solar suficiente. Com a adoção destas técnicas podem ser diminuídas as necessidades de climatização dos espaços. Todavia, quando se considera também a iluminação é necessário analisar as duas vertentes, iluminação e climatização em conjunto.

Antes de mais, é necessário definir que tipo de estratégia se vai adotar para o controlo dos sombreamentos. Segundo o manual *InputOutput* do *EnergyPlus* existem métodos que se devem ter em conta para este tipo de aplicação. Estes afirmam que a metodologia seguida deve ser a seguinte:

1. Definir a construção do tipo janela sem o sombreamento;
2. Definir o material do sombreamento (*WindowMaterial:Blind*);
3. Definir uma nova construção desta vez para o sombreamento, que inclui o seu material, definido no ponto anterior;
4. Definir o controlo do sombreamento em “*WindowProperty:ShadingControl*”, e associar aos vãos envidraçados.

O primeiro passo deste processo, a definição do envidraçado sem o sistema de sombreamento, já está implementado e é automaticamente gerado pelo FPOP no momento de exportação do ficheiro IDF, pelo que poderemos avançar para a fase seguinte, a definição do material para o sombreamento.

Na Figura 3.5 estão apresentadas algumas das características que são tidas em consideração aquando da escolha dos atributos das lâminas para os sombreamentos. Neste caso escolheu-se um sombreamento do tipo persiana.



**Figura 3.5.** Características das lâminas para sistemas do tipo persiana (*InputOutput Reference – EnergyPlus Manual*).

As lâminas irão ter uma orientação do tipo horizontal, assumindo-se as características dos restantes campos (separação entre lâminas, distância ao envidraçado, ângulo, etc.) de acordo com os valores recomendados pelo *InputOutput Reference* do *EnergyPlus* (ANEXO B).

O terceiro passo será então a definição de uma nova construção que inclua o material para a persiana selecionado no passo anterior. Na Figura 3.6 apresenta-se um exemplo para uma melhor compreensão da necessidade de definir esta construção.

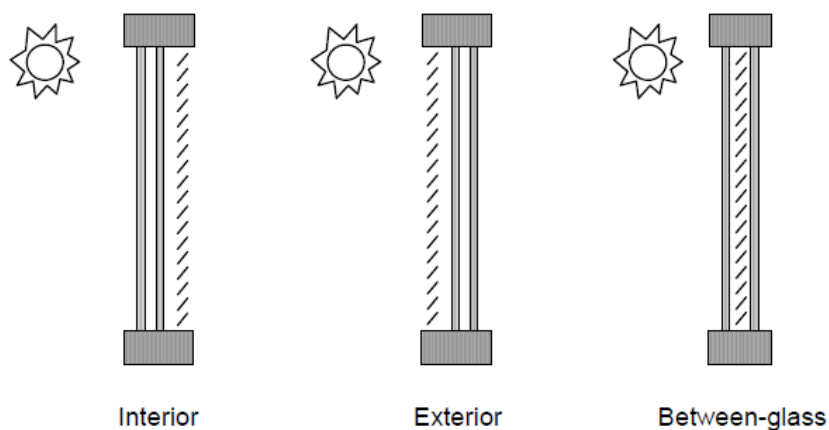
```
Construction,  
EXTWINDOW_SHADING, !- Name  
Blind_0.015m, !- Outside Layer  
DoubleGlazedWindow2.6_0.06m; !- Layer 2
```

**Figura 3.6.** Exemplo de construção para o elemento persiana.

Assim sendo, existirá agora uma nova construção de nome EXTWINDOW\_SHADING que irá associar o elemento persiana (Blind\_0.015m) aos elementos cujo material seja do tipo DoubleGlazedWindow2.6\_0.06m, ou seja, aos vãos envidraçados, pois são os únicos que incorporam este tipo de material.

Por último, o quarto passo será a definição do tipo de controlo que irá ser feito sobre os sombreamentos. Este controlo é implementado para que se possa reduzir a quantidade de radiação solar que entra para o interior do edifício assim como o brilho. Como já foi mencionado, pode ajudar também na redução das cargas térmicas tanto no Verão como no Inverno. O objeto *WindowProperty:ShadingControl* é usado tanto para janelas como portas de vidro, e é onde são introduzidas as especificações tanto da localização como do tipo de controlo que é efetuado.

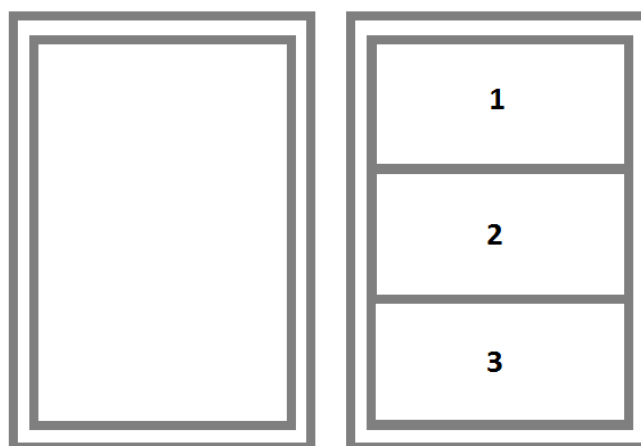
Como ilustrado na Figura 3.7, as persianas podem ser incorporadas do lado interior da janela, do lado exterior, ou entre os vãos envidraçados. Neste caso optou-se pela incorporação no lado exterior, uma vez que é geralmente a disposição mais usada e mais eficiente.



**Figura 3.7.** Posições possíveis para os sombreamentos do tipo persiana (*InputOutput Reference – EnergyPlus Manual*).

No *EnergyPlus*, um sistema de sombreamento apenas tem dois estados: ativo e não ativo. Isto quer dizer que, para este caso, a persiana ou estará completamente fechada ou completamente aberta. Para se simular o ativar do sombreamento de forma parcial terá de ser feita a divisão de cada vão envidraçado em que este vai atuar.

Assim, como exemplificado na Figura 3.8, uma janela pode ser dividida em três janelas de tamanho inferior. Para este tipo de configuração as persianas iriam ter 4 níveis de atuação. Numa situação real, se, por exemplo, a temperatura interior de determinada zona excedesse o *setpoint* definido no controlo dos sombreamentos, as persianas iriam fechar uma a uma, até ser atingido um valor inferior ao mesmo. A atuação faz-se de forma sequencial entre as 3 persianas abertas (correspondente à situação da persiana totalmente aberta quando se tem só uma janela) até as 3 persianas fechadas (correspondendo à persiana fechada com uma só janela) passando por ter 1 persiana fechada (1/3 das persianas fechadas no cenário só com uma janela) e 2 persianas fechadas (2/3 da persiana fechada no cenário de apenas uma janela).



**Figura 3.8.** Solução para atuação parcial das persianas.

Existem no entanto, vários tipos de controlo que podem ser usados. Para uma primeira abordagem, foram selecionados os quatro tipos que mostravam ser os mais adequados para o caso em estudo. Foi de seguida feita uma simulação de desempenho energético para duas plantas, tendo em conta os diferentes controlos escolhidos, e registados

os valores da soma da energia consumida pela iluminação, aquecimento e arrefecimento. A Tabela 3.7 mostra os resultados obtidos e a Figura 3.9 as plantas usadas para os cálculos do desempenho. As características dos controlos escolhidos para comparação são enumeradas de seguida:

1. ***OnIfHighSolarOnWindow*** – a persiana é ativada se a soma da radiação solar difusa com a radiação solar direta incidente na janela for superior ao *setpoint #1* ( $W/m^2$ ), ou se o brilho for superior ao estabelecido.
2. ***OnNightIfLowOutdoorTempAndOnDayIfCooling*** – a persiana é ativada durante a noite se a temperatura exterior for inferior ao *setpoint #1* ( $^{\circ}C$ ). A persiana é ativada durante o dia se a carga térmica para o arrefecimento for superior a zero, ou se o brilho for superior ao estabelecido.
3. ***OnIfHighOutdoorAirTempAndHighSolarOnWindow*** – a persiana é ativada se a temperatura exterior for superior ao *setpoint #1* ( $^{\circ}C$ ), ou se a radiação solar incidente for superior ao *setpoint #2* ( $W/m^2$ ), ou se o brilho for superior ao estabelecido.
4. ***OnIfHighZoneAirTempAndHighSolarOnWindow*** – a persiana é ativada se a temperatura da zona for maior do que o *setpoint #1* ( $^{\circ}C$ ), ou se a radiação solar incidente for maior do que o *setpoint #2* ( $W/m^2$ ), ou se o brilho for superior ao estabelecido.

Em todos os casos o controlo do brilho está ativado, tendo sido adotado o índice máximo recomendado pelo *EnergyPlus InputOutput Reference*. Este controlo é importante para que se mantenham níveis aceitáveis de conforto visual dentro dos espaços onde existam janelas.

Conclui-se que o controlo que permite uma maior poupança nos consumos energéticos é o *OnIfHighZoneAirTempAndHighSolarOnWindow*, e irá ser então o usado neste estudo (Tabela 3.7). O controlo dos sistemas de sombreamento irá estar sempre ativo tanto durante o dia, como durante a noite, independentemente do perfil de ocupação dos espaços. O objeto final, *WindowProperty:ShadingControl*, encontra-se no ANEXO B.



**Figura 3.9.** Plantas geradas pelo EPSAP e utilizadas para os cálculos do desempenho energético global (Planta (a) e Planta (b)).

**Tabela 3.7.** Consumo energético global resultante de cada tipo de controlo de sombreamentos.

| Tipo de controlo   | Setpoint 1           | Setpoint 2                 | Energia consumida<br>Planta (a) | Energia consumida<br>Planta (b) |
|--|----------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <i>OnIfHighSolarOnWindow</i>                               | 300 W/m <sup>2</sup> | -                          | 45,83 kWh                       | 45,80 kWh                       |
| <i>OnNightIfLowOutdoorTemp<br/>AndOnDayIfCooling</i>       | 20 °C                | -                          | 44,53 kWh                       | 44,91 kWh                       |
| <i>OnIfHighOutdoorAirTemp<br/>AndHighSolarOnWindow</i>     | 25 °C                | 300 W/m <sup>2</sup>       | 44,41 kWh                       | 43,50 kWh                       |
| <u><i>OnIfHighZoneAirTempAnd<br/>HighSolarOnWindow</i></u> | <u>25 °C</u>         | <u>300 W/m<sup>2</sup></u> | <u>44,04 kWh</u>                | <u>42,11 kWh</u>                |

### 3.3.3. Controlo dos sistemas de climatização

Os últimos objetos a serem acrescentados na simulação serão o *HVACTemplate:Thermostat* e o *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*.



- ***HVACTemplate:Thermostat***

Este objeto permite definir os *setpoints* que irão posteriormente ser usados para o controlo dos sistemas de aquecimento e arrefecimento. Estes irão tomar os valores máximo e mínimo, respetivamente, de 20°C e 25°. Isto irá levar a que, quando o sistema *Ideal Loads* estiver ativo, sempre que a temperatura no interior de determinada zona exceda os 25°C o sistema de arrefecimento irá ser ativado assim como, pelo contrário, se a temperatura for inferior a 20°C o sistema de aquecimento entrará em funcionamento. Isto vai levar a que a temperatura no interior dos espaços se mantenha sempre dentro da banda destas temperaturas de conforto.

- ***HVACTemplate:IdealLoadsAirSystem***

O *Ideal Loads* providencia um sistema ideal para fornecer ar condicionado a todas as zonas de um edifício a fim de manter a sua temperatura interior dentro da banda de conforto definida no objeto Termostato. Neste objeto é apenas considerada a energia útil, ou seja, não se leva em conta os aspetos relacionados com os aparelhos de climatização, como o seu rendimento ou perdas de energia. Assim como em alguns dos objetos anteriores, foram adotados valores recomendados pelo *InputOutput Reference* do *EnergyPlus* (ANEXO C). O sistema de construção, que influencia também a climatização dos espaços pois diferentes materiais podem levar a maior ou menor isolamento térmico, encontra-se no ANEXO D.

### **3.4. FPOP – Incorporação dos objetos e função objetivo**

#### **3.4.1. Objetos**

Depois da análise feita no subcapítulo Simulação da iluminação, podemos avançar para a programação dos objetos no algoritmo FPOP.

No caso do *Daylighting Control*, a incorporação foi feita com base no esquema da Figura 3.10. Como já foi mencionado previamente, os valores que são suscetíveis a mudanças foram inseridos numa base de dados para que, caso seja necessário efetuar alguma alteração, seja fácil e rápido sem ser necessário recorrer a alterações no próprio código JAVA. Revelou-se extremamente importante ter em consideração que apenas zonas com

vãos envidraçados devem ter controlo de iluminação. A atribuição deste tipo de controlo em espaços sem janelas origina posteriormente erros na simulação pois, como foi dito anteriormente, espaços sem janelas não possuem iluminação natural.



Figura 3.10. Metodologia seguida para a integração do objeto *Daylighting Control* no FPOP.

Para o caso dos objetos relativos ao controlo dos sombreamentos (*Shading Control*), o processo adotado foi semelhante ao anterior, sendo apenas a criação do objeto no “*Export IDF File*” ligeiramente diferente uma vez que não será necessário o cálculo de pontos de referência, mas a quantidade de objetos a acrescentar é maior. Na Figura 3.11 apresentam-se os principais passos para a criação destes novos objetos.

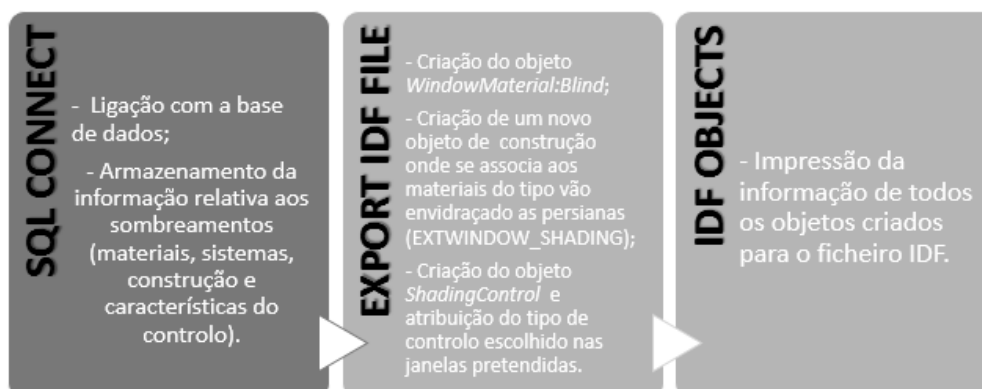


Figura 3.11. Metodologia seguida para a integração dos objetos *WindowMaterial:Blind* e *ShadingControl* no FPOP.

Finalmente, os objetos para a climatização, *HVACTemplate:Thermostat* e *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*, serão também criados de forma semelhante aos objetos anteriores, ou seja, seguindo a mesma ideia: exportação dos valores através do SQL CONNECT, criação dos dois objetos no EXPORT IDF FILE, e impressão dos mesmos no ficheiro IDF.

### 3.4.2. Função Objetivo

A função objetivo originalmente utilizada no EPSAP baseava-se na otimização do desempenho térmico das plantas geradas pelo EPSAP. Neste trabalho, a nova função objetivo vai focar-se na otimização do desempenho energético considerando a energia utilizada para o aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial e tendo em conta os objetos anteriormente adicionados: o controlo da iluminação artificial, dos sombreamentos, e da climatização dos espaços. Esta nova função está apresentada na Equação (3.1).

$$\min(f(I)) = \sum_{z=1}^{N_z} \sum_{h=1}^{N_h} (E_L + E_{AR} + E_{AQ}) \quad (3.1)$$

De acordo com a função objetivo, quanto maior o número de penalizações, ou seja, quanto maior a soma dos consumos energéticos da iluminação e da climatização de todas as zonas ao longo do ano, pior vai ser o seu desempenho energético. Na equação,  $E_L$ ,  $E_{AR}$  e  $E_{AQ}$  representam, respetivamente, a energia útil para a iluminação artificial, a energia útil para o arrefecimento e a energia útil para o aquecimento, e  $N_z$  e  $N_h$  representam o número de zonas na planta e o número de horas num ano (8760h). O estudo é feito de acordo com a energia útil pois a contabilização da energia final implica a análise dos rendimentos e perdas dos equipamentos.

Depois da análise inicial, a planta vai ser sujeita a variações nos operadores geométricos através de um processo iterativo. Depois da realização de uma transformação, as preferências e requisitos topológicos e geométricos estabelecidos no EPSAP para a

geração das plantas são então testados para a sua consistência geométrica. Se a transformação levar a uma violação destes requisitos, o mesmo operador vai ignorar a iteração atual e irá realizar uma nova iteração com novas transformações até que seja alcançada uma mudança dentro dos requisitos ou o limite de iterações seja atingido. Esta verificação é extremamente importante pois impede que, por exemplo, as janelas sejam demasiado pequenas e não cumpram os requisitos/legislação referente ao tamanho mínimo dos vãos envidraçados em edifícios residenciais. Depois da verificação das inconsistências, o *output* é então analisado. Esta análise vai procurar no ficheiro IDF as colunas correspondentes aos objetos “Iluminação”, “Aquecimento” e “Arrefecimento” e guardar esta informação. Posteriormente procede-se ao cálculo do desempenho energético global da planta que vai consistir na soma dos objetos anteriormente mencionados. Se se verificar uma otimização do desempenho, a mudança é implementada na iteração seguinte, se não irá ser ignorada e uma nova iteração irá ser iniciada. Este processo irá decorrer até obtermos a condição final desejada, ou seja, o melhor desempenho energético possível.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO

Neste capítulo, as capacidades do novo algoritmo do FPOP são expostas e analisadas através do estudo de diversas plantas de arquitetura do tipo “edifício residencial com 3 quartos (um andar)” (Figura 4.1). Este caso de estudo é realizado para Coimbra, Portugal – 140m altitude, latitude de 40,20N e longitude de 8,42W. O ficheiro climático é retirado do *website* do Departamento de Energia dos USA. O EPSAP irá gerar três plantas que irão ser posteriormente otimizadas para os seguintes casos:

- Sem controlo de iluminação/sem controlo de sombreamento (ND NS);
- Com controlo de iluminação/sem controlo de sombreamento (WD NS);
- Com controlo de iluminação/com controlo de sombreamento (*setpoint* 200 W/m<sup>2</sup> e de 400 W/m<sup>2</sup>) (WD WS) – tendo em conta que a radiação solar média incidente num edifício é de 350 W/m<sup>2</sup> escolheram-se estes valores.

O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto do controlo integrado dos sistemas de iluminação artificial e dos sombreamentos nos vãos envidraçados na eficiência energética das plantas geradas durante o período de simulação de um ano.



**Figura 4.1.** Plantas utilizadas para o presente estudo de caso (Planta (a), Planta (b) e Planta (c)).

Foram escolhidas plantas com características geométricas bastante diferentes de modo a que os resultados pudessem de certa forma confirmar que abrangem uma grande gama de variedades de plantas de arquitetura. Recorrendo à função objetivo (Equação (3.1)) as plantas anteriores foram simuladas e otimizadas de modo a que os seus consumos energéticos fossem os menores possíveis.

Os resultados finais para os consumos das três plantas nas diferentes situações anteriormente mencionadas estão apresentados na Tabela 4.1. Através desta primeira análise podemos concluir que se optarmos pelo controlo da iluminação e dos sombreamentos em simultâneo iremos ter uma maior poupança energética. Relativamente aos *setpoints*, este estudo mostra que a melhor alternativa será um *setpoint* não muito alto, neste caso um *setpoint* de 200 W/m<sup>2</sup>.

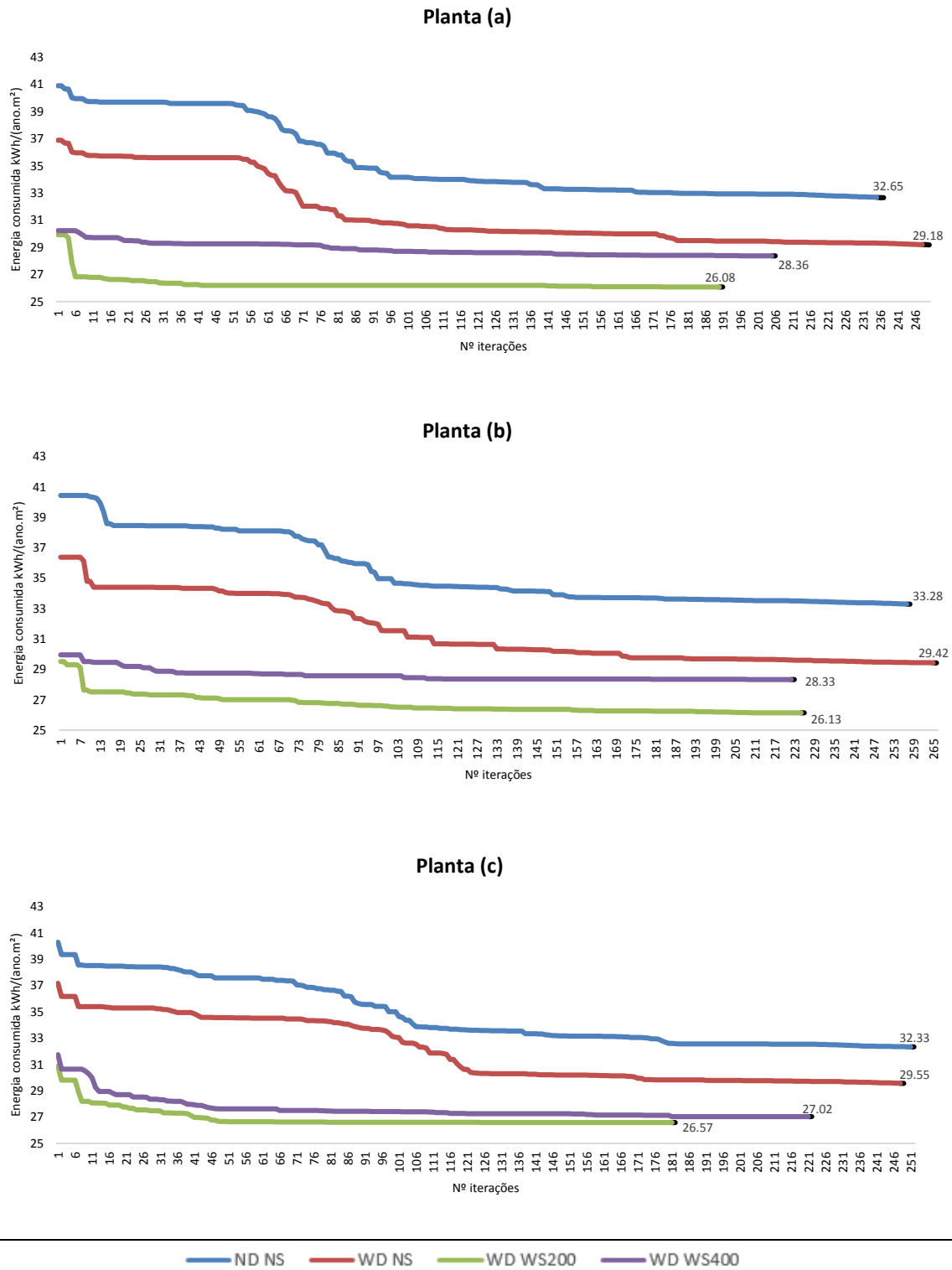
**Tabela 4.1.** Consumos energéticos finais totais por planta.

|                   | <b>ND NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS200</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS400</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) |
|-------------------|--|--|---|---|
| <b>Planta (a)</b> | 32,65  | 29,18  | 26,08   | 28,36   |
| <b>Planta (b)</b> | 33,28  | 29,42  | 26,13   | 28,33   |
| <b>Planta (c)</b> | 32,33  | 29,55  | 26,57   | 27,02   |

ND – No Dimming      WD – With Dimming      WS200 – With Shading (setpoint 200 W/m<sup>2</sup>)  
 NS – No Shading      WS400 – With Shading (setpoint 400 W/m<sup>2</sup>)

Podemos observar que todas as plantas têm um comportamento semelhante relativamente ao controlo da iluminação artificial e ao controlo dos sombreamentos. A Figura 4.2, que ilustra com mais pormenor a evolução de cada planta ao longo do processo de otimização, vem comprovar que, efetivamente, o sistema de controlo mais eficiente é o da iluminação artificial associado ao controlo dos sombreamentos com o *setpoint* de 200 W/m<sup>2</sup> (o mais baixo neste estudo).

Era de prever que os sistemas mais eficientes iriam ser aqueles que incluíam ambos os controlos, uma vez que o *dimming* iria reduzir a energia elétrica relativa à iluminação artificial através do seu ajuste aos níveis de iluminância requeridos pelos espaços, e contribuir para a redução das cargas térmicas assim como os sombreamentos.



**Figura 4.2.** Evolução das necessidades energéticas totais para os diferentes tipos de controlo em cada planta.

Verifica-se também a tendência de convergência do processo de otimização. Em todos os casos os valores totais dos consumos tendem a diminuir no entanto, como será mostrado mais à frente, os consumos individuais de cada indicador não apresentam necessariamente comportamentos iguais.

As Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 mostram com mais pormenor os comportamentos das Plantas (a), (b) e (c) relativamente a cada um dos seus indicadores (arrefecimento, aquecimento e iluminação) e a influência que tiveram as transformações que foram realizadas nos operadores geométricos (Tabela 4.2) em cada iteração.

**Tabela 4.2.** Operadores geométricos de otimização energética.

| <b>Operador</b> | <b>Função</b>          |
|-----------------|------------------------|
| OpTJ            | Translação das janelas |
| OpOP            | Orientação da planta   |
| OpDJ            | Dimensão das janelas   |
| OpTP            | Translação das paredes |
| OpRP            | Reflexão da planta     |
| OpPH            | Palas horizontais      |
| OpPL            | Palas laterais         |

Em geral, pode dizer-se que o processo de otimização tem sobretudo impacto no aquecimento e no arrefecimento, sendo as alterações na iluminação pouco significativas. No entanto, as diferenças de consumos finais com controlo de iluminação e sem controlo de iluminação são notórias. Através da aplicação deste tipo de controlo conseguiu-se uma redução nos consumos específicos de aproximadamente 4 kWh/m<sup>2</sup> ano, tanto na planta (a) como nas plantas (b) e (c). A incorporação do *dimming* permite que a iluminação artificial se adapte às condições de iluminação no interior de cada espaço e diminua ou aumente consoante as necessidades.

A aplicação do controlo sobre as persianas traduz-se numa redução pouco significativa na iluminação artificial (Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6), sendo que o aumento do *setpoint* nas plantas em estudo tem um efeito também reduzido. Teoricamente,



o aumento do *setpoint* deveria levar a uma diminuição dos consumos de iluminação, e não a um aumento, ainda que pequeno como se verifica nos resultados obtidos, uma vez que os sombreamentos iriam estar menos vezes e menos tempo ativos, ou seja, a iluminação natural iria ter mais influência na iluminação dos espaços. Estes valores podem ter origem no facto de que as características geométricas das plantas variarem consoante os diferentes tipos de controlo, principalmente as salas e orientação (Figura 4.6). Para se poder perceber melhor este comportamento, foi realizada uma pequena análise suplementar para a planta (a) para se perceber em qual dos casos as persianas estão mais tempo fechadas durante o ano (Tabela 4.3).

**Tabela 4.3.** Soma das frações de tempo (horas por ano) em que as persianas estão ativas - Planta (a).

|             | Cozinha | Sala<br>Janela 1 | Sala<br>Janela 2 | Quarto | Quarto | Quarto | Casa de<br>Banho P. | Total<br>(horas) |
|-------------|---------|------------------|------------------|--------|--------|--------|---------------------|------------------|
| WD<br>WS200 | 1072    | 374              | 928,75           | 863,5  | 599,25 | 782,75 | 117,75              | 4738             |
| WD<br>WS400 | 11,25   | 2994,25          | 0                | 323,5  | 2078,5 | 502    | 28,75               | 5938,25          |

Conforme se pode constatar, de facto o controlo com o maior *setpoint* é no entanto aquele que tem a persiana acionada durante uma maior fração de tempo durante o ano, justificando assim os valores obtidos para a iluminação artificial (Tabela 4.4). Olhando para a Figura 4.6 percebe-se a solução obtida para a planta (a) WD WS200 tem uma orientação em que apenas a janela da Cozinha está orientada a Norte sendo então a que irá fechar mais vezes. Por outro lado, para o caso de WD WS400, a Janela 1 da Sala assim como do Quarto, que possui a mesma orientação, irão ser as mais prejudicadas pela radiação solar. Isto leva a que, mesmo que haja um aumento do *setpoint*, se existir uma alteração da orientação das plantas os sistemas de sombreamento (persianas) vão ser ativados mais vezes pois os vãos envidraçados vão ter uma maior incidência de radiação solar. Como consequência do fecho das persianas, vai entrar menos luz natural no espaço levando a que a iluminância no interior das zonas fica abaixo do desejado, aumentando assim as necessidades de iluminação artificial. A pequena diferença existente entre os resultados obtidos para plantas sem

sistemas de controlo de persianas e com esses mesmos sistemas, pode dever-se ao aparente balanceamento que parece existir entre as persianas, palas e orientação. Ou seja, uma mudança da planta para uma orientação onde a radiação solar incidente seja maior (mais iluminação natural) do que na orientação anterior, vai aumentar as palas e também a ativação das persianas, que por sua vez irão reduzir a iluminação natural dentro dos espaços, fazendo com que no fundo as necessidades de iluminação artificial não variem muito de uma situação para a outra.

**Tabela 4.4.** Consumos energéticos finais por indicador - Planta (a).

|                      | <b>ND NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS200</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS400</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) |
|----------------------|--|--|---|---|
| <b>Arrefecimento</b> | 6,98   | 7,01   | 8,70  | 6,06  |
| <b>Aquecimento</b>   | 10,54  | 10,67  | 5,94  | 10,85   |
| <b>Iluminação</b>    | 15,13  | 11,49  | 11,44   | 11,45   |
| <b>Total</b>         | 32,65  | 29,18  | 26,08   | 28,36   |

ND – No Dimming      WD – With Dimming      WS200 – With Shading (setpoint 200 W/m<sup>2</sup>)  
NS – No Shading      WS400 – With Shading (setpoint 400 W/m<sup>2</sup>)

**Tabela 4.5.** Consumos energéticos finais por indicador - Planta (b).

|                      | <b>ND NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS200</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS400</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) |
|----------------------|--|--|---|---|
| <b>Arrefecimento</b> | 7,28   | 6,83   | 7,41  | 7,67  |
| <b>Aquecimento</b>   | 10,58  | 10,99  | 7,18  | 8,81  |
| <b>Iluminação</b>    | 15,43  | 11,60  | 11,55   | 11,84   |
| <b>Total</b>         | 33,28  | 29,42  | 26,13   | 28,33   |

ND – No Dimming      WD – With Dimming      WS200 – With Shading (setpoint 200 W/m<sup>2</sup>)  
NS – No Shading      WS400 – With Shading (setpoint 400 W/m<sup>2</sup>)

**Tabela 4.6.** Consumos energéticos finais por indicador - Planta (c).

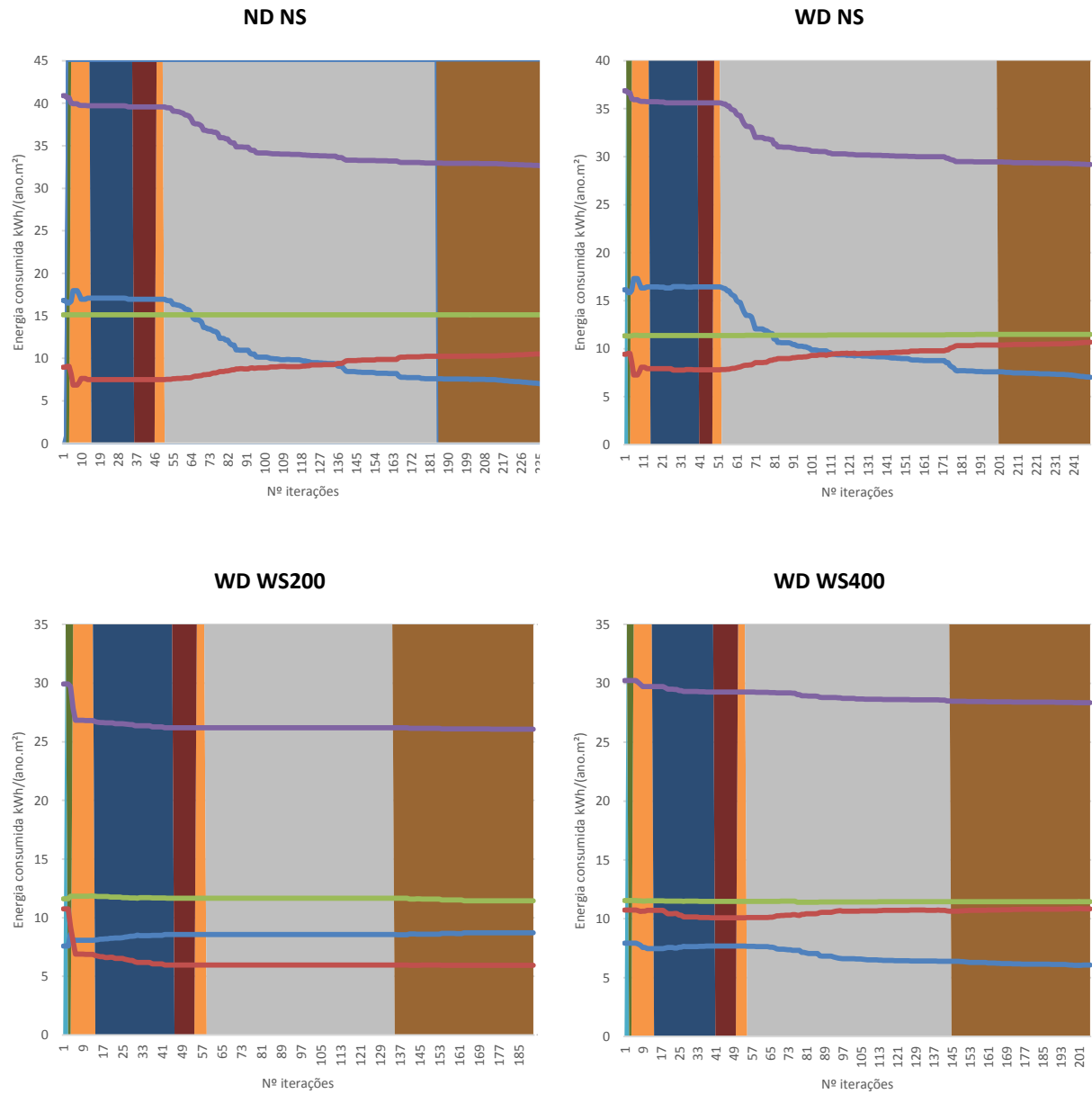
|                      | <b>ND NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD NS</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS200</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) | <b>WD WS400</b><br>(kWh/(ano. m <sup>2</sup> )) |
|----------------------|--|--|---|---|
| <b>Arrefecimento</b> | 6,55   | 6,85   | 7,23  | 7,46  |
| <b>Aquecimento</b>   | 10,66  | 10,89  | 7,72  | 7,81  |
| <b>Iluminação</b>    | 15,12  | 11,81  | 11,62   | 11,75   |
| <b>Total</b>         | 32,33  | 29,55  | 26,57   | 27,02   |

ND – No Dimming      WD – With Dimming      WS200 – With Shading (setpoint 200 W/m<sup>2</sup>)  
NS – No Shading      WS400 – With Shading (setpoint 400 W/m<sup>2</sup>)

A análise dos gráficos das Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 permite concluir que, ao contrário da iluminação artificial, os consumos energéticos para o aquecimento e arrefecimento são muito influenciados pelas mudanças nos operadores geométricos.

A inexistência de sombreamentos (persianas) parece originar maiores impactos nos consumos específicos devido a alterações nos operadores OpOP (orientação) e OpPH (palas horizontais) nas plantas (a) e (b), enquanto que na planta (c) são os operadores OpTJ (translação das janelas), OpOP (orientação), OpDJ (dimensão das janelas) e OpPH (palas horizontais) que apresentam maiores influências (Figura 4.7). Os restantes operadores efetuam apenas pequenos ajustes geométricos. Sem as persianas para bloquear a radiação solar incidente nos vãos envidraçados, as plantas têm tendência a sofrer maiores alterações geométricas a fim de minimizar os consumos energéticos. Ao longo das iterações, os comportamentos dos consumos de arrefecimento e aquecimento têm tendência a ser contrários, ou seja, se a energia consumida no arrefecimento diminui a energia para o aquecimento aumenta e vice-versa. O facto de a orientação (OpOP) do edifício mudar pode levar a que uma maior área dos vãos envidraçados esteja exposta a uma maior quantidade de radiação solar originando um aumento das necessidades de arrefecimento dos espaços em questão mas também a uma diminuição das necessidades de aquecimento. As palas horizontais (OpPH) têm também um efeito semelhante. O seu aumento leva a que a janela esteja protegida pela sombra gerada impedindo assim a incidência de radiação solar. Como consequência deste tipo de alteração geométrica as necessidades de arrefecimento diminuem enquanto que as de aquecimento aumentam.

**Planta (a)**

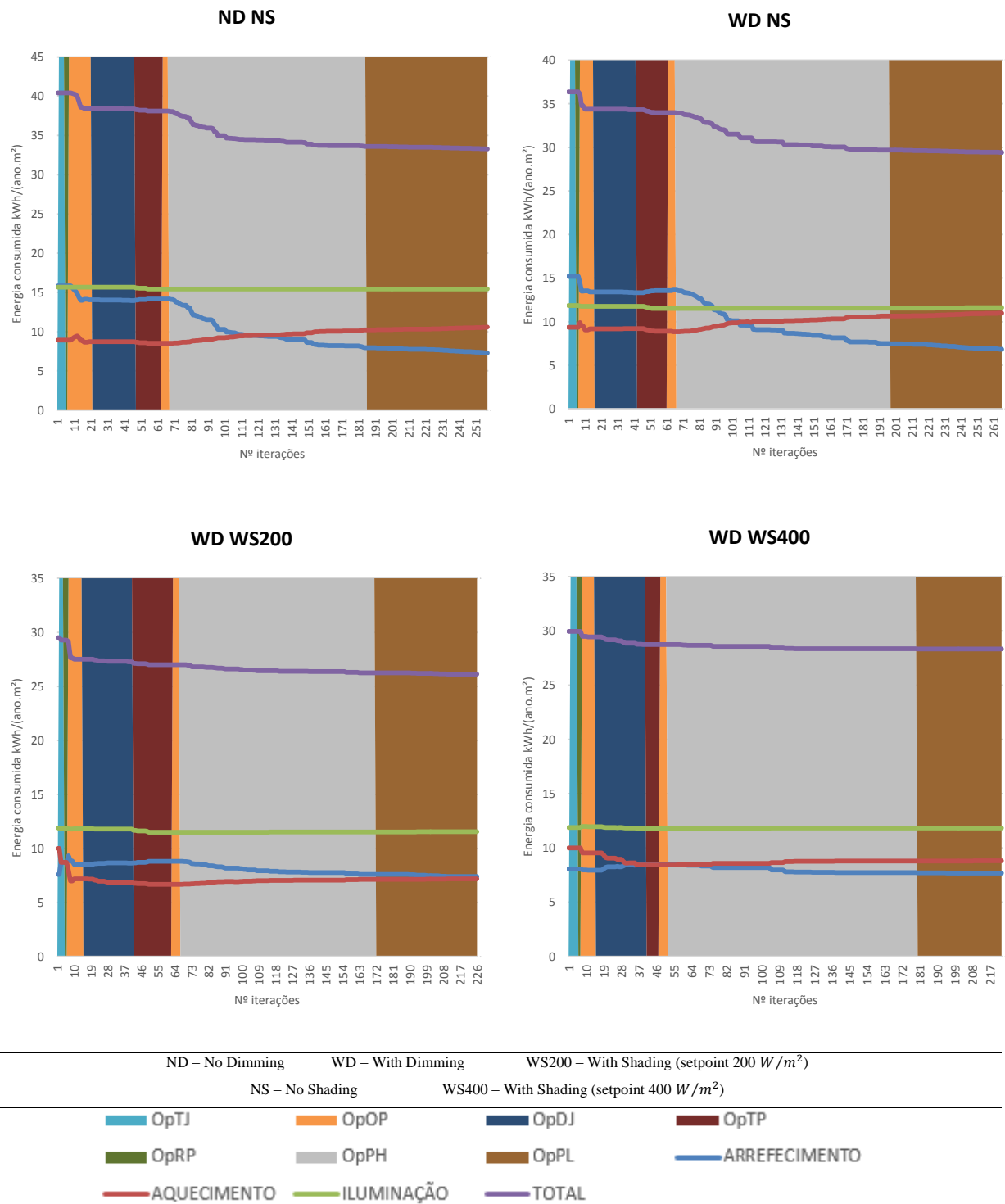


ND – No Dimming      WD – With Dimming      WS200 – With Shading (setpoint 200 W/m<sup>2</sup>)  
 NS – No Shading      WS400 – With Shading (setpoint 400 W/m<sup>2</sup>)

OpTJ      OpOP      OpDJ      OpTP  
 OpRP      OpPH      OpPL      ARREFECIMENTO  
 AQUECIMENTO      ILUMINAÇÃO      TOTAL

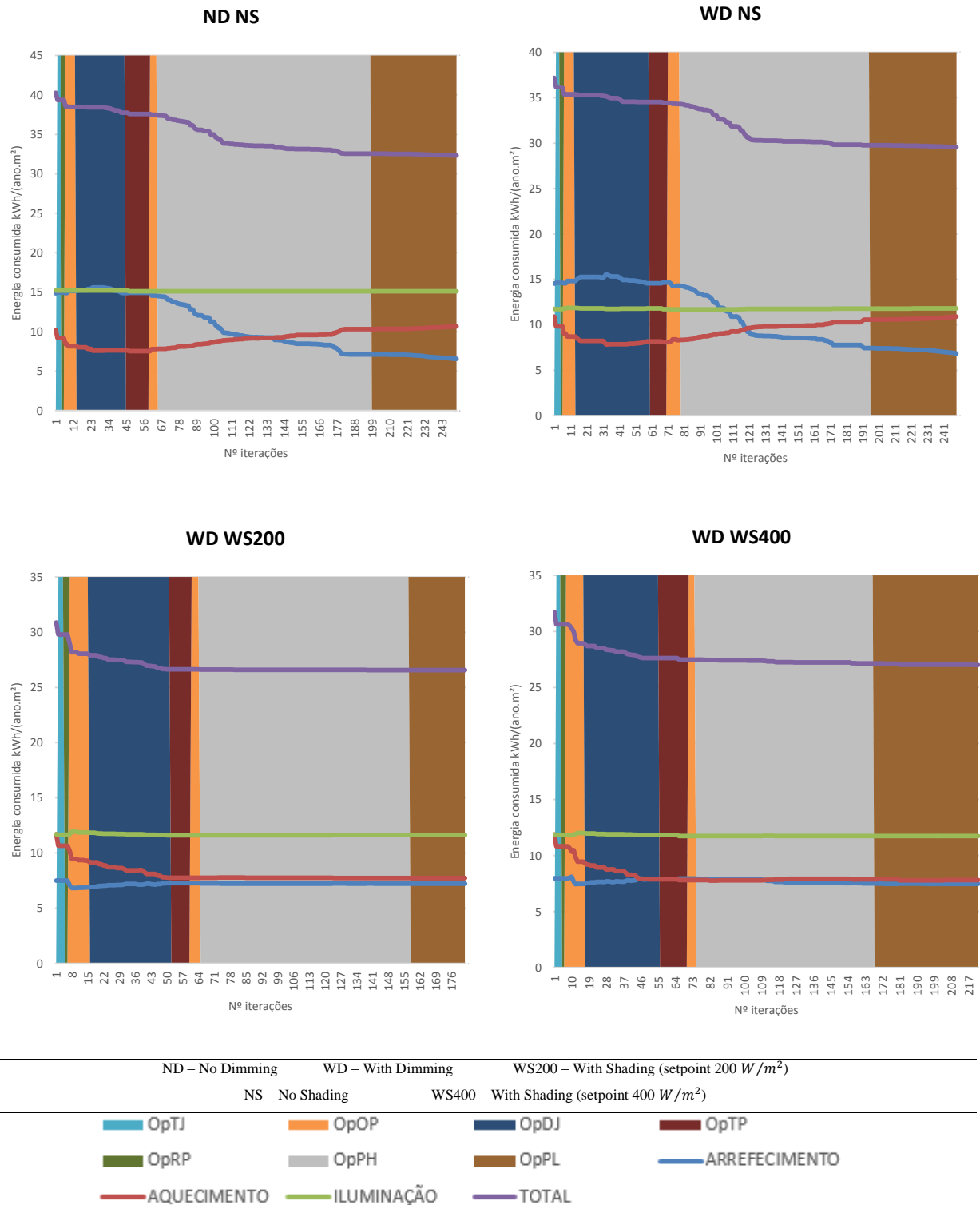
**Figura 4.3.** Evolução dos consumos por indicador para os diferentes tipos de controlo – Planta (a).

**Planta (b)**



**Figura 4.4.** Evolução dos consumos por indicador para os diferentes tipos de controlo – Planta (b).

**Planta (c)**



**Figura 4.5.** Evolução dos consumos por indicador para os diferentes tipos de controlo – Planta (c).

A introdução de sombreamentos e do respetivo controlo leva a uma diferença notória na atuação dos operadores (Figura 4.6 e Figura 4.7). O impacto dos operadores OpPH e OpPL (palas) é claramente reduzido nesta nova situação. Isto acontece porque, de uma maneira geral, as persianas irão levar a cabo a tarefa que era anteriormente executada pelas palas, tarefa esta que consistia em bloquear a radiação solar nos vãos envidraçados. Por outro lado, os operadores OpTJ, OpOP e OpDJ passam a ter uma maior importância na diminuição dos consumos. Tendo em conta que a influência das palas irá ser muito reduzida nos casos em que os sombreamentos estão ativos, é natural que o programa funcional tente variar os restantes operadores geométricos a fim de conseguir a otimização energética desejada. No entanto, as mudanças nestes últimos operadores não irão ser tão significativas levando a que as variações nos consumos para a climatização deixem de ser tão acentuados.

No ANEXO E encontram-se os gráficos referentes aos consumos da planta (a) por zona, relativamente ao arrefecimento e aquecimento. No geral, podemos dizer que as zonas responsáveis pelas maiores variações nos consumos energéticos e consequentemente aquelas que assumem uma importância acrescida na otimização são a Cozinha, os Quartos e principalmente a Sala. As restantes divisões não irão ter tanto impacto pois possuem janelas com tamanhos pequenos, sendo que em algumas zonas as janelas são inexistentes. A Sala é a divisão que apresenta uma maior área de vãos envidraçados pelo que durante o processo de otimização (sem sombreamentos ativos) irá sofrer alterações muito significativas na sua geometria, principalmente nas palas. Isto irá levar a que os consumos de arrefecimento diminuam drasticamente, mas por outro lado, as necessidades de aquecimento irão aumentar devido ao efeito de barreira de radiação solar que as palas irão produzir. O mesmo acontece para a Cozinha e Quartos que também possuem uma área considerável de vãos envidraçados, como se pode ver também pela Figura 4.6. A orientação exerceu também uma grande influência nos consumos destas mesmas divisões e também das restantes. Apesar de a mudança de orientação ter aumentado os consumos de arrefecimento da maioria das divisões (a frente do edifício ficou orientada a Oeste), os consumos de aquecimento diminuíram, fazendo assim com que houvesse uma espécie de equilíbrio na climatização dos espaços.

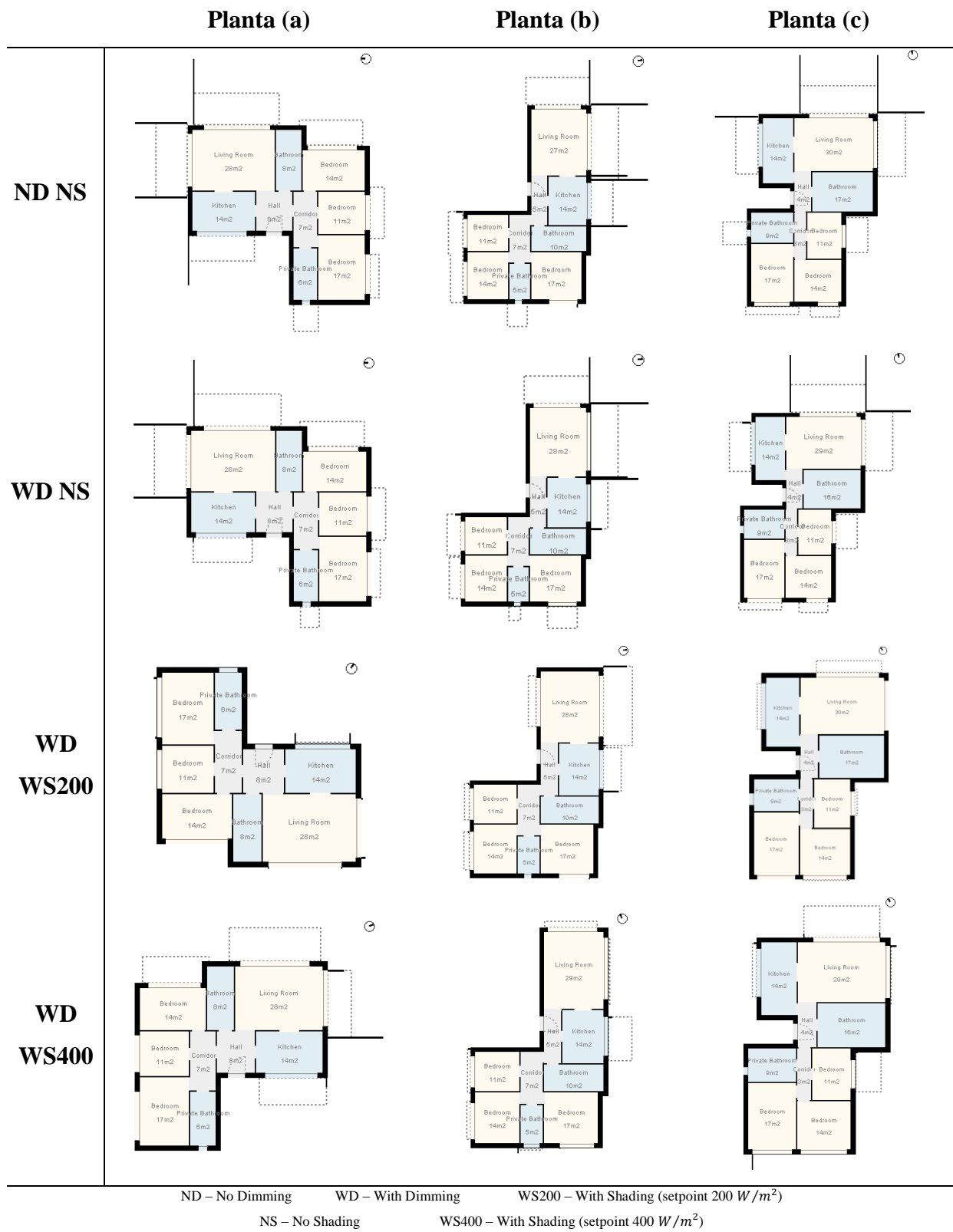
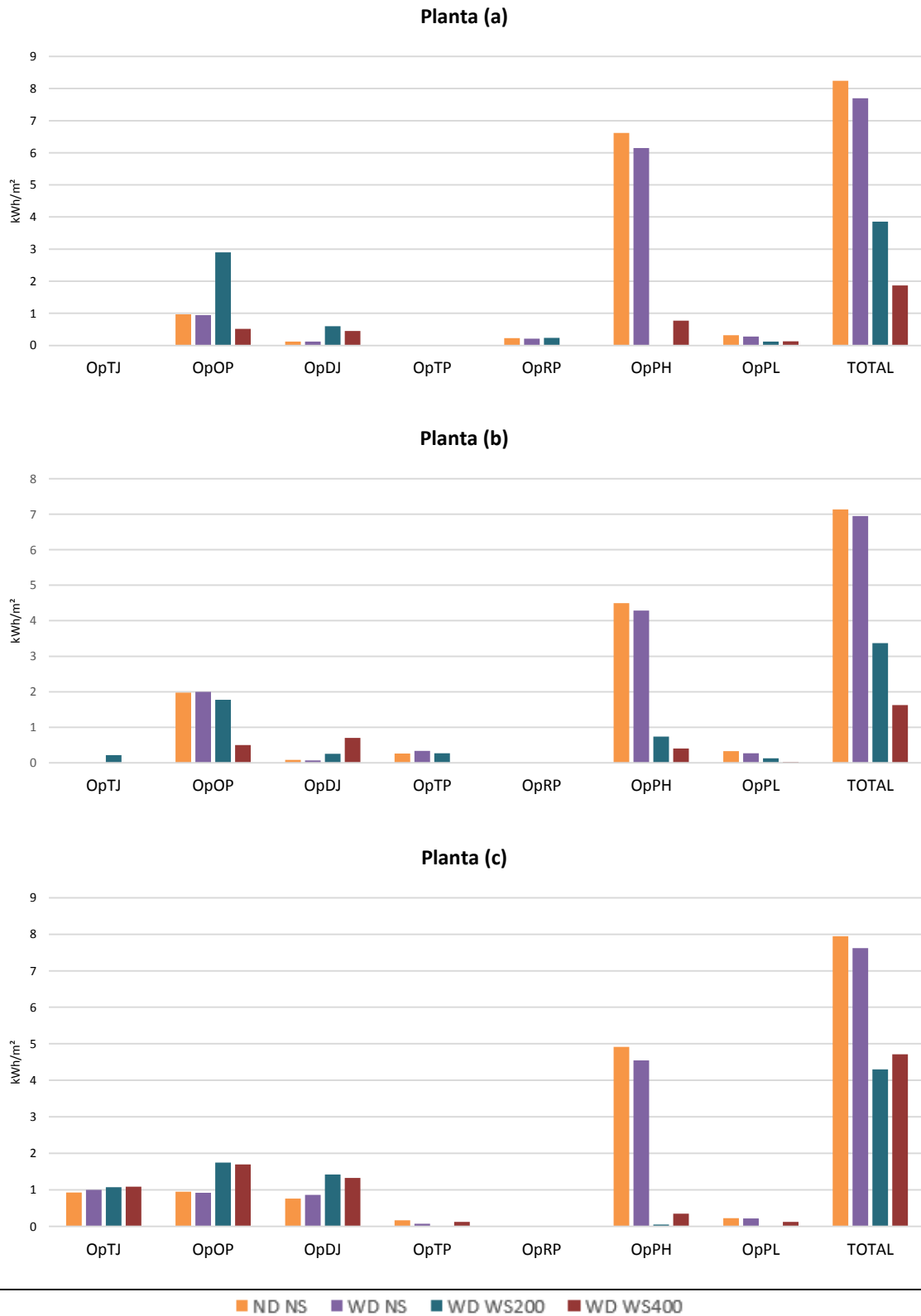


Figura 4.6. Plantas obtidas após otimização.





**Figura 4.7.** Reduções energéticas por operador nos diferentes tipos de controlo.

Para os casos em que o controlo dos sombreamentos está ativo, no caso do *setpoint* de 200 W/m<sup>2</sup>, é visível na Figura 4.6 que a planta (a) sofreu uma reflexão segundo o eixo horizontal. Esta transformação levou a que, principalmente as necessidades de aquecimento tivessem aumentos bruscos durante as iterações correspondentes a este operador. No entanto, nas iterações seguintes estas mudanças foram apaziguadas por ajustes na orientação da planta (OpOP), sendo depois mais ou menos constantes os consumos ao longo das restantes iterações, como seria de esperar pelos resultados já analisados anteriormente. Relativamente ao controlo para o *setpoint* 400 W/m<sup>2</sup>, o comportamento da simulação não é tão constante, sendo a influência dos operadores bastante mais visível do que no caso anterior. Ainda assim, as zonas com maior área de vãos envidraçados continuam a ser as que sofrem maiores alterações geométricas. É de notar o facto de o Corredor, apesar de não ter qualquer janela, mostrar em todos os casos consumos bastante elevados de energia para o arrefecimento. Isto pode dever-se ao facto de, por ser uma zona no interior da planta e com muito pouco contacto com paredes exteriores, ser difícil controlar este espaço termicamente pois possui ganhos pelos espaços adjacentes e como não está exposto a ventilação exterior, que só existe para espaços com janelas, este preserva o calor e é menos sensível às mudanças térmicas do exterior. Por ser no interior da planta e apenas ter como fronteiras paredes também interiores é uma zona que poderá ter temperaturas acima do normal.

No geral, para o arrefecimento, as zonas com maiores consumos irão ser a Sala, o Corredor e a Cozinha. No caso do aquecimento, irão ser os Quartos, a Sala e também a Cozinha.

## 5. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este estudo permitiu avaliar a importância do controlo da iluminação natural e artificial nos consumos energéticos globais na fase de projeto de plantas de arquitetura geradas pelo algoritmo EPSAP.

Concluiu-se que a adição tanto do controlo da iluminação artificial como dos sombreamentos permite reduzir significativamente os consumos energéticos das plantas geradas no que refere ao aquecimento e arrefecimento. As soluções geométricas são também muito alteradas consoante o tipo de controlo que lhes está associado. Plantas sem sistemas de sombreamento irão ser alteradas de modo a contrariar a entrada de radiação solar nos espaços, gerando assim soluções com palas horizontais e laterais com tamanhos bastante grandes. Com a introdução dos sistemas de sombreamento (persianas), as palas deixam de ter uma importância tão evidente sendo reduzidas significativamente uma vez que a sua função irá ser substituída pela existência das persianas. Neste último caso fatores como a orientação da planta irão assumir um papel de maior relevância para a eficiência energética.

Tendo em conta os resultados obtidos, tudo indica que a escolha do *setpoint* para os sombreamentos deverá recair sobre um valor não muito alto, neste caso de 200 W/m<sup>2</sup>, por forma a termos um melhor desempenho energético do edifício. A planta que apresentou melhores resultados foi a planta (a), com o controlo WD WS200.

As zonas com uma maior área de vãos envidraçados, principalmente a Sala, são as responsáveis pelos maiores consumos, mas também apresentam uma maior diminuição nos mesmos ao longo do processo de otimização, pelo que se deve prestar especial atenção a estes espaços. Apesar das conclusões anteriores, o corredor revela-se como uma das zonas que mais energia para arrefecimento consome, apesar de não ter qualquer janela. Isto deve-se ao facto de não possuir ventilação e ser alvo de ganhos pelos espaços adjacentes.

Antes de mais, é importante referir que os resultados encontrados neste trabalho diferem consideravelmente dos resultados obtidos no trabalho anterior (Rodrigues et al.,

2014a, 2014b), onde apenas era considerada a eficiência térmica do edifício. Será relevante no futuro analisar o porquê das diferenças de comportamento obtidas. A adaptação dos perfis de utilização tanto dos sistemas de iluminação artificial como dos sistemas de climatização deverão procurar adaptar-se à realidade Portuguesa em que, por exemplo, não é comum usar-se sistemas de arrefecimento.

Neste trabalho os *setpoints* dos dispositivos de sombreamento foram escolhidos pelo utilizador. Seria interessante que estes *setpoints* fossem automaticamente atribuídos pelo programa funcional, ou seja, o próprio algoritmo iria escolher o *setpoint* que teria um melhor comportamento para a planta nas condições dadas. Esta análise iria muito provavelmente resultar em melhorias significativas dos consumos energéticos, uma vez que o controlo dos sombreamentos influencia consideravelmente os consumos relativos à climatização dos espaços. A utilização dos sistemas de sombreamento em apenas dois estados (On/Off) representa também um aspeto que poderia ser melhorado considerando o fecho das persianas em vários níveis.

Por fim, para uma otimização térmica e energética mais real e completa das plantas geradas pelo EPSAP, a análise dos consumos de climatização poderia ser feita tendo em conta a energia final, e não a energia útil que está a ser obtida através do uso do objeto “*IdealLoads*”. Acrescentar ao estudo as tecnologias e aparelhos associados aos sistemas de climatização, e o seu respetivo rendimento iria permitir contabilizar em termos de energia final os consumos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Homoud, M. (2001). Computer-aided building energy analysis techniques. *Building and Environment*, 36, 421–433.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132300000263>
- Almeida, A. M., & Martins, A. G. (2014). Efficient lighting in buildings: The lack of legislation in Portugal. *Energy Policy*, 67, 82–86.  
<http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.031>
- ASHRAE. (1995). *ASHRAE Applications Handbook*.
- Conselho de Ministros. (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n.º 80/2006. *Diário Da República*, 46(2468–2513).  
<http://www.rccte.com/>
- Diretiva 2010/31/UE de 19 de Maio. Desempenho Energético de Edifícios. Parlamento Europeu e do Conselho.  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=URISERV:en0021>
- Diretiva n.º 2006/32/CE de 5 de Abril. Diário da República, 1.º Série – N.º 97 – 20 de Maio de 2008. Resolução do Conselho de Ministros. Lisboa.  
[http://www.aiccopn.pt/news.php?news\\_id=983](http://www.aiccopn.pt/news.php?news_id=983)
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230–245.  
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>
- IESNA. (1993). *IESNA Lighting Handbook, Reference and Application*, 8<sup>th</sup> edition.
- InputOutput Reference. (2013). *The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*. US Department of Energy.
- Instituto Nacional de Estatística. (2011). *Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*.  
[http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_destaques&DESTAQUESdes\\_t\\_boui=107694566&DESTAQUESmodo=2](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdes_t_boui=107694566&DESTAQUESmodo=2)

- International Energy Agency. (2012). *Electricity Information*.  
<http://www.iea.org/media/training/presentations/.../electricityinformation.pdf>
- Mukherjee, S. (2010). Closed loop integrated lighting and daylighting control for low energy buildings. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 252–269.  
<http://rste040vImp01.blackmesh.com/files/proceedings/2010/data/papers/2204.pdf>
- Nguyen, A.-T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, 1043–1058.  
<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>
- Parlamento Europeu. (2010). DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.  
<http://www.epbd-ca.eu/>
- Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética 2015. (2008). Resolução do Conselho de Ministros nº80/2008, 2824–2865.  
<http://www2.adene.pt/pt-pt/PNAEE/Paginas/DocsPNAEE.aspx>
- Reinhart, C. F. (2004). Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, 77(1), 15–28.  
<http://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.003>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013a). An approach to the multi-level space allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary technique. *Automation in Construction*, 35, 482–498.  
<http://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.005>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013b). An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 1: Methodology. *CAD Computer Aided Design*, 45(5), 887–897.  
<http://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.001>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013c). An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 2: Validation and performance tests. *CAD Computer Aided Design*, 45(5), 898–910.  
<http://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.003>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014a). Automated approach for design generation and thermal assessment of alternative floor plans. *Energy and Buildings*, 81, 170–181.  
<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.016>

- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014b). Improving thermal performance of automatically generated floor plans using a geometric variable sequential optimization procedure. *Applied Energy*, 132, 200–215.  
<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.068>
- Shen, E., Hu, J., & Patel, M. (2014). Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies. *Building and Environment*, 78, 155–170.  
<http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.028>
- União Europeia. (2011). Critérios CPE da UE relativos à iluminação interior, 1–21.  
[http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/criteria/indoor\\_lighting\\_pt.pdf](http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/criteria/indoor_lighting_pt.pdf)
- Wang, S., Yan, C., & Xiao, F. (2012). Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy and Buildings*, 55, 873–888.  
<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.037>





## ANEXO B – OBJETOS WINDOWMATERIAL:BLIND E WINDOWPROPERTY:SHADINGCONTROL

```
WindowMaterial:Blind,  
  Blind_0.015m, !- Name  
  Horizontal, !- Slat orientation  
  0.025, !- Slat width {m}  
  0.01875, !- Slat separation {m}  
  0.001, !- Slat thickness {m}  
  45, !- Slat angle {deg}  
  0.9, !- Slat conductivity {W/m-K}  
  0, !- Slat beam solar transmittance  
  0.5, !- Front Side Slat beam solar reflectance  
  0.5, !- Back Side Slat beam solar reflectance  
  0, !- Slat diffuse solar transmittance  
  0.5, !- Front Side Slat diffuse solar reflectance  
  0.5, !- Back Side Slat diffuse solar reflectance  
  0, !- Slat beam visible transmittance  
  0.5, !- Front Side Slat beam visible reflectance  
  0.5, !- Back Side Slat beam visible reflectance  
  0, !- Slat diffuse visible transmittance  
  0.5, !- Front Side Slat diffuse visible reflectance  
  0.5, !- Back Side Slat diffuse visible reflectance  
  0, !- Slat Infrared hemispherical transmittance  
  0.9, !- Front Side Slat Infrared hemispherical emissivity  
  0.9, !- Back Side Slat Infrared hemispherical emissivity  
  0.05, !- Blind-to-glass distance  
  0.5, !- Blind top opening multiplier  
  0.5, !- Blind bottom opening multiplier  
  0.5, !- Blind left-side opening multiplier  
  0.5, !- Blind right-side opening multiplier  
  , !- Minimum slat angle {deg}  
  ; !- Maximum slat angle {deg}  
  
WindowProperty:ShadingControl,  
  EXT_Blind, !- Name  
  ExteriorBlind, !- Shading Type  
  EXTWINDOW_SHADING, !- Construction with Shading Name  
  OnIfHighZoneAirTempAndHighSolarOnWindow, !- Shading Control Type  
  SCH_shadingcontrol, !- Schedule Name  
  25, !- Setpoint {W/m2, W or deg C}  
  No, !- Shading Control Is Scheduled  
  Yes, !- Glare Control Is Active  
  , !- Shading Device Material Name  
  FixedSlatAngle, !- Type of Slat Angle Control for Blinds  
  , !- Slat Angle Schedule Name  
  300; !- Setpoint 2 {W/m2, W or deg C}
```

## ANEXO C – OBJETOS HVACTEMPLATE:THERMOSTAT E HVACTEMPLATE:ZONE:IDEALLOADSAIRSYSTEM

```
HVACTemplate:Thermostat,  
  HVAC_Thermostat, !- Name  
  , !- Heating Setpoint Schedule Name  
  20, !- Constant Heating Setpoint {C}  
  , !- Cooling Setpoint Schedule Name  
  25; !- Constant Cooling Setpoint {C}  
  
HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,  
  ZN_0_0_Hall, !- Zone Name  
  HVAC_Thermostat, !- Template Thermostat Name  
  SCH_P_N_ZN_0_0_Hall, !- System Availability Schedule Name  
  50, !- Maximum Heating Supply Air Temperature {C}  
  13, !- Minimum Cooling Supply Air Temperature {C}  
  0.0156, !- Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio {kgWater/kgDryAir}  
  0.0077, !- Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio {kgWater/kgDryAir}  
  NoLimit, !- Heating Limit  
  , !- Maximum Heating Air Flow Rate {m3/s}  
  , !- Maximum Sensible Heating Capacity {W}  
  NoLimit, !- Cooling Limit  
  , !- Maximum Cooling Air Flow Rate {m3/s}  
  , !- Maximum Total Cooling Capacity {W}  
  , !- Heating Availability Schedule Name  
  , !- Cooling Availability Schedule Name  
  ConstantSensibleHeatRatio, !- Dehumidification Control Type  
  0.7, !- Cooling Sensible Heat Ratio {dimensionless}  
  60, !- Dehumidification Setpoint {percent}  
  None, !- Humidification Control Type  
  30, !- Humidification Setpoint {percent}  
  None, !- Outdoor Air Method  
  0.00944, !- Outdoor Air Flow Rate per Person {m3/s}  
  , !- Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area {m3/s-m2}  
  , !- Outdoor Air Flow Rate per Zone {m3/s}  
  , !- Design Specification Outdoor Air Object Name  
  None, !- Demand Controlled Ventilation Type  
  NoEconomizer, !- Outdoor Air Economizer Type  
  None, !- Heat Recovery Type  
  0.7, !- Sensible Heat Recovery Effectiveness {dimensionless}  
  0.65; !- Latent Heat Recovery Effectiveness {dimensionless}
```

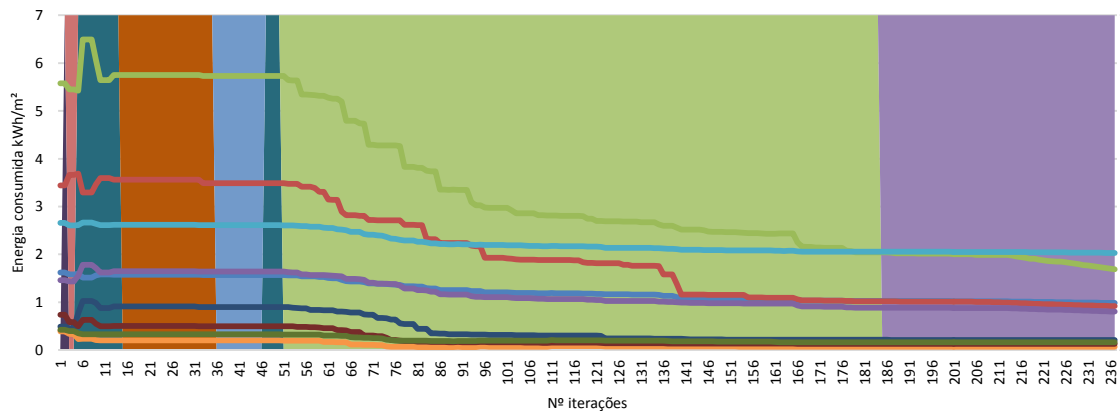
## ANEXO D – SISTEMAS DE CONSTRUÇÃO DAS PLANTAS

| Element        | U-value        | Layer                | T<br>{cm}      | C<br>{W/m-K} | D<br>{kg/m <sup>3</sup> } | SP<br>{J/kg-K} | TA   | SA   | VA   |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|--------------|---------------------------|----------------|------|------|------|
| Ceiling/Slab   | 3.28           | High weight concrete | 20.0           | 1.73         | 2242.6                    | 836.8          | 0.90 | 0.65 | 0.65 |
| Exterior door  | 5.00           | Hardwood             | 4.0            | 0.20         | 825.0                     | 2385.0         | 0.90 | 0.78 | 0.78 |
| Exterior wall  | 0.43           | Plaster              | 2.0            | 0.43         | 1250.0                    | 1088.0         | 0.90 | 0.60 | 0.60 |
|                |                | Dense brick          | 11.0           | 1.25         | 2082.4                    | 920.5          | 0.90 | 0.93 | 0.93 |
|                |                | Insulation           | 8.0            | 0.04         | 32.0                      | 836.8          | 0.90 | 0.50 | 0.50 |
|                |                | Concrete block       | 15.0           | 1.73         | 2242.6                    | 836.8          | 0.90 | 0.65 | 0.65 |
|                |                | Plaster (gypsum)     | 2.0            | 0.22         | 950.0                     | 840.0          | 0.90 | 0.60 | 0.60 |
| Floor          | 0.43           | High weight concrete | 20.0           | 1.73         | 2242.6                    | 836.8          | 0.90 | 0.65 | 0.65 |
|                |                | Insulation           | 8.0            | 0.04         | 32.0                      | 836.8          | 0.90 | 0.50 | 0.50 |
|                |                | Lime plaster         | 2.0            | 0.80         | 1600.0                    | 840.0          | 0.90 | 0.50 | 0.50 |
|                |                | Hardwood             | 1.5            | 0.20         | 825.0                     | 2385.0         | 0.90 | 0.78 | 0.78 |
| Interior door  | 2.00           | Hardwood             | 0.5            | 0.16         | 720.8                     | 1255.2         | 0.90 | 0.78 | 0.78 |
|                |                | Chipboard            | 3.0            | 0.07         | 430.0                     | 1260.0         | 0.90 | 0.78 | 0.78 |
|                |                | Hardwood             | 0.5            | 0.16         | 720.8                     | 1255.2         | 0.90 | 0.78 | 0.78 |
| Interior wall  | 2.69           | Plaster (gypsum)     | 2.0            | 0.22         | 950.0                     | 840.0          | 0.90 | 0.60 | 0.60 |
|                |                | Concrete block       | 7.0            | 1.73         | 2242.6                    | 836.8          | 0.90 | 0.65 | 0.65 |
|                |                | Plaster (gypsum)     | 2.0            | 0.22         | 950.0                     | 840.0          | 0.90 | 0.60 | 0.60 |
| Roof           | 0.36           | Slag                 | 1.5            | 1.44         | 881.0                     | 1673.6         | 0.90 | 0.55 | 0.55 |
|                |                | Felt and membrane    | 1.0            | 0.19         | 1121.3                    | 1673.6         | 0.90 | 0.75 | 0.75 |
|                |                | Dense insulation     | 10.0           | 0.04         | 91.3                      | 836.8          | 0.90 | 0.50 | 0.50 |
|                |                | High weight concrete | 20.0           | 1.73         | 2242.6                    | 836.8          | 0.90 | 0.65 | 0.65 |
|                |                | Plaster (gypsum)     | 2.0            | 0.22         | 950.0                     | 840.0          | 0.90 | 0.60 | 0.60 |
| <b>Element</b> | <b>U-value</b> | <b>Type</b>          | <b>g-value</b> | <b>VT</b>    |                           |                |      |      |      |
| Window         | 2.60           | Double Glazed Window | 0.63           | 0.70         |                           |                |      |      |      |

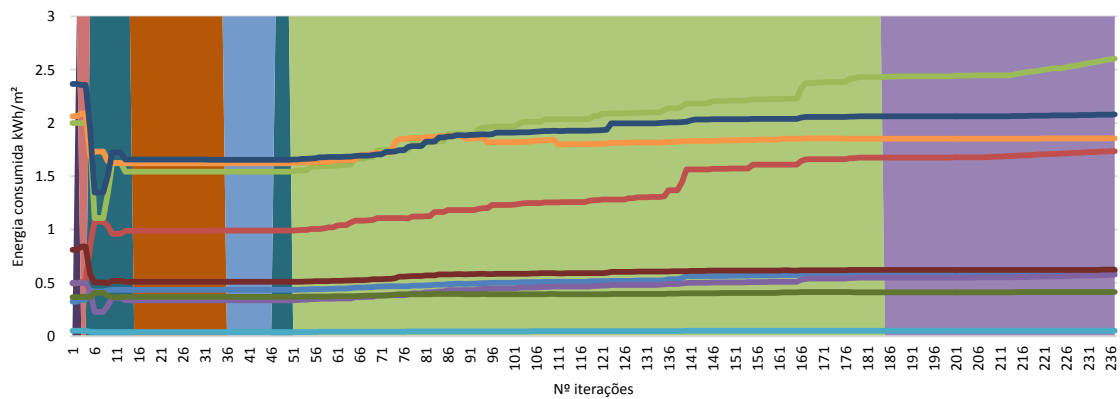
T - layer thickness; C - conductivity; D - density; SH - specific heat;  
 TA - thermal absorptance; SA - solar absorptance; VA - visible absorptance; and, VT - visible transmittance

## ANEXO E – INFLUÊNCIA DOS OPERADORES NOS CONSUMOS POR ZONA

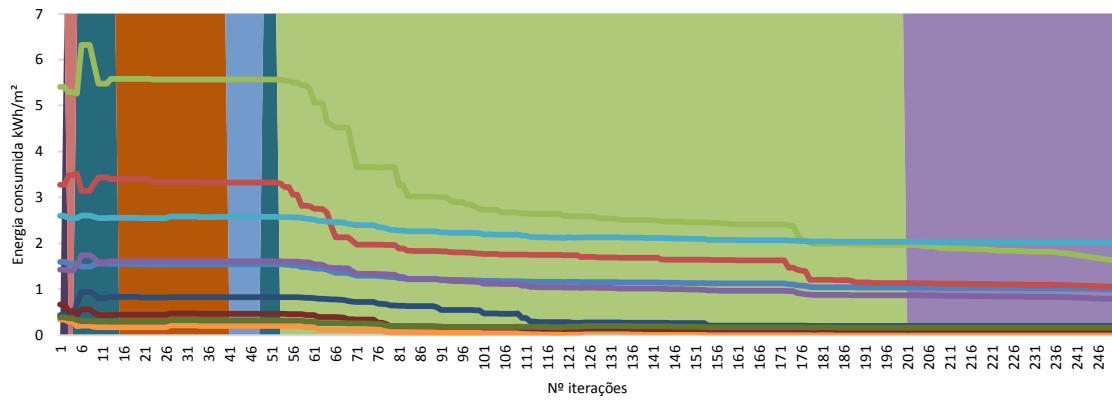
ND NS - Arrefecimento



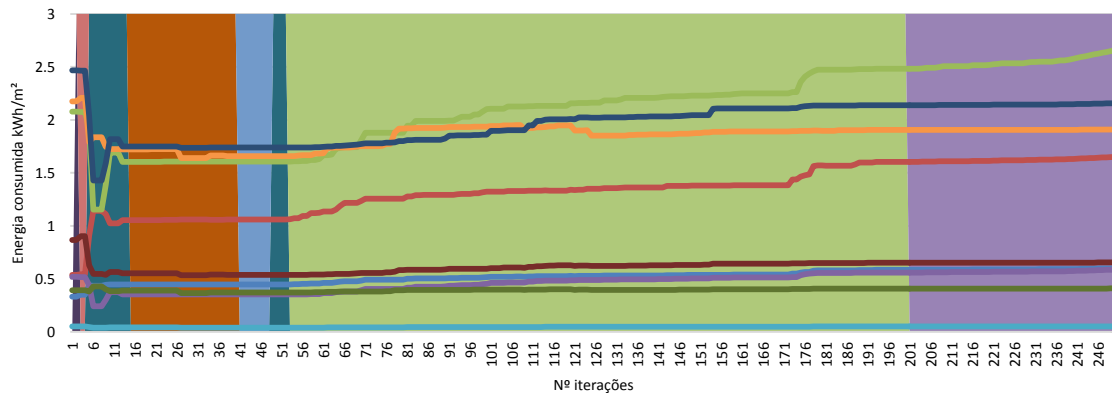
ND NS - Aquecimento



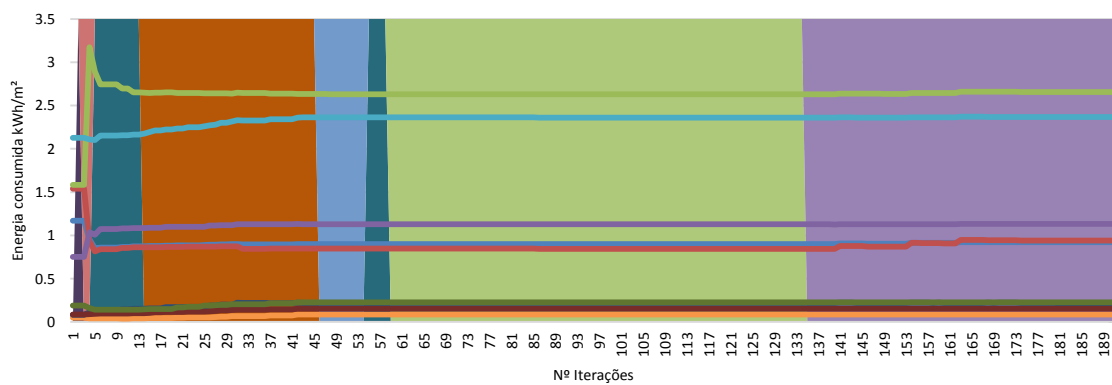
**WD NS - Arrefecimento**



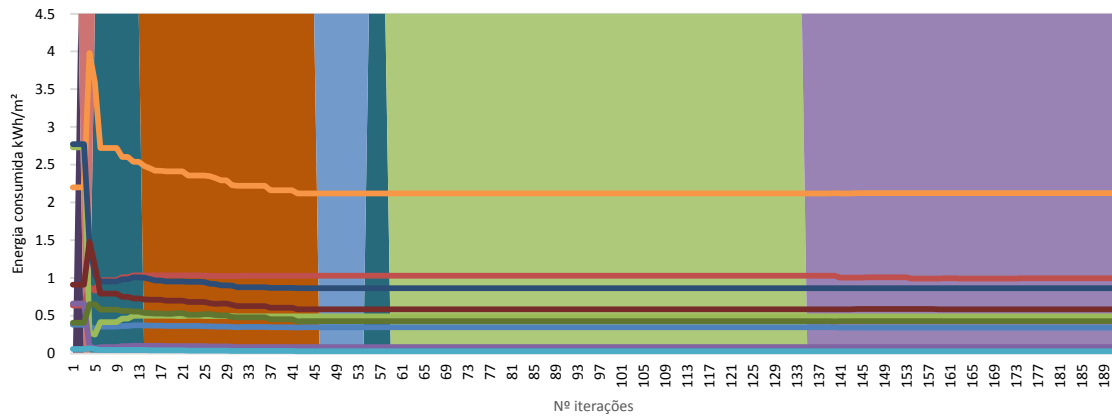
**WD NS - Aquecimento**



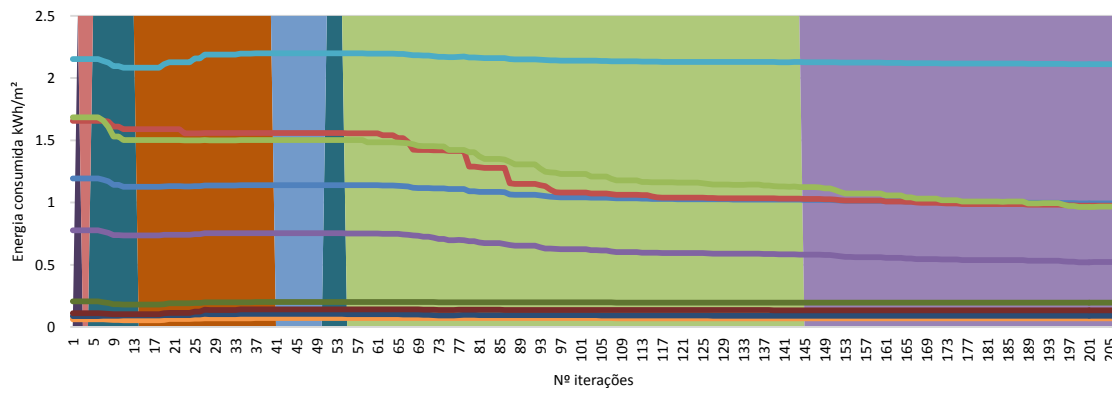
**WD WS200 - Arrefecimento**



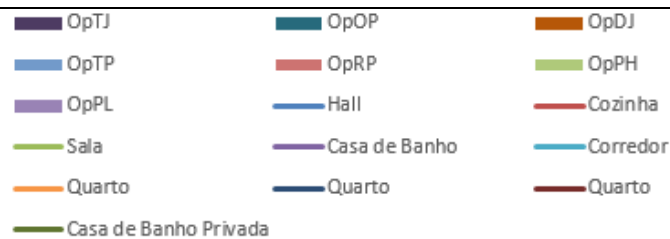
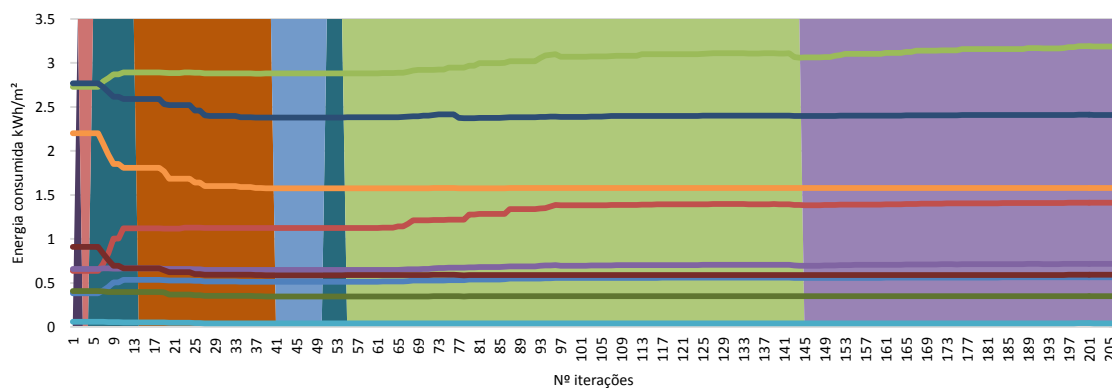
WD WS200 - Aquecimento



WD WS400 - Arrefecimento



WD WS400 - Aquecimento



Otimização da geometria de plantas de edifícios para satisfação de requisitos de iluminação, conforto térmico e consumo energético.

---