



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Otimização de sistemas construtivos através da aplicação de um algoritmo genético**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

**Autor**

**Nuno Filipe Sousa Lopes**

**Júri**

**Presidente Nuno Simões, Professor Auxiliar (DEC, UC)**

**Orientador Adélio Gaspar, Professor Auxiliar (DEM, UC)**

**Vogal Eugénio Rodrigues, Investigador (ADAI, LAETA)**

**Arguente Álvaro Gomes, Professor Auxiliar (DEEC, UC)**

**Coimbra, 2016**



O presente trabalho enquadra-se na Iniciativa para Sustentabilidade da Universidade de Coimbra (UC). Este trabalho foi suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE-Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), sob o projeto Ren4EEnIEQ (PTDC/EMS-ENE/3238/2014 e POCI-01-0145-FEDER-016760, respetivamente).

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Adélio Gaspar e ao Eugénio Rodrigues pela sua disponibilidade e pela prontidão nas respostas quando surgiram dúvidas ao longo da elaboração deste trabalho. Um agradecimento especial ao Eugénio pelas dúvidas que esclareceu ao longo deste período, especialmente na área de programação que se demonstrou mais desafiante que o que aparentava inicialmente.

Ao Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto (CDRSP) do Instituto Politécnico de Leiria um especial agradecimento, uma vez que sem eles as simulações demorariam muito mais tempo. Obrigado pelo hardware disponibilizado.

Gostaria de igual forma agradecer a todos os meus amigos e ao café ChillOut por todas as horas que partilhamos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Não é fácil encontrar pessoas e sítios para apoiar um trabalho descansado e ambos cumpriram bem o seu papel.

Em último lugar, um agradecimento aos meus pais, que à maneira deles me apoiaram para que a conclusão deste mestrado fosse possível.

Um muito obrigado a todos!

## RESUMO

Múltiplas características de desenho podem afetar a eficiência energética da envolvente do edifício, incluindo a sua forma, as características dos elementos construtivos, nomeadamente a quantidade de isolamento térmico, o tipo e a área dos envidraçados. No seguimento desta premissa, surge o interesse de estudos de processos de otimização que possam contribuir para uma maior eficiência energética. Visto tratar-se de um problema extenso, quando considerando os elementos construtivos com conjuntos de camadas de materiais, cada um com propriedades e espessuras distintas, um processo de tentativa e erro pode tornar-se moroso e inexecutável.

Neste trabalho desenvolveu-se uma ferramenta cujo objetivo é a otimização de sistemas construtivos baseada num algoritmo genético e com recurso a uma base-de-dados para garantir uma grande variabilidade de resultados. O algoritmo desenvolvido foi acoplado a um programa de geração de plantas de arquitetura, desenvolvido por investigadores da Universidade de Coimbra, para possibilitar encontrar soluções com desempenho térmico o mais otimizado possível. O algoritmo final é testado num caso de estudo onde a função objetivo é função das necessidades globais de energia do edifício. Para o cálculo destas necessidades foi utilizado o programa de simulação EnergyPlus versão 8.4.0.

Os resultados do caso de estudo demonstraram melhorias de até 4,55% nas necessidades energéticas para cada indivíduo. Foram ainda tidos em consideração que os valores do coeficiente de transmissão térmica para cada elemento se adaptam para a minimização dos consumos, uma vez que neste estudo foram considerados os ganhos internos.

**Palavras-Chave:** Algoritmo Genético, Otimização de Sistemas Construtivos, EnergyPlus, Eficiência Energética

# ABSTRACT

Multiple design features can affect the energy efficiency of the building envelope, including the form, constitution of the constructive elements, insulation thickness, window's type and area. Following this premise, studying of optimization processes that could contribute to greater energy efficiency was necessary. Since the problem is extensive when considering the constructive elements as sets of layers of materials, each with different thicknesses and properties, a process of trial and error can become time consuming and unenforceable.

In this work, we developed a tool whose goal is the constructive systems optimization based on a genetic algorithm by using a database to ensure the largest possible variability of results. The algorithm is then adapted to the work developed by researchers at the University of Coimbra in order to generate plants and find solutions.

The algorithm is then tested in a case study whose objective function is the building's global energy needs. For the calculation of this needs, EnergyPlus v8.4.0 was used as the simulation tool.

The results obtained from the case study shown improvements in energy needs of up to 4.55% in each individual. Energy gains from internal heat sources were taken into account.

**Keywords:** Genetic Algorithm, Constructive System Optimization, EnergyPlus, Energy Efficiency

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Esquema exemplificativo da abordagem à frente de Pareto.....	7
<b>Figura 2</b> – Fluxograma do algoritmo proposto. ....	9
<b>Figura 3</b> – Esquema exemplificativo das combinações de um elemento construtivo na matriz dos sistemas .....	10
<b>Figura 4</b> - Esquema exemplificativo da organização da tabela <i>Construction</i> .....	13
<b>Figura 5</b> – Plantas utilizadas no caso-de-estudo. ....	15
<b>Figura 6</b> – Variação da temperatura média do solo ao longo do ano para o Porto, a diferentes profundidades.....	16
<b>Figura 7</b> - Indicadores de evolução ao longo das 200 gerações para as plantas em estudo.....	22
<b>Figura 8</b> - Evolução do sistema construtivo ao longo das gerações para paredes exteriores para as plantas em estudo. ....	24
<b>Figura 9</b> - Evolução do sistema construtivo ao longo das gerações para coberturas para as plantas em estudo. ....	25
<b>Figura 10</b> - Evolução do sistema construtivo ao longo das gerações para paredes exteriores para as plantas em estudo. ....	26
<b>Figura 11</b> - Evolução dos coeficientes de transmissão térmica ao longo das gerações para parede externa, envidraçados piso e cobertura para as plantas em estudo. ....	27
<b>Figura 12</b> - Evolução da aptidão para a simulação das paredes interiores como único elemento alterável na planta FPD_D .....	31

# ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Resumo das publicações em estudo.....	6
<b>Tabela 2</b> - Separadores de camadas, materiais e espessuras utilizados na base-de-dados.....	13
<b>Tabela 3</b> - Constituição das soluções de Parede Externa consideradas no processo de otimização ..	18
<b>Tabela 4</b> - Constituição das soluções de Parede Interna consideradas no processo de otimização ..	19
<b>Tabela 5</b> - Constituição das soluções de Cobertura consideradas no processo de otimização .....	19
<b>Tabela 6</b> - Percentagem de melhoria entre extremos de indivíduos para cada planta (kWh/m <sup>2</sup> .ano). .....	22
<b>Tabela 7</b> - Novas espessuras da camada de isolamento para simulação manual e respetivos valores de coeficiente de transmissão térmica.....	28
<b>Tabela 8</b> - Resultados dos consumos anuais para aquecimento e arrefecimento para as soluções propostas. ....	29
<b>Tabela 9</b> - Comparativo entre o resultado escolhido pelo algoritmo e a simulação manual para o termóstato alterado, com o respetivo balanço.....	29
<b>Tabela 10</b> – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento para ambos os termostatos e respetivos balanços. ....	32
<b>Tabela 11</b> – Balanço das necessidades globais de energia para ambos os termostatos. ....	32
<b>Tabela 12</b> – Coeficientes de transmissão térmica para os elementos em contato com o ambiente exterior para cada indivíduo em ambos os termostatos. ....	33
<b>Tabela 13</b> – Valores máximos e de referência para os coeficientes de transmissão térmica para uma zona II.....	34

# ÍNDICE

1	Introdução.....	1
2	Estado da Arte .....	3
3	Algoritmo Desenvolvido .....	9
3.1	Base-de-dados .....	12
3.2	Implementação do algoritmo .....	14
4	Caso-de-Estudo.....	15
4.1	Indicadores da evolução do processo de otimização .....	21
4.2	Elementos em contato com o ambiente exterior .....	26
4.3	Paredes Interiores .....	30
4.4	Comparação do processo de otimização entre 2 termostatos diferentes.....	31
	Conclusões .....	35
	Bibliografia .....	37

# 1 INTRODUÇÃO

As múltiplas características do edificado, desde a envolvente aos elementos divisórios interiores, afetam a eficiência energética. Tanto os elementos opacos com translúcidos desempenham um papel importantes, já que é por estes que se realizam as trocas de calor e ganhos solares. Assim sendo, as características destes elementos são importantes para ter edificados com maior eficiência energética. Contudo, tratando-se de um problema combinatório, quando considerando os elementos construtivos com conjuntos de camadas de materiais, cada um com propriedades e espessuras distintas, um processo de tentativa e erro pode tornar-se moroso e inexecutável. Assim, é necessário recorrer a outros métodos de pesquisa que auxiliem os projetistas a identificar o sistema construtivos que mais se adequa à geometria do edificado.

Um problema de otimização de sistemas construtivos pode ser abordado recorrendo a técnicas evolucionárias baseadas em populações de indivíduos. Cada indivíduo constitui uma codificação da solução construtiva, também designada como material genético. É esta informação que é sujeita a operadores genéticos que irão produzir uma nova geração de indivíduos. Como existe uma maior probabilidade de seleção de indivíduos com melhor desempenho para combinar o seu material genético e, assim, produzir a próxima geração de indivíduos, a população iterativamente irá evoluir e convergir em desempenho para uma solução próxima do ótimo global (apesar de não ser garantido que tal aconteça). Em cada geração os indivíduos são avaliados de acordo com um conjunto de critérios, ordenados por desempenho e, posteriormente, selecionados. Na abordagem apresentada neste trabalho, para diferentes elementos do edificado são considerados diferentes sistemas construtivos, diferentes materiais e espessuras, alargando assim o espaço de pesquisa (cada ponto no espaço de pesquisa corresponde a uma solução candidata).

O propósito deste trabalho é desenvolver uma abordagem que auxilie os projetistas em identificar a melhor solução construtiva para as diferentes geometrias de edifícios em desenvolvimento. Essa abordagem será implementada como módulo de uma ferramenta, desenvolvida por investigadores da Universidade de Coimbra, que gera, avalia, e otimiza plantas de edifícios, denominada por *SAPTool*. Baseado em parâmetros decididos pelo utilizador, o *SAPTool* tem como propósito gerar e otimizar plantas de edifícios de acordo com o seu desempenho energético. O trabalho iniciar-se-á pela identificação dos requisitos da ferramenta e dos elementos construtivos. Seguir-se-á o desenvolvimento e implementação de um algoritmo evolucionário. Como a ferramenta já se encontra acoplada a um programa de simulação dinâmica de edifícios, a função custo do

algoritmo resultará do somatório do consumo energético para satisfazer as necessidades de aquecimento, arrefecimento e iluminação, obtidos do processo de avaliação desse programa. Na fase seguinte, as vantagens e desvantagens da abordagem serão analisadas a partir de um estudo-de-caso de uma moradia. Finalmente serão analisados os múltiplos aspetos referentes ao desempenho energético de cada uma das soluções finais apresentadas após a simulação, nomeadamente:

- Importância dos elementos em contacto com a envolvente;
- Impacto da parede interior para o comportamento térmico dos edifícios;

Comparação dos resultados do processo de otimização com o termostato de projeto com um processo de otimização realizado com o termostato segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) (*Decreto Lei no 118/2013 de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego*, 2013) Desta forma, os objetivos deste trabalho são:

- Estudar técnicas de pesquisa evolucionárias;
- Identificar requisitos dos elementos construtivos e da ferramenta base;
- Desenvolver um algoritmo de otimização de sistemas construtivos;
- Implementar o algoritmo como um módulo da ferramenta base;
- Avaliar o desempenho do algoritmo;
- Realizar um caso de estudo; e,
- Analisar os resultados comparando com a regulamentação portuguesa.

O presente trabalho engloba cinco capítulos distintos, incluindo o presente capítulo. O segundo capítulo refere-se ao estado-da-arte que engloba um levantamento dos trabalhos efetuados por outros autores. Segue-se o capítulo da metodologia em que será apresentada a abordagem e os métodos utilizados. O quarto capítulo é apresentado o estudo-de-caso proposto, os resultados obtidos, e é feita a discussão referente aos mesmos. Por último, apresentam-se as conclusões e o trabalho futuro no último capítulo.

## 2 ESTADO DA ARTE

O trabalho proposto por Castro-Lacouture, Sefair, Flórez & Medaglia (2009) apresenta um modelo de otimização da seleção de materiais baseado em algoritmos do tipo *mixed integer* e no sistema de classificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). O LEED constitui um sistema fortemente credibilizado entre peritos na área da construção sustentável, que se baseia em créditos e pontos. Através de cada crédito, o sistema avalia o desempenho do edifício e premeia-o caso os requisitos sejam cumpridos num leque de diferentes áreas como local de construção, qualidade do ambiente interior e, materiais e recursos. Os tópicos em avaliação devem ser tratados como um todo e não como categorias individuais. Contudo, vários autores referem que os materiais de construção apresentam a categoria com maior impacto (US Green Building Council, 1999), reduzindo-se a pegada ambiental através da escolha e substituição correta de materiais (Thormark, 2006). Para cada critério, o sistema de avaliação atribui pontos, caso os requisitos sejam cumpridos, até um máximo de 11 pontos. A abordagem foi aplicada a um caso-de-estudo de um edifício de escritórios de 11 andares em Bogotá, Colômbia. A seleção dos possíveis materiais inclui cinco materiais diferentes para componentes de madeira para construção, adesivos e elementos de selagem, tinta, carpete, coberturas, vidro e envidraçados. O modelo exposto apresenta, contudo, algumas limitações uma vez que se encontra aplicado ao mercado Colombiano que apresenta limitações orçamentais.

Asadi, Da Silva, Antunes & Dias (2012) propõem um modelo de otimização por multiobjetivos aplicado à remodelação de edifícios existentes de forma a minimizar as necessidades energéticas de forma economicamente eficiente, enquanto garantindo o cumprimento das necessidades e requisitos dos ocupantes. Consideraram como elementos construtivos no processo de remodelação o tipo de envidraçados, os materiais de isolamento para as paredes exteriores, os materiais de isolamento da cobertura e o tipo de coletor solar.

A abordagem ao problema da renovação de edifícios assenta numa simulação que se foca em aspetos específicos do problema em vez de uma abordagem mais global. O objetivo do trabalho de Asadi *et al.* foi desenvolver um modelo matemático de multiobjetivos para possibilitar apoio de decisão nas escolhas de tecnologias de avaliação para estratégias de remodelação. O algoritmo assentou num modelo simples desenvolvido com base na metodologia do RCCTE.

Bolattürk (2006) apresenta uma abordagem diferente em relação a um problema de otimização de materiais de construção. Neste estudo, o modelo de otimização é baseado na análise de custos do ciclo de vida (LCCA). Nele são estudados os custos totais de um sistema ou componente ao longo do seu tempo de vida. Nesta abordagem foi escolhido como parâmetro de avaliação o custo total da

energia para aquecimento de um edifício tipo. Foi tido em conta o custo atual dos materiais para o cálculo da função de custo e incluiu-se uma variável correspondente à inflação, uma vez que o custo dos combustíveis se encontra em constante alteração. Foram considerados cinco combustíveis diferentes em 16 cidades diferentes na Turquia com o mesmo material escolhido para a camada de isolamento - o Poliestireno. A análise final para as várias cidades e combustíveis ao longo de um período de 10 anos concluiu que a espessura ideal para o isolamento para os parâmetros escolhidos se encontra entre 2 e 17 cm, sendo indicada a espessura ideal para os edifícios de cada cidade. Os dados revelam uma poupança energética compreendida entre 22 e 79% e o período de retorno económico varia entre 1.3 e 4.5 anos. Todas as conclusões retiradas deste estudo dependem da cidade escolhida e do tipo de combustível utilizado para aquecimento.

Chantrelle, Lahmidi, Keilholz, El Mankibi & Michel (2011) apresentou um estudo cujo objetivo foi o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização multicritério para renovação de edifícios, a que chamou MultiOpti, com foco na envolvente do edifício, cargas térmicas para aquecimento e arrefecimento e estratégias de controlo. Utilizou um algoritmo genético emparelhado com o programa *TRNSYS* e com bases de dados económicas e ambientais. O caso de estudo apresentado foi a renovação de uma escola no sul de França, em Nice, que foi representativa da construção típica de França. Apesar de os estudos efetuados se terem iniciado com um algoritmo monocritério, o objetivo final foi a passagem da ferramenta para multicritério. A primeira geração da população foi selecionada aleatoriamente e foi organizada em Frentes de Pareto. Os indivíduos que não se apresentaram dominados por nenhum outro, foram destacados para a frente número um. Os que apenas se apresentaram dominados pelos indivíduos da frente um, foram destacados para a frente dois e sucessivamente. A cada indivíduo, em cada frente, foi atribuída uma classificação com base na frente a que pertencia. De igual forma foi atribuída uma “distância de aglomerado”, cujo objetivo era medir a distância do indivíduo da sua vizinhança. Seguidamente, foram selecionados indivíduos pais da primeira geração com base no método de seleção binária baseados na sua classificação e “distância de aglomerado”. Foram então aplicados os métodos de combinação e mutação e repetiu-se o processo de organização com base em não dominância.

Dentro dos parâmetros relacionados com a escolha de sistemas de construção apresentou múltiplas soluções para cada uma das variáveis da envolvente do edifício, nomeadamente parede exterior, cobertura, piso térreo, piso intermédio, parede interna e envidraçado.

Provou-se que a ferramenta desenvolvida por este estudo pode ser utilizada para otimizar múltiplos objetivos simultaneamente e produzir soluções alternativas para essas mesmas combinações de objetivos.

No trabalho realizado por Tuhus-Dubrow & Krarti (2010) foi desenvolvida e aplicada uma ferramenta de otimização com recurso a simulação energética, baseada em algoritmos genéticos. Os objetivos do trabalho eram a minimização do custo de ciclo de vida do edifício em estudo e a otimização do comportamento térmico do edifício. Para esse efeito, os parâmetros utilizados foram a forma do edifício e a constituição dos elementos da envolvente. O edifício escolhido para estudo-de-caso baseou-se num modelo da *Building America Research Benchmark*. Os resultados demonstraram que a forma do edifício é o fator com maior peso no desempenho térmico. Contudo, são apresentados alguns testes relacionados com a variação da composição dos elementos que constituem a envolvente do edifício em diferentes climas. Em geral, permitindo a variação da composição dos elementos, a forma do edifício tende para a planta retangular (das seis geometrias possíveis), apresentando os menores custos de ciclo de vida em todos os climas estudados.

Shi (2011) apresentou um estudo, utilizando o *modeFRONTIER*, para um problema de minimização das necessidades de climatização de um edifício de escritórios localizado em Nanjing, China, utilizando como variável a espessura de isolamento. O programa *EnergyPlus* foi utilizado como ferramenta de simulação da performance térmica do edifício. O *software ModeFrontier* é um programa de otimização multiobjetivo e de design que permite a integração com ferramentas CAD/CAE e programas de simulação. Contudo, o objetivo do estudo não foi encontrar a solução com espessura de isolamento ou necessidades de climatização mais baixas, mas sim, um equilíbrio entre as duas. Para tal, recorreu à abordagem da frente de Pareto, apresentando um conjunto de resultados ao invés duma solução ótima. Shi (2011) acrescenta que, sem realizar uma análise multiobjetivo, todos os resultados que se encontrem no grupo da frente de Pareto são considerados com ótimos. Foi utilizado o *modeFrontier* como ferramenta de decisão multiobjetivo, considerando três abordagens diferentes ao peso dos fatores espessura de isolamento e necessidades de climatização.

A **Tabela 1** apresenta um resumo das publicações escolhidas para análise no presente capítulo. Todos os estudos efetuados e o estudo desenvolvido pelo presente trabalho possuíam um parâmetro em comum: a otimização de sistemas construtivos. Todos eles apontam para o mesmo objetivo final, a construção sustentável, quer por uma abordagem direta, como o caso do estudo de Castro-Lacouture, Sefair, Flórez & Medaglia (2009) em que é utilizado o sistema LEED ou através da minimização das necessidades energéticas dos edifícios em estudo.

**Tabela 1** - Resumo das publicações em estudo.

<b>Autor</b>	<b>Método de Otimização</b>	<b>Objetivo</b>
Castro-Lacouture, Sefair, Flórez & Medaglia (2009)	Algoritmos <i>mixed integer</i>	Maximizar a classificação LEED do edifício
Asadi, Da Silva, Antunes & Dias (2012)	Otimização multiobjetivo	Minimizar as necessidades energéticas sem prejudicar as necessidades e requisitos dos ocupantes
(Bolattürk, 2006)	Análise do custo do ciclo de vida (LCCA)	Minimizar os custos do aquecimento, minimizando a espessura da camada de isolamento
(Chantrelle, Lahmidi, Keilholz, <i>et al.</i> , 2011)	Otimização multiobjetivo e Algoritmos Genéticos	Otimizar as operações de renovação de edifícios
Tuhus-Dubrow & Krarti (2010)	Algoritmos Genéticos	Minimizar o custo do ciclo de vida e otimizar o comportamento térmico do edifício
Shi (2011)	Algoritmos Genéticos	Minimizar as necessidades de climatização

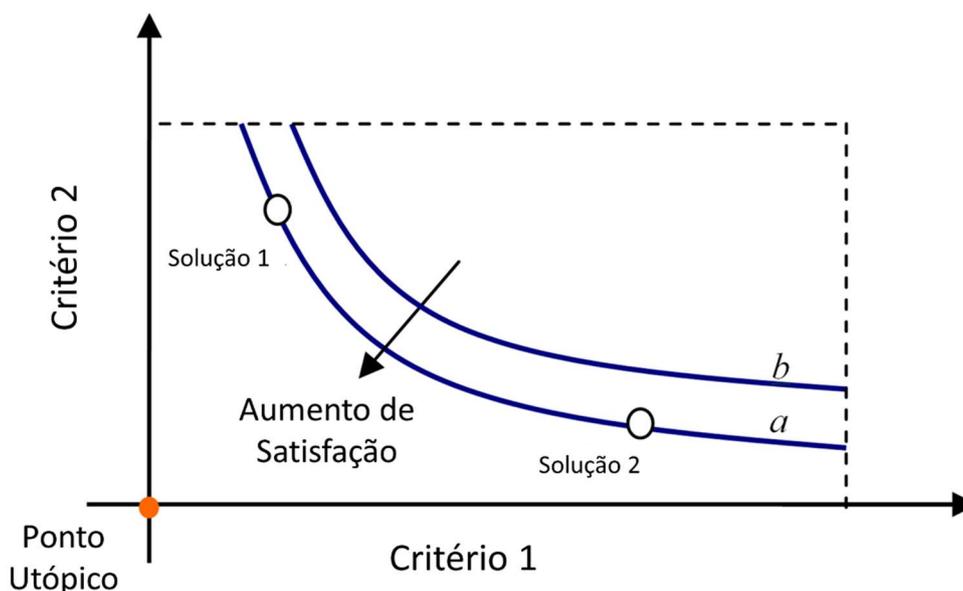
#### Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) surgiram de estudos de autómatos celulares, realizados por John Holland e os seus colegas na Universidade de Michigan (Holland *et al.*, 1984). A pesquisa auxiliada por AG manteve-se puramente teórica até meados de 1980, quando se deu o aumento de capacidade de processamento dos computadores, que permitiu a aplicação desta técnica de forma prática. A capacidade de evolução e adaptação através de estrangulamentos e penalizações da função de avaliação permitiu gerar conjuntos de soluções que por tentativa e erro levaria longos períodos de tempo.

Um AG é uma técnica de procura para resolução ou otimização de um problema. Baseia-se nas teorias evolutivas da biologia e, como tal, utiliza terminologia e processos como genoma, cromossomas, cruzamento genético, mutação, elitismo ou seleção. A evolução inicia-se com uma população de indivíduos completamente aleatórios e dá-se ao longo de várias gerações. Em cada geração, a aptidão de cada indivíduo é avaliada com base na função objetivo. Para nova geração, parte-se da geração anterior, aplicando métodos de seleção, cruzamento genético, mutação e elitismo. Elitismo consiste na escolha do grupo de indivíduos mais aptos, garantindo a passagem das melhores soluções para a geração seguinte. O processo de cruzamento genético, utiliza o método de seleção, no qual são escolhidos indivíduos da geração anterior com base na sua aptidão ou de forma aleatória para serem combinados entre si de forma a gerarem um novo indivíduo. São escolhidos genes de cada um dos indivíduos selecionados para o novo indivíduo que será incluído na nova população.

Simulando a evolução natural, é aplicado o processo de mutação que irá alterar parte do cromossoma do indivíduo por ele afetado. É normalmente considerada uma taxa de mutação para controlar a quantidade de indivíduos que é afetado por este processo. Através deste processo é possível gerar novos indivíduos com características dos indivíduos gerados na geração anterior, resultando num conjunto variado de resultados ao longo das gerações definidas pelo utilizador ou até o critério de término do programa ser encontrado.

O método de avaliação de indivíduos pode de igual forma mudar de complexidade dependendo do número de critérios. Problemas simples podem ter um método de avaliação simplificado, como acontece com o proposto por este trabalho, em que a avaliação corresponde apenas ao somatório das necessidades energéticas do edifício. Contudo, problemas com dois ou mais métodos de avaliação requerem abordagens diferentes. O método da frente de Pareto e da função custo de soma ponderada apresentam-se como possíveis soluções para problemas deste tipo. A frente de Pareto determina que não existe uma solução ótima para o problema, mas sim um conjunto de indivíduos que são igualmente ótimos. Tal cenário ocorre quando não existe a possibilidade de otimizar mais um determinado critério sem que outro seja prejudicado, e é fruto da impossibilidade de quantificar os seus pesos. A **Figura 1** demonstra, de forma simplificada uma abordagem à frente de Pareto.



**Figura 1** – Esquema exemplificativo da abordagem à frente de Pareto

O grau de satisfação das soluções aumenta com a proximidade da origem dos eixos dos critérios em estudo, chamado de ponto utópico. Consideram-se, de acordo com a imagem que, segundo o Critério 1 e o Critério 2, tanto a Solução 1 como a Solução 2 pertencem ao grupo de soluções para um

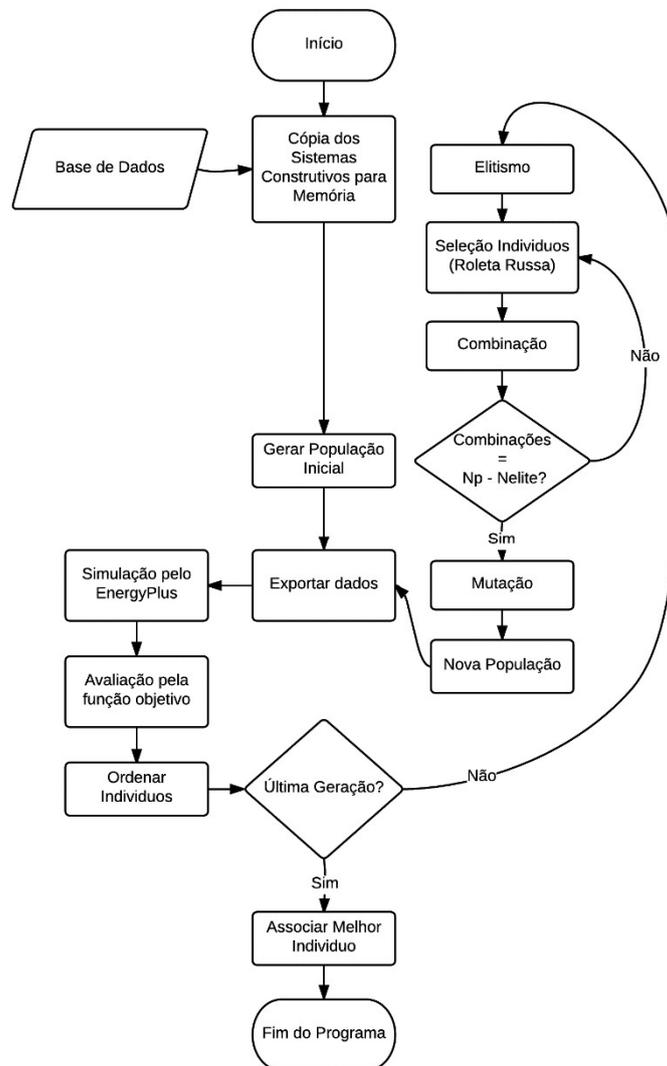
determinado problema em estudo. Não é possível otimizar nenhuma das soluções sem que se comprometa um dos critérios. As soluções da frente a apresentam melhores resultados que as soluções da frente b uma vez que a curva da frente a está mais próxima do ponto utópico.

Quando existe a capacidade de quantificar o peso de cada critério, pode ser criada uma função custo de soma ponderada, atribuindo um quociente a cada um deles e fazendo um somatório do produto entre as avaliações individuais e os quocientes de cada critério.

### 3 ALGORITMO DESENVOLVIDO

Após a realização de ensaios preliminares com AG como mecanismo de pesquisa, optou-se por usar esta técnica para encontrar a solução construtiva próxima da ótima global, procedendo às alterações necessárias para que este pudesse acomodar toda a informação necessária ao problema em estudo. O processo de otimização é individual para cada geometria alternativa em estudo, sendo efetuado em paralelo para cada uma das geometrias se o número de núcleos do processador da máquina utilizada para o processo de otimização o permitir ou em série quando o processamento paralelo não se aplica.

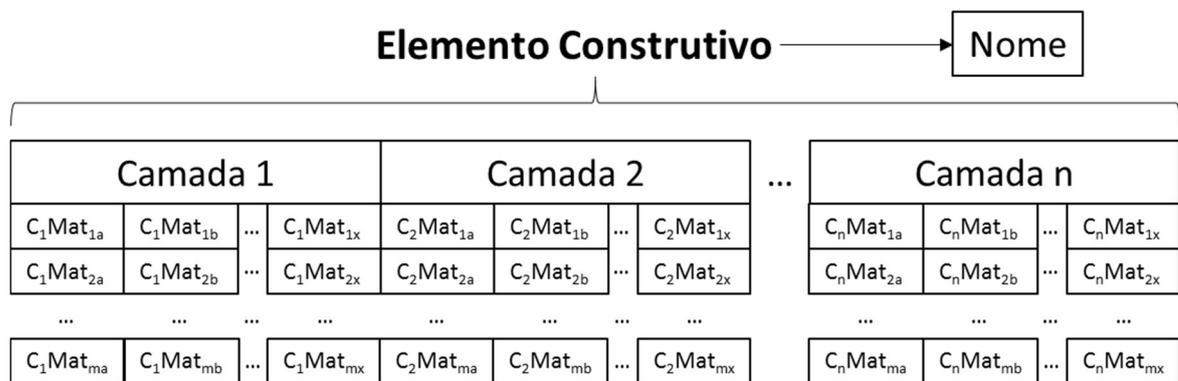
A **Figura 2** representa o fluxograma do algoritmo proposto.



**Figura 2** – Fluxograma do algoritmo proposto.

Cada indivíduo é codificado através de um vetor com nove campos em que um corresponde ao nome do sistema construtivo, um corresponde aos envidraçados e os restantes oito campos correspondem a cada um dos elementos que definem o edifício: parede exterior, parede interior, envidraçado, laje térrea, laje intermédia, porta interior, porta exterior, cobertura e teto.

A informação necessária para o preenchimento de cada um dos campos encontra-se na base-dados e é copiada para uma matriz no início do algoritmo de otimização dos sistemas construtivos. Para cada um dos campos, existe uma lista em que inclui o nome e uma matriz com camadas que compõem os elementos construtivos, com nome do material e respetivas espessuras associadas. O esquema de cada elemento construtivo encontra-se representado pela **Figura 3**.



**Figura 3** – Esquema exemplificativo das combinações de um elemento construtivo na matriz dos sistemas

A avaliação de cada indivíduo na população é realizada com os resultados dos consumos energéticos anuais (aquecimento, arrefecimento e iluminação) obtidos da simulação dinâmica (*EnergyPlus*) -Este processo é representado pela seguinte equação de minimização:

$$\min: f(x) = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{Nh} (H_{i,j} + C_{i,j} + L_{i,j})$$

$Nr$  – número de divisões

$Nh$  – número de horas no ano

$H_{i,j}$  - energia para aquecimento

$C_{i,j}$  – energia para arrefecimento

$L_{i,j}$  – energia para iluminação

Após uma primeira avaliação e ordenação crescente dos indivíduos, são aplicados os operadores genéticos e inicia-se o processo de criação da geração seguinte. Os novos indivíduos são reavaliados e o ciclo repete-se até atingir o número de geração definida pelo utilizador. O programa termina após ter sido cumprido o número de gerações imposto na parametrização do algoritmo, associando e substituindo o novo sistema construtivo na planta respetiva. Neste estudo, os operadores genéticos utilizados no algoritmo foram:

- Seleção – operador de seleção de indivíduos para cruzar o seu material genético (roleta russa – método de seleção);
- Elitismo – operador de elitismo que preserva o melhor indivíduo para geração seguinte;
- Combinação – em que o novo indivíduo é criado; e,
- Mutação – operador de mutação.

O operador Seleção elege da população dois pais para criar um novo indivíduo. Através do método Roleta Russa, são escolhidos os dois pais cuja probabilidade de escolha é inversamente proporcional ao seu desempenho em relação à soma do desempenho de todos indivíduos na população. Após a seleção dos dois indivíduos, é construído o cromossoma do novo indivíduo através da escolha aleatória de um dos pais para cada elemento utilizando o operador de Combinação.

O operador Combinação simula o comportamento da reprodução natural, em que o cromossoma dos dois indivíduos escolhidos para a conceção, é copiado de forma aleatória para o novo indivíduo. Os dois indivíduos selecionados provêm do método Seleção e cada um dos genes do cromossoma do indivíduo em criação será preenchido com o elemento contido nesse mesmo campo de um dos dois indivíduos escolhidos para a conceção, sendo esta escolha realizada de forma aleatória.

O operador Elitismo cria um grupo de elite constituído por N indivíduos da geração anterior. Os indivíduos são selecionados consoante o seu desempenho, sendo copiados para memória para inserção na nova população. São escolhidos os indivíduos que ocupam as primeiras posições no consumo energético global, previamente ordenados por ordem crescente após a avaliação da geração a que pertencem.

O operador Mutação assenta no varrimento do material genético de todos os indivíduos e modifica aleatoriamente um dos valores do cromossoma. Durante esse varrimento, a mutação poderá ser de três tipos, ativados aleatoriamente:

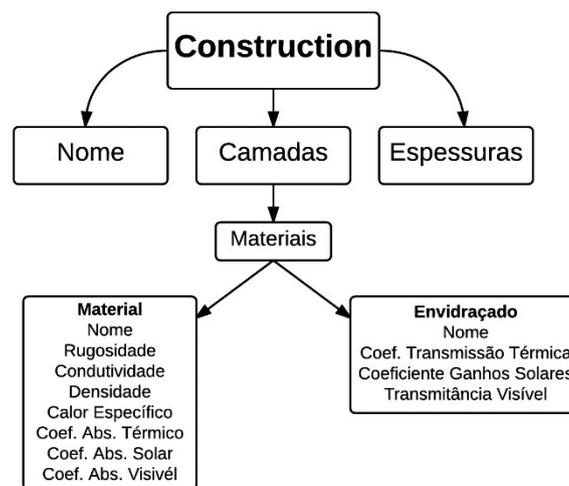
- Mutação do elemento: o que quer dizer que um novo elemento do mesmo tipo vai ser gerado de forma aleatória dentro das opções da base-de-dados;
- Mutação parcial do elemento: alterando uma ou várias camadas do elemento. A escolha das camadas afetadas é determinada pelo número de referência e pela percentagem de mutação. As camadas selecionadas são recriadas dentro das possibilidades da base-de-dados para aquele elemento construtivo específico; e,
- Mutação da espessura do material: alterando apenas a espessura de uma determinada camada. O material mantém-se inalterado e é escolhida uma nova espessura dentro das espessuras associadas aquele material dentro da camada e elemento específico.

### 3.1 Base-de-dados

Utilizando a base-de-dados de espaços tipo e sistema construtivos da ferramenta base, a codificação das alternativas de materiais e espessuras foram introduzidas. A base-de-dados inclui:

- *Construction* – identificação dos elementos construtivos, nome, camadas de materiais e espessuras associadas (utilizada para a codificação dos indivíduos);
- *Daylightingcontrols* e *Lights* – perfis de dimensionamento dos sistemas de iluminação para divisões específicas;
- *Equipment* – perfis de dimensionamento dos equipamentos para divisões específicas;
- *Material* – todas as informações referentes aos diferentes materiais, citados com a mesma identificação na tabela *Construction* (utilizada para a codificação do indivíduo);
- *People* – perfis de dimensionamento para ocupação;
- *Schedules* – programação de utilização dos perfis considerados nas tabelas *People*, *Daylightingcontrols*, *Lights* e *Equipment*;
- *Spaces* – contem a informação relevante para cada espaço, como por exemplo, taxas de ventilação e temperaturas mínimas e máximas do termostato;
- *BuildingSystem* – contem informação sobre os conjuntos de elementos construtivos admissíveis para cada um dos elementos que codificam um indivíduo (utilizado para a codificação do indivíduo).

Na **Figura 4** encontra-se um esquema ilustrativo da tabela *Construction* da base-de-dados. Cada *Construction* corresponde a um elemento construtivo. As três células seguintes correspondem às informações para nome, camadas e espessuras desse mesmo elemento construtivo. A coluna correspondente aos *Materials*, possui os IDs que correspondem à identificação para cada material na tabela *Materials*. Nessa tabela podem encontrar-se as informações das propriedades dos materiais divididos em duas categorias: uma para materiais individuais e uma para os envidraçados, uma vez que os últimos são apresentados como um elemento simplificado de um só material. As listas das propriedades para cada um dos tipos de entrada na tabela *Materials* pode ser consultada na **Figura 4**.



**Figura 4** - Esquema exemplificativo da organização da tabela *Construction*

Nesta fase, existiu necessidade de criar um sistema de separadores para que o programa pudesse facilmente interpretar/insere múltiplos materiais por camada e/ou múltiplas espessuras por material. Estes separadores estão explicados na **Tabela 2**.

**Tabela 2** - Separadores de camadas, materiais e espessuras utilizados na base-de-dados

Separador	Função
;	Mudança de camada (utilizado tanto nos ids de materiais como nas espessuras)
{ }	Informa o programa que existem múltiplos ids/espessuras dentro da camada atual
'	-Separador de ids na mesma camada -Separador de espessuras dentro do grupo de espessuras de determinado material
!	Separador de grupos de espessuras para diferentes materiais dentro da mesma camada

A estrutura de todos os sistemas construtivos é constituída pela junção de nove objetos correspondentes aos nove elementos em estudo neste trabalho, com o nome de *ConstructiveSystem*.

Este objeto é criado na inicialização do programa de otimização com o objetivo de minimizar o tempo de corrida e facilitar o acesso à codificação dos indivíduos e aos métodos de mutação.

O objeto *ConstructiveSystem* é então composto por nove matrizes de objetos *Construction*. Cada *Construction* é composto por uma *String* que contem o nome do mesmo; um *Type* (para que exista a distinção entre Elemento Opaco e Elemento Transparente); e uma matriz de objetos *Layer*. O objeto *Layer* é o mais simples dentro do arranjo, sendo apenas composto por uma matriz de *Materials*. A base da estrutura é composta por objetos *Materials* que contêm um inteiro, correspondente ao ID do material na base-de-dados e a espessura do mesmo para aquela combinação específica. Desta forma, é possível manter de forma organizada todas as combinações possíveis dentro da informação que se encontra dentro da base-de-dados. A informação contida no objeto *ConstructiveSystem* é lida sempre que existe necessidade de criar um novo indivíduo (população inicial) e no uso do operador de Mutação. No caso da criação de um novo indivíduo, é sorteado um elemento dentro dos elementos possíveis, seguindo-se o sorteio de um material para cada uma das camadas do elemento sorteado e de uma espessura associada a esse material. Para o operador de Mutação, apenas é lida a informação necessária para o tipo de mutação que está a afetar o indivíduo, por exemplo, no caso de ser mutado apenas um material, é realizado o varrimento de informação na matriz até ser encontrado o elemento correspondente, selecionada a camada a alterar e, seguidamente, o sorteio de um novo material e de uma nova espessura associada.

## 3.2 Implementação do algoritmo

O algoritmo desenvolvido foi implementado na ferramenta desenvolvida por Rodrigues, Gaspar & Gomes (2014a, 2013c, 2013b, 2013a, 2014b) como módulo de otimização do sistema construtivo. A ferramenta base consiste em dois algoritmos distintos. O primeiro consiste numa técnica evolucionária híbrida que combina uma estratégia evolucionária com uma técnica de pesquisa local para gerar plantas de acordo com a parametrização efetuada pelo utilizador no início do projeto. A estratégia evolucionária é realizada através duma abordagem elitista, que consiste na seleção dos indivíduos mais aptos para passarem a iteração seguinte, gerando novos indivíduos aleatoriamente para serem adicionados de forma a obter uma população completa. São aplicados métodos de mutação que garantem variabilidade genética através dos elementos construtivos das plantas. O segundo algoritmo otimiza as plantas alterando sequencialmente as variáveis geométricas de modo a melhorar o desempenho térmico obtido da simulação dinâmica (*EnergyPlus*). As variáveis geométricas são a orientação do edificado, dimensão dos vãos, orientação dos vãos, posição das paredes interiores, dimensionamento das palas horizontais e verticais.

## 4 CASO-DE-ESTUDO

O caso-de-estudo consiste na otimização do sistema construtivo de quatro plantas de uma residência unifamiliar gerada pela ferramenta *SAPTtool*. As plantas apresentam nove divisões com um *hall* de entrada, cozinha, sala-de-estar, um corredor, três quartos, e duas casas de banho. A **Figura 5** ilustra a geometria das plantas geradas e utilizadas para encontrar o sistema construtivo que mais se adequa a cada geometria.

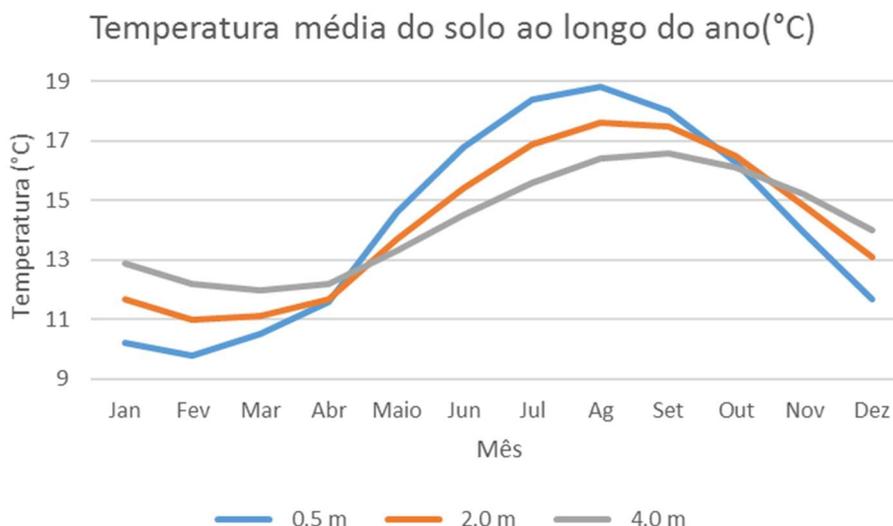


**Figura 5** – Plantas utilizadas no caso-de-estudo.

(a) Planta FPD\_A; (b) Planta FPD\_B; (c) Planta FPD\_C; e, (d) Planta FPD\_D.

Os dados meteorológicos utilizados nas simulações no *EnergyPlus* corresponderam à cidade do Porto, Portugal, obtidos da página de internet do Departamento de Energia dos EUA. De acordo com a informação fornecida pelo ficheiro STATS no *site* do *EnergyPlus*, o Porto possui um clima mediterrâneo, com as quatro estações bem definidas. No Verão, a temperatura média é de 18,8°C atingindo o pico de temperatura na segunda semana de Agosto, atingindo os 32°C. A temperatura mínima de Inverno são os 0°C, apresentando uma média de 10,55°C. A **Figura 6** apresenta a

temperatura do solo para diferentes profundidades ao longo do ano.



**Figura 6** – Variação da temperatura média do solo ao longo do ano para o Porto, a diferentes profundidades.

Cruzando a informação das temperaturas mínimas do solo à superfície e as temperaturas médias tanto no Verão como no Inverno, existe uma tendência para que as necessidades de aquecimento se destaquem em relação as necessidades de arrefecimento. A temperatura média durante o Verão é inferior à temperatura do termostato de projeto. Já no Inverno, uma vez que a temperatura média é bastante inferior à temperatura do termostato para aquecimento, surgirão fortes necessidades de aquecimento, em comparação com as necessidades de aquecimento. A temperatura média do solo durante o Verão pode contribuir para o arrefecimento dos edifícios em estudo.

Foi definido que, para cada planta, a população de indivíduos para cada geração seria composta por 100 indivíduos e o programa iria efetuar 200 ciclos (200 gerações). O processo de pesquisa demorou aproximadamente 4 dias e 12 horas desde a geração das plantas pelo *SAPTool* até à atribuição do resultado da pesquisa do sistema construtivo a cada planta.

Os sistemas construtivos que foram utilizados para popular a base-de-dados foram inspirados nas soluções apresentadas pelo ITE 50 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Santos & Matias, 2006) e na coleção de sistemas construtivos de Jorge Mascarenhas (Mascarenhas, 2003a, 2003b). Aquando da passagem da versão original do *SAPTool*, foi, de igual forma, fornecida uma base-de-dados com algumas soluções construtivas. O maior foco na variabilidade de soluções construtivas foram as paredes exteriores, paredes interiores e cobertura. Nas **Tabela 3** **Tabela 4** e **Tabela 5**, encontram-se as informações referentes às soluções construtivas adicionadas à base de dados neste estudo para parede externa, parede interna e cobertura, respectivamente.



**Tabela 3** - Constituição das soluções de Parede Externa consideradas no processo de otimização

Parede Externa	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		Camada 5		Camada 6	
	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)
<i>BrickDoubleWall</i>	Cal Gesso	0,02	Tijolo Furado 110 mm Tijolo Sólido	0,11	ICB XPS EPS Lã de Rocha Lã de Vidro PUR	0,03/0,04/0,05/0,07/0,08	Caixa de ar	0,03/0,035/0,04/0,045/0,05	Tijolo Furado 150 mm Tijolo Sólido	0,15	Reboco	0,02
<i>ConcreteDoubleWall</i>	Cal Gesso	0,02	Bloco Betão 100 mm Bloco Betão Leve 100 mm	0,1	ICB XPS EPS Lã de Rocha Lã de Vidro PUR	0,03/0,04/0,05/0,07/0,08	Caixa de ar	0,03/0,035/0,04/0,045/0,05	Tijolo Furado 150 mm Tijolo Sólido	0,15	Reboco	0,02
<i>IntInsSingleBrick220mm</i>	Pladúr	0,01	Caixa de ar	0,03/0,04/0,05	ICB XPS EPS Lã de Rocha Lã de Vidro PUR	0,03/0,04/0,05/0,07/0,08	Tijolo Furado 220 mm Tijolo Sólido	0,22	Reboco	0,02		
<i>IntInsSingleConcrete200mm</i>	Pladúr	0,01	Caixa de ar	0,03/0,04/0,05	ICB XPS EPS Lã de Rocha Lã de Vidro PUR	0,03/0,04/0,05/0,07/0,08	Bloco Betão 200 mm Bloco Betão Leve 200 mm	0,2	Reboco	0,02		
<i>IntInsSingleConcrete300mm</i>	Pladúr	0,01	Caixa de ar	0,03/0,04/0,05	ICB XPS EPS Lã de Rocha Lã de Vidro PUR	0,03/0,04/0,05/0,07/0,08	Bloco Betão 300 mm Bloco Betão Leve 300 mm	0,3	Reboco	0,02		
<i>ExtInsSingleBrick220mm</i>	Pladúr	0,01	Tijolo Furado 220 mm Tijolo Sólido	0,22	ICB XPS EPS PUR	0,02/0,03/0,04/0,05/ 0,06/0,07/0,08/0,09/0,1	Reboco	0,02				
<i>ExtInsSingleConcrete200mm</i>	Pladúr	0,01	Bloco Betão 200 mm Bloco Betão Leve 200 mm	0,2	ICB XPS EPS PUR	0,02/0,03/0,04/0,05/ 0,06/0,07/0,08/0,09/0,1	Reboco	0,02				
<i>ExtInsSingleConcrete300mm</i>	Pladúr	0,01	Bloco Betão 300 mm Bloco Betão Leve 300 mm	0,3	ICB XPS EPS PUR	0,02/0,03/0,04/0,05/ 0,06/0,07/0,08/0,09/0,1	Reboco	0,02				

**Tabela 4 - Constituição das soluções de Parede Interna consideradas no processo de otimização**

Parede Interna	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		Camada 5	
	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)
<i>Brick70mmPlastIntWall</i>	Cal Gesso	0,005	Reboco	0,02	Tijolo Furado 70 mm Tijolo Sólido	0,07	Reboco	0,02	Cal Gesso	0,005
<i>Brick110mmPlastIntWall</i>	Cal Gesso	0,005	Reboco	0,02	Tijolo Furado 110 mm Tijolo Sólido	0,11	Reboco	0,02	Cal Gesso	0,005
<i>Concrete100mmPlastIntWall</i>	Cal Gesso	0,005	Reboco	0,02	Bloco Betão 100 mm Bloco Betão Leve 100 mm	0,1	Reboco	0,02	Cal Gesso	0,005
<i>Brick70mmIntWall</i>	Reboco	0,02	Tijolo Furado 70 mm Tijolo Sólido	0,07	Reboco	0,02				
<i>Brick110mmIntWall</i>	Reboco	0,02	Tijolo Furado 110 mm Tijolo Sólido	0,11	Reboco	0,02				
<i>Concrete100mmIntWall</i>	Reboco	0,02	Bloco Betão 100 mm Bloco Betão Leve 100 mm	0,1	Reboco	0,02				
<i>PladurIntWall</i>	Pladúr	0,01	ICB XPS EPS Lã de Rocha Lã de Vidro PUR	0,03/0,04/0,05/0,07/0,08	Pladúr	0,01				

**Tabela 5 - Constituição das soluções de Cobertura consideradas no processo de otimização**

Cobertura	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		Camada 5		Camada 6	
	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)	Material	Espessuras (m)
<i>Inverted Roof</i>	Escória	0,01	Membrana	0,015	ICB XPS EPS Lã de Rocha Lã de Vidro PUR	0,03/0,04/0,05/0,07/0,08	Bloco de Betão 100mm	0,1	Laje Cerâmica 140 mm Laje Cerâmica 340 mm Laje de Betão 340 mm Laje de Betão leve 140 mm Laje de Betão leve 340 mm	0,14 0,34 0,34 0,14 0,34	Pladúr	0,02
<i>Roof U 0,50</i>	Escória	0,01	Membrana	0,015	Isolamento Denso	0,07	Betão de Alta Densidade	0,2	Pladúr	0,02		
<i>Roof U 0,45</i>	Escória	0,01	Membrana	0,015	Isolamento Denso	0,08	Betão de Alta Densidade	0,2	Pladúr	0,02		
<i>Roof U 0,32</i>	Escória	0,01	Membrana	0,015	Isolamento Denso	0,12	Betão de Alta Densidade	0,2	Pladúr	0,02		
<i>Roof U 0,28</i>	Escória	0,01	Membrana	0,015	Isolamento Denso	0,14	Betão de Alta Densidade	0,2	Pladúr	0,02		
<i>Roof U 0,13</i>	Escória	0,01	Membrana	0,015	Isolamento Denso	0,32	Betão de Alta Densidade	0,2	Pladúr	0,02		
<i>Roof U 0,09</i>	Escória	0,01	Membrana	0,015	Isolamento Denso	0,45	Betão de Alta Densidade	0,2	Pladúr	0,02		

É ainda possível consultar no Anexo I, a constituição das soluções de Envidraçados, Piso, Portas e Entrepisos nas tabelas **Anexo I. 1**, **Anexo I. 2**, **Anexo I. 3** e **Anexo I. 4**.

Em relação às soluções de Parede Simples para Paredes Exteriores, é necessário relevar a diferença entre as soluções que apresentam um código inicial de “*IntIns*” e “*ExtIns*”, uma vez que pode não ficar explícito pelo nome a diferença na sua constituição. As soluções de “*IntIns*” apresentam isolamento interior e as soluções de “*ExtIns*” apresentam isolamento exterior. O que define o isolamento interior ou exterior é a sua posição nas camadas em relação à alvenaria da parede. Consideram-se Parede Simples com isolamento interior todas as Paredes Simples da base-de-dados que contenham o isolamento aplicado entre o pano de alvenaria e o interior do edifício, para qualquer um dos diferentes materiais isolantes. Considera-se Parede Simples com isolamento exterior, todas as Paredes Simples da base-de-dados em que o Isolamento seja aplicado entre o pano de alvenaria e o exterior. Aplicam-se as mesmas regras aplicadas às situações de Parede Simples com isolamento interior no que toca a camadas de materiais adicionais.

O Anexo II apresenta as propriedades dos materiais utilizados nas soluções das tabelas que apresentam as soluções de elementos construtivos.

No que toca a resultados esperados podemos fazer a divisão em três pontos principais:

- Minimização das necessidades energéticas globais – espera-se que a variabilidade inicial dos elementos seja mais ou menos uniforme, uma vez que na primeira geração o algoritmo escolhe de forma aleatória, dentro dos sistemas possíveis, para cada um dos indivíduos, demonstrando uma tendência crescente para um dos elementos com o passar das gerações.
- Tendência do coeficiente de transmissão térmica – os resultados esperados para este parâmetro servirão para demonstrar o ponto de viragem da rentabilidade de um coeficiente mais baixo, uma vez que, como se trata de um edifício com ocupação, os ganhos internos vão ser de extrema importância nos consumos anuais de energia, quer para aquecimento quer para arrefecimento.
- Impacto das paredes internas nos consumos energéticos – será realizada a análise deste impacto, uma vez que a massa das paredes internas poderá ter um papel importante na inércia térmica da solução.

Na modelação da simulação dinâmica foi considerado o módulo *HVAC Template ideal loads* aplicado a cada uma das divisões de cada indivíduo e que contem a informação do sistema ideal para fornecer ar condicionado a essa divisão para que a temperatura operativa se encontre entre os limites

18 e 24°C. Juntamente, o módulo *Daylight* calcula os níveis de iluminância durante o dia em cada divisão e é utilizado para adequar a iluminação artificial às necessidades definidas. Considerou-se necessário para uma utilização normal do edifício, iluminação artificial em três horários distintos para as áreas principais da casa: um período de manhã, simulando o acordar e primeira refeição, um período à hora de almoço e um período à hora de jantar e até à meia-noite. Para ambos os pontos, os horários de funcionamento de iluminação artificial, pessoas e equipamentos mantêm-se inalterados. No Anexo III encontram-se as tabelas referentes aos horários de funcionamento de pessoas, equipamentos e iluminação.

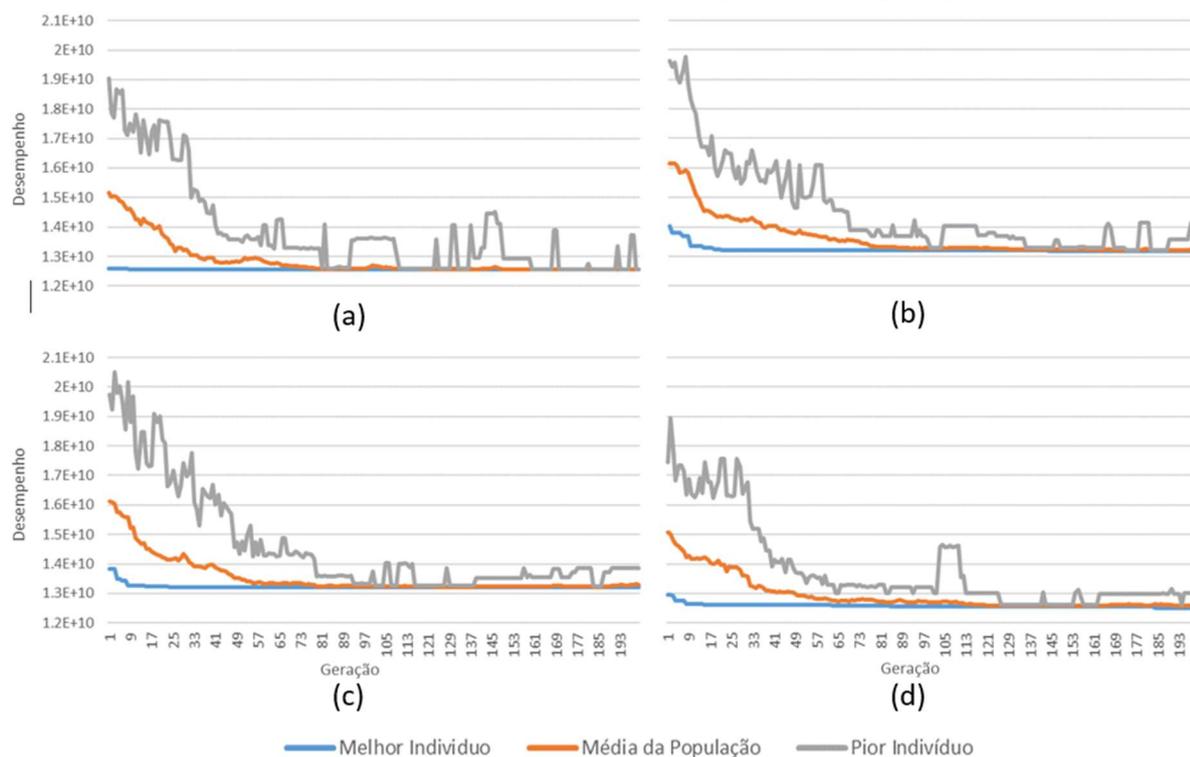
O módulo de otimização do sistema construtivo foi implementado em *Java* e foi utilizado um computador de quatro núcleos do Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto (CDRSP) do Instituto Politécnico de Leiria para realizar o estudo-de-caso.

#### 4.1 Indicadores da evolução do processo de otimização

Para cada uma das plantas foram utilizados indicadores de evolução do processo de otimização, tais como o melhor indivíduo, média e o pior indivíduo da população. O valor é calculado de acordo com a função objetivo que soma o consumo anual de energia útil do edifício para aquecimento, arrefecimento e iluminação. Como se pretende reduzir os consumos energéticos, trata-se de uma minimização.

A **Figura 7** representa a tendência dos indicadores de evolução do processo de otimização ao longo de 200 gerações para as plantas em estudo. Analisando a figura, em todas as plantas, o melhor indivíduo da população decresce com o passar das gerações até chegar a um ponto onde não há mais melhorias. Este ponto varia para todas as plantas. Os indicadores para o pior indivíduo e média da população apresentam um comportamento variável uma vez que a criação de novos indivíduos utiliza os operados de Combinação e Mutação, descritos no capítulo Metodologia do presente trabalho.

## Indicadores de evolução ao longo de 200 gerações



**Figura 7** - Indicadores de evolução ao longo das 200 gerações para as plantas em estudo.

(a) Planta FPD\_A; (b) Planta FPD\_B; (c) Planta FPD\_C; e, (d) Planta FPD\_D.

A **Tabela 6** apresenta as percentagens de melhoria para cada uma das plantas entre o ponto inicial e o resultado final.

**Tabela 6** - Percentagem de melhoria entre extremos de indivíduos para cada planta (kWh/m<sup>2</sup>.ano).

Indivíduo	Melhor Indivíduo Global	Pior Indivíduo Global	% Melhoria	Melhor Indivíduo 1º Geração	% Melhoria
FPD_A	30,86	46,80	51,68	30,98	0,39
FPD_B	32,78	49,69	51,59	33,78	3,50
FPD_C	32,13	48,20	49,99	34,16	6,31
FPD_D	30,10	46,71	55,18	31,47	4,55

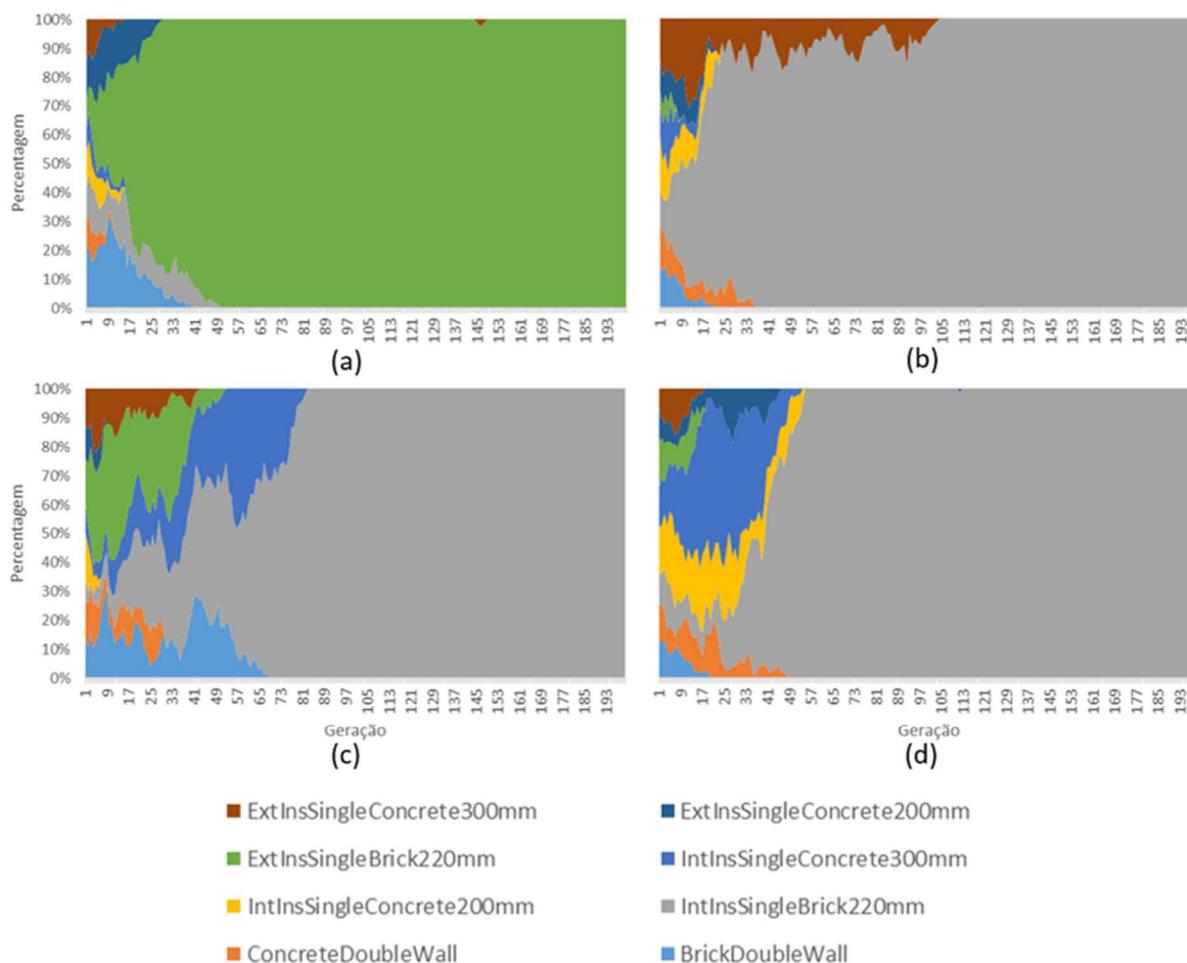
As comparações escolhidas são do melhor indivíduo de todas as gerações (tipicamente o melhor indivíduo da última geração, uma vez que um dos operadores genéticos utilizados é o Elitismo

e que este mesmo garante que o "indivíduo 0" de cada geração é também o melhor) com o melhor indivíduo da primeira geração e o melhor indivíduo de todas as gerações com o pior indivíduo de todas as gerações. A escolha destas duas comparações prende-se ao facto de ser possível justificar as diferenças de melhoria entre a primeira e últimas gerações do indivíduo FPD\_A. Com apenas 0.39% de melhoria seria de fácil afirmação que a relação entre a melhoria e o tempo de computação não seria a melhor. Contudo, quando comparado com o pior resultado global, podemos afirmar que existe uma grande amplitude de resultados já que a melhoria neste caso é de 51,68%. O processo de seleção através da base-de-dados e algoritmo genético processa-se de forma aleatória. Ainda que exista a possibilidade de na primeira geração surgir a melhor solução para cada uma das plantas, a probabilidade do cenário ocorrer é muito baixa devido ao grande número de combinações possíveis incluídas na base-de-dados.

O objetivo da análise da distribuição da evolução das soluções construtivas parte da necessidade da validação da distribuição mais ou menos uniforme de elementos na primeira geração até à tendência para um determinado indivíduo. Note-se que a percentagem na última geração para um elemento não permite a conclusão de que essa é a melhor solução final, uma vez que os métodos de mutação, também validados nesta análise, são aplicados até na última geração. Desta forma, um elemento pode ser invariável ao longo das gerações, sofrer mutação e tornar-se a melhor solução para determinada planta.

A **Figura 8** apresenta a evolução das paredes exteriores para todas as plantas em que FPD\_B, FPD\_C e FPD\_D apresentam a tendência para a mesma solução: IntInsSingleBrick220mm, uma parede simples com alvenaria de tijolo de 220 mm com isolamento interior. A planta FPD\_A, ao contrário das outras plantas, apresenta como tendência a solução ExtInsSingleBrick220mm. O comportamento da evolução da parede exterior para todas as plantas é o esperado, havendo uma distribuição uniforme no começo, fruto da aleatoriedade da primeira geração de indivíduos, e, gradualmente, tendendo para uma solução. A ocorrência de mutação completa do sistema construtivo ocorre em quase todas as plantas, mas depressa são novamente descartadas.

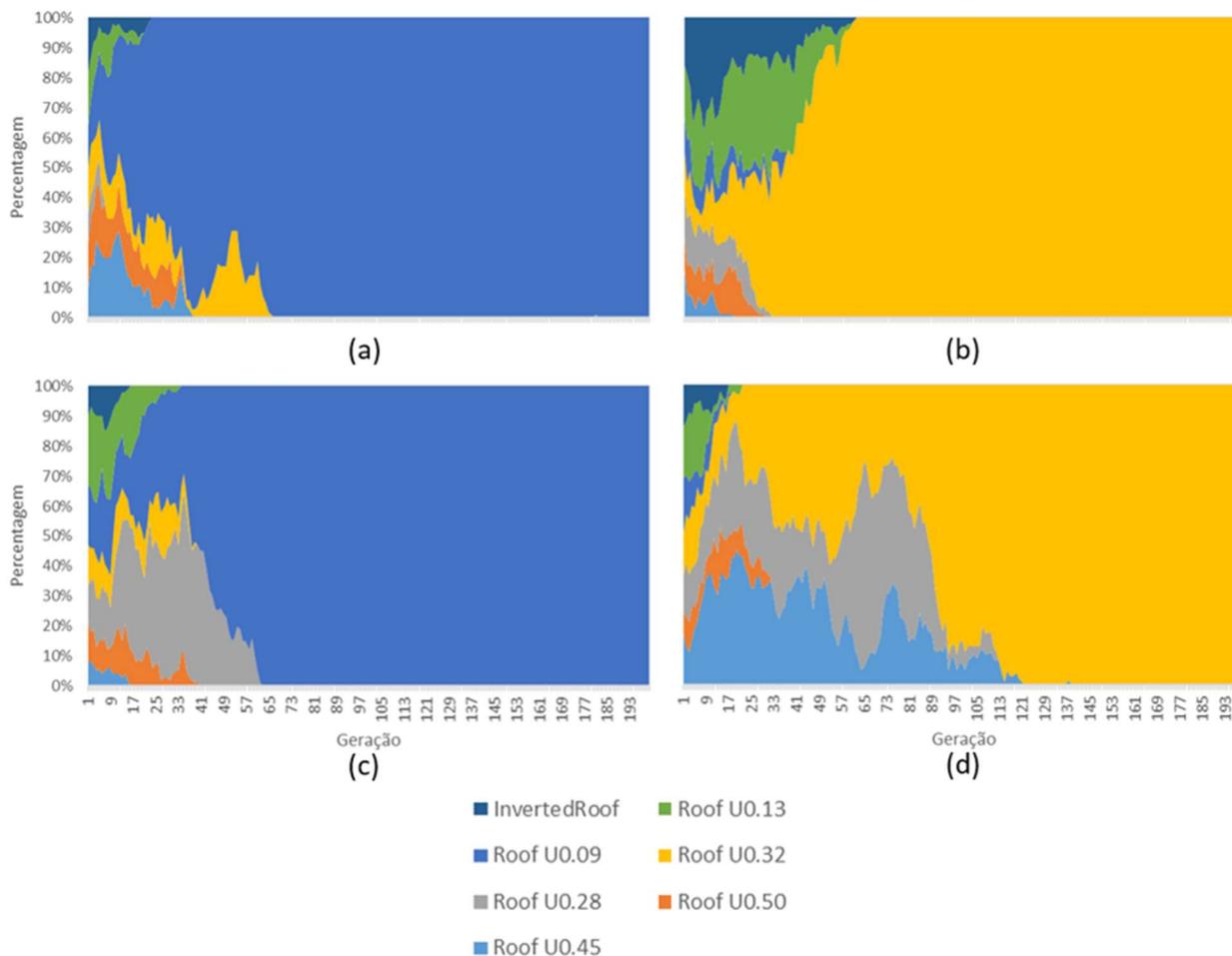
## Evolução da parede externa ao longo de 200 gerações



**Figura 8** - Evolução do sistema construtivo ao longo das gerações para paredes exteriores para as plantas em estudo.  
 (a) Planta FPD\_A; (b) Planta FPD\_B; (c) Planta FPD\_C; e, (d) Planta FPD\_D.

Na **Figura 9**, está representada a evolução das soluções construtivas para a cobertura. As soluções escolhidas foram: Roof U0.09, para as plantas FPD\_A e FPD\_C e Roof U0.32, para as plantas FPD\_B e FPD\_C. Nas plantas FPD\_A, FPD\_B e FPD\_C a tendência para as soluções finais respectivas aparece de forma bastante vincada. O mesmo não se pode afirmar para a planta FPD\_D, em que existe uma variedade de soluções construtivas que existe até meio do processo de otimização.

## Evolução da cobertura ao longo de 200 gerações

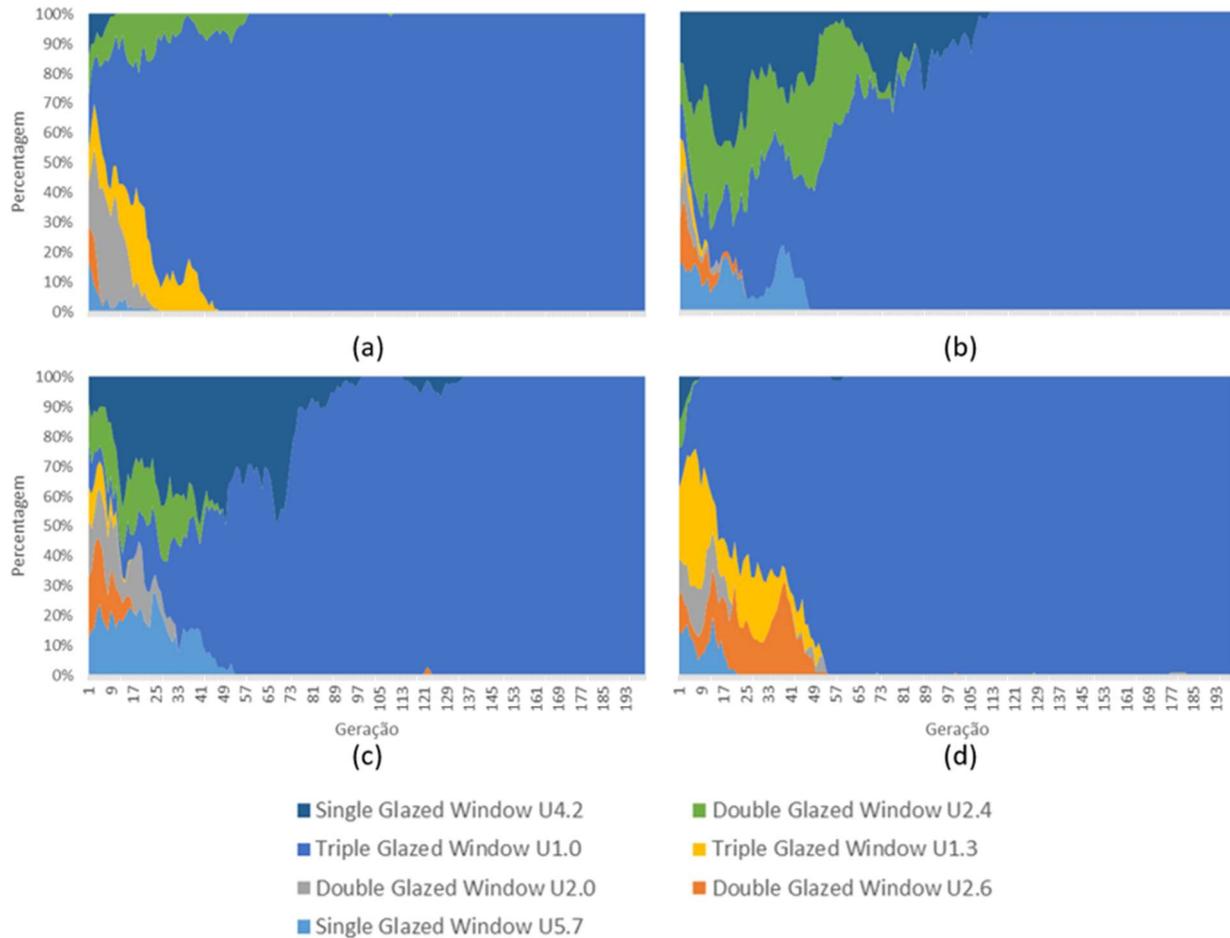


**Figura 9** - Evolução do sistema construtivo ao longo das gerações para coberturas para as plantas em estudo.

(a) Planta FPD\_A; (b) Planta FPD\_B; (c) Planta FPD\_C; e, (d) Planta FPD\_D.

A tendência para as quatro plantas no que toca a envidraçado está representada na **Figura 10** e é a mesma: Triple Glazed Window U1.0, uma solução de vidro triplo. Destaca-se o comportamento da evolução da planta FPD\_C. A solução final apresenta um comportamento mais interessante, existindo desde a primeira geração (bem como todas as outras soluções) mas presente em poucos indivíduos até à geração 20 onde começa a crescer em percentagem até que, por volta da geração 140 se encontra presente em todos os indivíduos.

## Evolução dos envidraçados ao longo de 200 gerações



**Figura 10** - Evolução do sistema construtivo ao longo das gerações para paredes exteriores para as plantas em estudo. (a) Planta FPD\_A; (b) Planta FPD\_B; (c) Planta FPD\_C; e, (d) Planta FPD\_D.

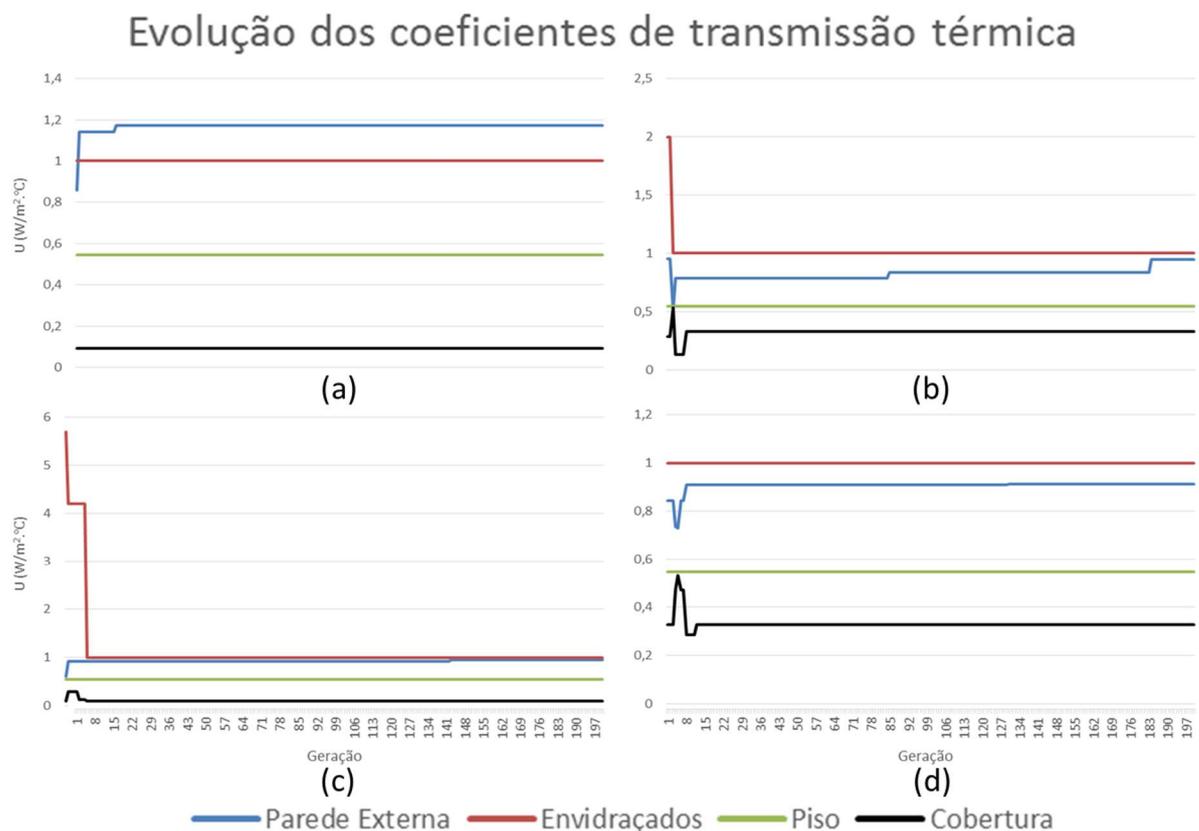
## 4.2 Elementos em contato com o ambiente exterior

Uma das propostas de resultados esperados partia do princípio que o coeficiente de transmissão térmica possuía um ponto de viragem em cada um dos elementos, um limite de compromisso entre perdas e ganhos térmicos.

A definição apresentada pelo REH (*Decreto Lei no 118/2013 de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego, 2013*) nesta matéria refere-se ao coeficiente de transmissão térmica como "(...) a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa."

Numa primeira análise desta definição pode assumir-se que quanto mais baixo for o coeficiente para um determinado elemento, considerando que os outros elementos se mantêm inalterados durante a comparação entre os diferentes coeficientes, melhor será o comportamento térmico do edifício uma vez que as trocas com a envolvente diminuem. Contudo, existem fontes internas que afetam as necessidades energéticas, contribuindo quer para o aumento das necessidades de arrefecimento, quer para uma diminuição das necessidades de aquecimento. Então existe algum fundamento na existência de um ponto de viragem na tendência do coeficiente.

A necessidade da prova deste conceito ocorreu aquando da análise dos coeficientes de transmissão térmica para cada um dos elementos ao longo da simulação. A **Figura 11** demonstra a evolução dos elementos construtivos em contacto com o ambiente exterior (parede exterior, envidraçados e cobertura) e o piso (que se encontra em contacto com o solo).



**Figura 11** - Evolução dos coeficientes de transmissão térmica ao longo das gerações para parede externa, envidraçados piso e cobertura para as plantas em estudo.

(a) Planta FPD\_A; (b) Planta FPD\_B; (c) Planta FPD\_C; e, (d) Planta FPD\_D.

Para todos os indivíduos, a melhor solução de piso é rapidamente encontrada, mantendo-se

constante ao longo de todas as gerações. O mesmo se passa com os envidraçados, em que apenas nos indivíduos FPD\_B e FPD\_C existe variação da melhor solução nas primeiras gerações. O elemento que tende a ter maior variabilidade na solução ao longo das gerações é a parede exterior.

Nos elementos em análise, Paredes Exteriores e Piso, os resultados suscitaram algumas dúvidas, uma vez que após a curva de tendência do consumo médio por geração estabilizar perto da curva de tendência do consumo mínimo (solução ideal), terem surgido através do operador de mutação soluções para cada um destes elementos com coeficientes mais baixos e terem sido descartadas pelo algoritmo.

A **Tabela 7** apresenta, a constituição em detalhe da solução para a Parede Exterior e Piso do indivíduo FPD\_A, onde surgiram as dúvidas após a análise dos resultados, bem como a constituição dos elementos construtivos que surgiram após a estabilização da curva tendência.

**Tabela 7** - Novas espessuras da camada de isolamento para simulação manual e respetivos valores de coeficiente de transmissão térmica.

<b>Parede Exterior</b>			
<b>Camada</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura Solução (m)</b>	<b>Nova Espessura (m)</b>
1	Pladúr	0,1	0,1
2	Tijolo Maciço	0,22	0,22
3	EPS	0,02	0,08
4	Reboco	0,02	0,02
<b>U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>		1,17	0,16
<b>Piso</b>			
<b>Camada</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura Solução (m)</b>	<b>Nova Espessura (m)</b>
1	Betão Denso	0,2	0,2
2	Isolante	0,07	0,26
3	Reboco	0,02	0,02
4	Madeira Densa	0,015	0,015
<b>U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>		0,55	0,16

Em ambos os elementos a alteração dá-se na camada de isolamento térmico, aumentando a espessura e, por consequência, diminuindo o valor do coeficiente de transmissão térmica.

Neste exercício, são comparados os valores dos consumos energéticos para aquecimento e arrefecimento da solução escolhida pelo processo de otimização e a solução com o coeficiente de transmissão mais baixo que surgiu após a estabilização da curva tendência

A **Tabela 8** mostra os valores obtidos a solução do processo de otimização e para as novas soluções em estudo, alterando a camada de isolamento. Numa primeira análise, a tendência comum é diminuir as necessidades de aquecimento (chegando a valores quase nulos nalguns cenários do termóstato de projeto) e aumentar as necessidades de arrefecimento. Isto ocorre porque existe uma menor troca de calor com a envolvente devido ao menor coeficiente de transmissão térmica, o que dificulta a extração natural de calor através destes elementos. Este contexto, causa uma diminuição de perdas, mas aumenta a necessidade de arrefecer devido aos ganhos internos do edifício. A exceção à tendência é a nova solução de piso

**Tabela 8** - Resultados dos consumos anuais para aquecimento e arrefecimento para as soluções propostas.

		Aquecimento (kW-h/m <sup>2</sup> .ano)	Arrefecimento (kW-h/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Therm18°C-24°C</b>	<i>Original</i>	3,98	11,7
	<i>Nova solução Parede Exterior</i>	0,55	15,54
	<i>Nova solução Piso</i>	4,17	16,15
	<i>Ambas as soluções</i>	0,51	22,62

Ao diminuir o fator de transmissão térmica diminuem-se as trocas de calor com o solo. Uma vez que a temperatura do solo considerada para as simulações no EnergyPlus no processo de otimização são 18°C constantes, ao diminuir o fator de transmissão térmica do piso, diminuem-se os ganhos através do solo, causando um aumento nas necessidades energéticas de aquecimento.

Na **Tabela 9**, encontra-se o balanço entre os aumentos e diminuições dos consumos de energia para arrefecimento e aquecimento, calculados entre a solução do processo de otimização e as novas soluções em estudo.

**Tabela 9** - Comparativo entre o resultado escolhido pelo algoritmo e a simulação manual para o termóstato alterado, com o respetivo balanço.

<b>Therm 18°C-24°C</b>	<b>Aquecimento (kW-h/m<sup>2</sup>.°C)</b>	<b>Arrefecimento (kW-h/m<sup>2</sup>.°C)</b>	<b>Balanço (kW-h/m<sup>2</sup>.°C)</b>
<i>Nova solução Parede Exterior</i>	-3,43	+3,38	+0,4
<i>Nova solução Piso</i>	0,19	+4,45	+4,64
<i>Ambas as soluções</i>	-3,47	+10,91	+7,44

Para efeitos de comparação, considera-se que cada kW-h/m<sup>2</sup>.°C, quer seja de aquecimento quer seja de arrefecimento, tem o custo de uma unidade monetária fictícia, desconsiderando a

diferença de custo entre os dois processos.

O balanço é sempre positivo, querendo dizer que não existe vantagem em utilizar os elementos em questão, ainda que o coeficiente de transmissão térmica de ambos seja inferior aos da solução original. O processo de otimização gerou uma solução que, numa primeira análise, permite afirmar que o coeficiente de transmissão térmica possui um ponto de viragem, ponto esse em que a redução das necessidades de aquecimento é suplantada pelas necessidades de arrefecimento, deixando de ser uma solução vantajosa.

### 4.3 Paredes Interiores

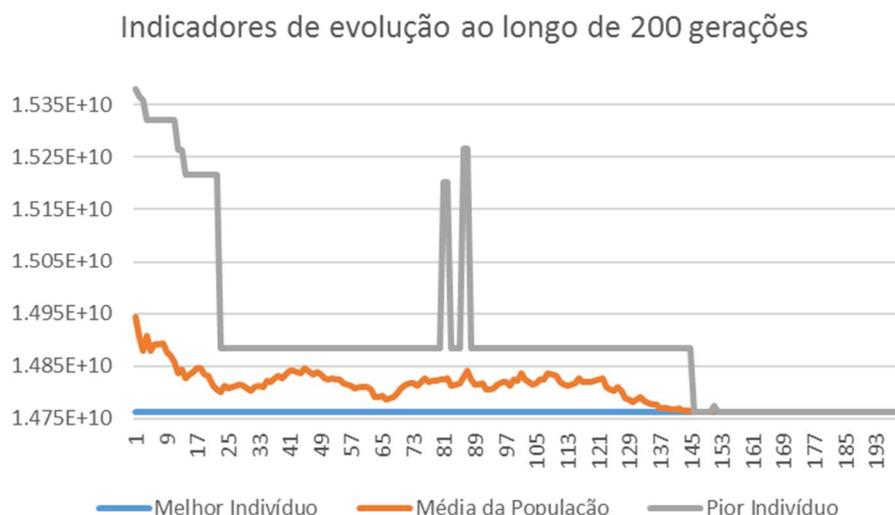
Nos objetos em estudo o contributo das paredes interiores não é considerado de forma direta para as trocas de calor com a envolvente, mas sim pelo seu contributo em relação à inércia térmica do edifício. Por não existirem zonas não aquecidas nos edifícios em estudo, todas as paredes internas são meros separadores entre divisões.

O conceito de inércia térmica de um edifício refere-se à sua capacidade de contrariar as variações de temperatura no seu interior, reduzindo as transferências de calor entre as zonas aquecidas e a envolvente. Tal fenómeno ocorre devido à capacidade dos elementos construtivos armazenarem calor.

A inércia térmica influencia o comportamento do edifício, determinando a capacidade de utilizar os ganhos solares durante os meses de aquecimento e a capacidade de absorver os picos de temperatura nos meses de arrefecimento, influenciando as necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais do edifício em estudo.

Para o estudo da influência da inércia térmica do edifício nos consumos energéticos, quer de aquecimento, quer de arrefecimento, utilizou-se a planta FPD\_D. Procedeu-se à alteração da base-dados, escolhendo-se apenas um solução comum para cada elemento à exceção da solução das paredes interiores, uma vez que este elemento apenas contribui para a inércia térmica do indivíduo. Foram mantidas todas as soluções de parede interior já consideradas no início do caso de estudo.

A **Figura 12** demonstra a tendência da função aptidão ao longo de 200 gerações para uma população de 100 indivíduos. A cidade de escolha foi a mesma da simulação inicial, Porto, Portugal, e a simulação demorou aproximadamente 4 dias e 4 horas.



**Figura 12** - Evolução da aptidão para a simulação das paredes interiores como único elemento alterável na planta FPD\_D

Na simulação em questão a melhor solução foi encontrada na primeira geração, não sofrendo melhorias ao longo das 200 gerações. Apesar disso, dentro das soluções contempladas na base-dados para esta simulação, a variação entre a melhor solução encontrada e a pior solução é de cerca de 4%, correspondendo a uma diferença de energia consumida de 1,4 kW-h/m<sup>2</sup>.ano. Considerando que não se trata de um elemento diretamente responsável pelas trocas de calor com a envolvente, trata-se de uma amplitude significativa, uma vez que comparando com o consumo global anual de energia para a melhor solução para o mesmo edifício após a simulação, corresponde a 4,65% dos 30,1 kW-h/m<sup>2</sup>.ano.

#### 4.4 Comparação do processo de otimização entre 2 termostatos diferentes

Para efeitos de comparação, utilizando os mesmos edifícios que foram utilizados no processo de otimização no caso de estudo, procedeu-se à realização de uma nova otimização, apenas alterando o termostato para o termostato do REH e o número de gerações para 100, em vez das 200 do processo de otimização do caso de estudo. A escolha de reduzir o número de gerações deveu-se ao fato das curvas do indicador de melhor indivíduo não sofrerem melhorias significativas após as 100 gerações. O termostato escolhido tem como temperaturas de referência 20°C para aquecimento e 25°C para arrefecimento.

Considerando que as temperaturas de referência passam de 18°C para 20°C para o aquecimento e de 24°C para 25°C para o arrefecimento, é esperado um aumento nas necessidades de

energia para aquecimento e uma baixa nas necessidades de arrefecimento.

A **Tabela 10** apresenta os resultados das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento para os quatro indivíduos em estudo, bem como um balanço entre os dois termostatos para aquecimento e arrefecimento.

**Tabela 10** – Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento para ambos os termostatos e respetivos balanços.

	Aquecimento			Arrefecimento		
	Therm 18-24	Therm 20-25	Balanço	Therm 18-24	Therm 20-25	Balanço
<b>FPD_A</b>	3,98	0,92	-3,06	11,70	13,84	2,14
<b>FPD_B</b>	4,20	1,06	-3,14	12,75	15,07	2,32
<b>FPD_C</b>	3,00	0,90	-2,10	12,32	15,05	2,73
<b>FPD_D</b>	3,09	0,97	-2,13	12,62	14,87	2,25

Analisando os resultados obtidos, pode afirmar-se que ao contrário das expectativas iniciais, as necessidades de energia para aquecimento diminuíram, enquanto que as necessidades de arrefecimento aumentaram. Contudo, o balanço entre o somatório das necessidades de energia para aquecimento e para arrefecimento para cada indivíduo, sofreu poucas alterações, apresentando uma variação aproximada de  $\pm 1$  kWh/m<sup>2</sup>.ano como demonstrado na **Tabela 11**.

**Tabela 11** – Balanço das necessidades globais de energia para ambos os termostatos.

	Therm 18-24	Therm 20-25	Balanço Global
<b>FPD_A</b>	15,69	14,76	-0,92
<b>FPD_B</b>	16,95	16,13	-0,82
<b>FPD_C</b>	15,32	15,96	0,63
<b>FPD_D</b>	15,71	15,84	0,13

Existe então necessidade de uma análise comparativa aos elementos em contato com o ambiente exterior de cada um dos indivíduos para cada termostato. A **Tabela 12** apresenta os valores dos coeficientes térmicos para os elementos em contato com o ambiente exterior para cada indivíduo para ambos os termostatos.

**Tabela 12** – Coeficientes de transmissão térmica para os elementos em contato com o ambiente exterior para cada indivíduo em ambos os termostatos.

U (W/m <sup>2</sup> .°C)	FPD_A		FPD_B		FPD_C		FPD_D	
	Therm 18 - 24	Therm 20 - 25						
<b>Parede Externa</b>	1,17	0,55	0,95	0,67	0,95	0,49	0,91	0,71
<b>Envidraçados</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Cobertura</b>	0,09	0,09	0,33	0,09	0,09	0,09	0,33	0,09
<b>Piso</b>	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55

Analisando a **Tabela 12**, em todos os indivíduos para ambos os termostatos, tanto as soluções para envidraçados como as soluções de piso se mantêm iguais. Para todos os indivíduos, a tendência é a mesma, diminuindo as necessidades de energia para aquecimento e aumentando as necessidades de energia para arrefecimento, justificável pela redução dos coeficientes de transmissão térmica nas soluções de parede externa em todas as soluções e pela redução dos coeficientes de transmissão térmica nas soluções de cobertura para os indivíduos FPD\_B e FPD\_D.

Uma vez que existe esta alteração, é justificável a contradição entre os resultados esperados e os resultados obtidos através do processo de otimização com os novos valores de termostato. Uma vez que não existem elementos em contato com o ambiente exterior com coeficientes de transmissão térmica maiores que os da primeira otimização, baixando alguns dos coeficientes em múltiplos elementos resulta de uma menor troca de calor com o exterior, causando uma diminuição das necessidades de energia para aquecimento e um aumento das necessidades de arrefecimento.

As necessidades de energia para aquecimento apresentam valores quase nulos, contraditoriamente ao esperado na introdução do clima do Porto. Este facto pode dever-se às fontes internas projetadas e a um processo de otimização que não apresenta preferência pela minimização de nenhuma das necessidades de energia, considerando-as como globais atribuindo o mesmo peso, quer as necessidades de energia para aquecimento, quer as necessidades de energia para arrefecimento.

Ainda que não esteja enquadrado nos objetivos deste trabalho, uma vez que o termostato utilizado para o processo de otimização de comparação utiliza os valores do REH, foi feita a verificação dos coeficientes de transmissão térmica para cada um dos elementos.

Para que pudesse ser verificado a conformidade dos coeficientes de acordo com o REH, é preciso determinar o zoneamento climático para a cidade do Porto, cidade utilizada para as simulações. Segundo o Despacho n.º 15793-F/2013 (*Despacho (extrato) no 15793-F/2013 de 3 de Dezembro do Ministério da Economia e do Emprego, 2013*), que complementa o REH, o Porto é considerado I1. Para um clima I1, a **Tabela 13**, apresenta os valores limite e os valores de referência

para os coeficientes de transmissão térmica, publicados na Portaria n.º 349-B/2013 de 29 de novembro (*Portaria no 349-B/2013 de 29 de Novembro do Ministério da Economia e do Emprego, 2013*).

**Tabela 13** – Valores máximos e de referência para os coeficientes de transmissão térmica para uma zona II.

U (W/m <sup>2</sup> .°C)	Elementos em contato com o solo	Elementos Verticais	Elementos Horizontais	Envidraçados
<i>Referência</i>	0,5	0,5	0,4	2,9
<i>Máximo</i>		1,75	1,25	

Todos os elementos construtivos propostos como soluções através do processo de otimização, quer para o termostato inicial de projeto quer para o termostato segundo a metodologia do REH, apresentam valores entre os valores máximos e os valores de referência com exceção das coberturas que apresentam valores inferiores aos valores de referência. Estes resultados comprometem uma possível introdução do REH como mecanismo de avaliação dos indivíduos no processo de otimização através de um sistema de penalizações, substituindo a atual simulação dinâmica do EnergyPlus. Uma possível abordagem a incluir será um método de avaliação que, em vez de prejudicar os indivíduos que contenham elementos que não possuam coeficientes de transmissão térmica com valores inferiores aos valores máximos admitidos, é atribuída pontuação consoante a sua proximidade aos valores de referência.

# CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta com base num algoritmo genético para a otimização de um sistema construtivo, com recurso a uma base de dados para escolha das soluções para cada um dos elementos construtivos.

O uso de algoritmos genéticos associado a problemas de otimização demonstra-se muito mais eficaz que uma pesquisa exaustiva. Mesmo simplificando o número de soluções, removendo soluções que contribuam para alterações significativas ao comportamento térmico de um edifício, é possível através deste método, passar de um processo que podia levar semanas a um processo de apenas alguns dias.

A combinação entre todas as soluções da base-de-dados e aproximadamente 5 dias de processo de otimização correspondeu a uma melhoria de 0,39%, 3,50%, 6,31% e 4,55% para as plantas FPD\_A, FPD\_B, FPD\_C e FPD\_D, respetivamente.

É de notar que o facto de o algoritmo ser completamente aleatório na primeira geração e conter alguns elementos de aleatoriedade nos operadores genéticos, pode contribuir para uma otimização pouco eficaz. Por pouco eficaz entende-se que a melhor solução pode aparecer na primeira geração, significando que o gráfico da função tendência pode ser do tipo  $y = c$  (considerando  $c$  como um valor constante). Contudo, trata-se de casos pontuais.

Focando o coeficiente de transmissão térmica como indicador de análise e como demonstrado na discussão de resultados, fatores mais baixos não se demonstraram melhores para algumas das soluções, uma vez que diminuía as necessidades de aquecimento a troco do aumento das necessidades de arrefecimento.

Utilizando o termostato proposto pela metodologia do REH, todas as soluções de elementos construtivos apresentam coeficientes de transmissão térmica com valores compreendidos entre os valores de referência e os valores máximos admitidos para o tipo de clima considerado pelo regulamento para a cidade em estudo neste trabalho, Porto.. Os resultados esperados com a alteração do termostato não corresponderam aos resultados finais, uma vez que era expectável, aumentado as temperaturas limite para aquecimento e arrefecimento, que as necessidades de energia para aquecimento subissem enquanto que as necessidades de arrefecimento descessem. Os resultados obtidos demonstram a capacidade do algoritmo desenvolvido para se adaptar a diferentes termostatos.

Poderá existir espaço para otimizações no código, uma vez que o tempo de processamento dos métodos do algoritmo corresponde a cerca de 25% do tempo total do processo de otimização.

Uma das propostas para continuação deste trabalho parte pela aplicação de um problema com múltiplos critérios de avaliação, uma vez que o presente trabalho apenas tem em conta a simulação

dinâmica pelo *EnergyPlus*. Um dos aspetos passíveis de incluir é a inclusão de critérios de custo de construção e custo de consumo energético. Uma vez que existe, através da simulação dinâmica, conhecimento sobre o consumo energético, é possível calcular o custo sobre essa energia. Neste momento, a base-de-dados não contempla informação sobre o custo dos materiais. Acrescentando essa informação, realizando o somatório do custo de consumo energético e custo de construção, será possível avaliar qual a melhor solução duma perspetiva económica.

De relembrar que este programa ainda que recorrendo a processamento, acaba por ser um processo moroso, mas que se prova mais rápido e com soluções mais abrangentes que o processo manual de projeto de edifícios. Uma das propostas para a redução do tempo de processamento do processo de otimização é a aplicação da metodologia do REH em vez da utilização de um programa de simulação externo. Contudo, esta solução limita a utilização do programa de otimização de sistemas construtivos ao território nacional português.

A aplicação dos fundamentos do REH traz consigo a possibilidade de obter soluções mais otimizadas com a introdução de um sistema de premiação que tenha em conta a proximidade dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos aos valores de referência apresentados.

## BIBLIOGRAFIA

- Asadi, E., Da Silva, M.G., Antunes, C.H. & Dias, L. (2012) Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*. [Online] 44 (1), 81–87. Available from: doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.016.
- Bolattürk, A. (2006) Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Applied Thermal Engineering*. [Online] 26 (11–12), 1301–1309. Available from: doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019.
- Castro-Lacouture, D., Sefair, J.A., Flórez, L. & Medaglia, A.L. (2009) Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia. *Building and Environment*. [Online] 44 (6), 1162–1170. Available from: doi:10.1016/j.buildenv.2008.08.009.
- Chantrelle, F.P., Lahmidi, H., Keilholz, W., Mankibi, M. El, et al. (2011) Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*. [Online] 88 (4), 1386–1394. Available from: doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.002.
- Council, U.S.G.B. (n.d.) *LEED - Green Building Rating System*.
- Decreto-lei no 118/2013 de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República: I série, No 159 (2013). Disponível em [www.reh.pt](http://www.reh.pt).
- Portaria no 349-B/2013 de 29 de Novembro do Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República: I série, No 232 (2013). Disponível em [www.adene.pt/sce/legislacao-0](http://www.adene.pt/sce/legislacao-0)
- Despacho (extrato) no 15793-F/2013 de 3 de Dezembro do Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República: II série, No 234 (2013). Disponível em [www.adene.pt/sce/legislacao-0](http://www.adene.pt/sce/legislacao-0)
- Holland, J.H. (1984) Genetic Algorithms and Adaptation. *Adaptive Control of Ill-Defined Systems*. [Online] 1317–333. Available from: doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Mascarenhas, J. (2003a) *Sistemas de Construção - Volume II - Paredes: Paredes Exteriores (1ª Parte)*. 2ª Edição. Lisboa, Livros Horizonte, LDA.
- Mascarenhas, J. (2003b) *Sistemas de Construção - Volume III - Paredes (2ª Parte) e Materiais Básicos (1ª Parte)*. 2ª Edição. Lisboa, Livros Horizonte, LDA.
- 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*. [Online] 35482–498. Available from: doi: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*. [Online] 45 (5), 887–897. Available from:

doi: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*. [Online] 45 (5), 898–910. Available from: doi: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*. [Online] 81170–181. Available from: doi: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*. [Online] 132200–215. Available from: doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.068.
- Santos, C.A.P. dos & Matias, L. (2006) *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. 1ª Edição. LNEC (ed.). Lisboa.
- Shi, X. (2011) Design optimization of insulation usage and space conditioning load using energy simulation and genetic algorithm. *Energy*. [Online] 36 (3), 1659–1667. Available from: doi:10.1016/j.energy.2010.12.064.
- Thormark, C. (2006) The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment*. [Online] 41 (8), 1019–1026. Available from: doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.026.
- Tuhus-Dubrow, D. & Krarti, M. (2010) Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*. [Online] 45 (7), 1574–1581. Available from: doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.005.