

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**IMPLEMENTAÇÃO DE PERMUTADOR DE CALOR SOLO-  
AR (EAHE) PARA MELHORAR O CONFORTO TÉRMICO DE  
EDIFICAÇÕES**

**BRUNO GARCIA SANTANA  
MATEUS EDUARDO SANTOS RIBEIRO**

**BRASÍLIA / DF: JULHO / 2019**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**IMPLEMENTAÇÃO DE PERMUTADOR DE CALOR SOLO-  
AR (EAHE) PARA MELHORAR O CONFORTO TÉRMICO DE  
EDIFICAÇÕES**

**BRUNO GARCIA SANTANA**  
**MATEUS EDUARDO SANTOS RIBEIRO**

**ORIENTADOR: EVANGELOS DIMITRIOS CHRISTAKOU**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**BRASÍLIA / DF: JULHO / 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**IMPLEMENTAÇÃO DE PERMUTADOR DE CALOR SOLO-  
AR (EAHE) PARA MELHORAR O CONFORTO TÉRMICO DE  
EDIFICAÇÕES**

**BRUNO GARCIA SANTANA  
MATEUS EDUARDO SANTOS RIBEIRO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

**APROVADA POR:**

---

**Prof. EVANGELOS DIMITRIOS CHRISTAKOU, D. Sc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**Prof. LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO INOJOSA, M. Sc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**Arq. GUILHERME MEUREN , Esp.  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 10 de Julho de 2019.**



## RESUMO

Este trabalho surgiu do interesse de otimização do desempenho energético de edificações destinadas ao ensino, com enfoque no conforto térmico dos usuários, utilizando para esse fim, soluções sustentáveis dos pontos de vista ambiental e econômico como as que utilizam a energia disponível da terra (energia geotérmica). Inicialmente foi realizada uma revisão teórica acerca dos aspectos que influenciam o desempenho térmico das edificações, dentre eles, variáveis climáticas, variáveis arquitetônicas, zoneamento bioclimático e variáveis de conforto térmico. Na segunda parte da revisão teórica foram abordados os conceitos que dão suporte ao estudo dos sistemas de ventilação geotérmica, como inércia térmica, tipos de energia geotérmica, histórico do uso de permutadores de calor solo-ar, configurações existentes, princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens desse sistema e uma breve revisão sobre os estudos de modelagem e desempenho realizados até o presente momento. Por fim, é sugerida uma metodologia que emprega o software mais difundido em estudos de simulação energética e recomendado pela norma NBR 15575-2013, o *EnergyPlus*, juntamente com a interface gráfica *DesignBuilder*. com uma previsão de quais os parâmetros de entrada desses softwares que permitirão a avaliação de desempenho térmico e a quantificação da eficácia da solução de climatização passiva adotada. Espera-se, portanto, que a solução de permutadores de calor solo-ar forneça à edificações estudadas, uma diminuição da temperatura média dos ambientes nos períodos mais desfavoráveis do ano acarretando em menor uso de climatizador ativo (ar-condicionado) e que a sensação de conforto térmico dos usuários alcancem valores próximos aos satisfatórios. Para isso, serão feitas simulações da utilização do permutador de calor solo-ar no Pavilhão João Calmon, edificação com salas de aula do campus Darcy Ribeiro da UnB, e em uma habitação unifamiliar fazendo uso dos softwares citados.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVOS .....	11
2.1 OBJETIVO GERAL .....	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A EDIFICAÇÕES .....	12
3.1.1 ARQUITETURA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	13
3.1.2 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS .....	14
3.1.2.1 RADIAÇÃO SOLAR .....	14
3.1.2.2 TEMPERATURA .....	15
3.1.2.3 VENTO .....	15
3.1.2.4 UMIDADE.....	16
3.2 ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO .....	16
3.3 CONFORTO TÉRMICO .....	19
3.3.1 VARIÁVEIS DE CONFORTO TÉRMICO .....	19
3.3.2 ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO.....	20
3.3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS .....	21
3.4 VENTILAÇÃO NATURAL .....	23
3.5 INÉRCIA TÉRMICA.....	26
3.6 ENERGIA GEOTÉRMICA .....	27
3.7 PERMUTADORES DE CALOR SOLO-AR ( <i>EAHE</i> ).....	28
3.7.1. SOLUÇÕES EXISTENTES.....	30
3.7.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	32
3.7.3. MODELOS DE COMPORTAMENTO E DESEMPENHO DOS <i>EAHE</i> .....	34
3.7.4. SOFTWARES E PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	36
4. METODOLOGIA .....	40
4.1. ARQUIVO CLIMÁTICO .....	41
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	41
4.3. SIMULAÇÕES COM PERMUTADORES DE CALOR (PJC).....	42
4.4. SIMULAÇÕES COM PERMUTADORES DE CALOR (HABITAÇÃO).....	43
5. MODELAGEM DOS DOIS EDIFÍCIOS ESTUDADOS .....	45
5.1. EDIFICAÇÃO EDUCACIONAL - PAVILHÃO JOÃO CALMON .....	45

5.1.1.	ARQUITETURA.....	47
5.1.2.	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS .....	47
5.1.3.	OCUPAÇÃO E ILUMINAÇÃO .....	50
5.2.	HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL .....	51
5.2.1.	ARQUITETURA.....	52
5.2.2.	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS .....	52
5.2.3.	OCUPAÇÃO E ILUMINAÇÃO .....	54
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
6.1.	TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR ( <i>ACH</i> ).....	56
6.2.	COMPRIMENTO DO TUBO.....	58
6.3.	PROFUNDIDADE DO TUBO ENTERRADO .....	60
6.4.	DIÂMETRO DO TUBO .....	61
6.5.	MATERIAL DO TUBO.....	63
6.6.	COBERTURA DO SOLO .....	64
6.7.	ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DOS <i>EAHE</i> .....	65
7.	CONCLUSÕES .....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70
	ANEXO - DADOS CLIMÁTICOS DE BRASÍLIA.....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Selo PROCEL/INMETRO. DUSOLENGENHARIA(2018) .....	12
Figura 2- Etiqueta de cores PROCEL/INMETRO. DUSOLENGENHARIA (2018).....	13
Figura 3- Climas do Brasil. (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).....	16
Figura 4- Zoneamento bioclimático brasileiro. ABNT NBR 15220-3 (2005).....	17
Figura 5- Relação entre PMV e PPD. (LabEEE) .....	20
Figura 6- Carta psicrométrica. (LAMBERTS; DUTRA ; PEREIRA, 2014).....	21
Figura 7- Psicrômetro Giratório. LOGISMARKET(2018).....	22
Figura 8- Termômetro de Globo Digital. HIGHMED(2018).....	22
Figura 9- Anemômetro de palhetas giratórias. NEI(2018).....	22
Figura 10 - Perda de calor usando a vegetação como barreira. (LAMBERTS, 2014, p.181). 25	
Figura 11 - Fenômeno do abatimento da temperatura e atraso do fluxo de calor. (SAIGE,2018). .....	27
Figura 12- Princípio de funcionamento dos EAHE. Diversifiedpiping (2018).....	28
Figura 13- Filtro de entrada de um EAHE. (REHAU. 2018).....	29
Figura 14- Funcionamento de um qanat. Site: WonderfulEngineering (2018).....	30
Figura 15- Sistema EAHE aberto, (BISONYA et al., 2014).....	31
Figura 16- Sistema EAHE fechado, (BISONYA et al., 2014).....	31
Figura 17- Configurações das instalações. SOUSA,M (2014).....	32
Figura 18- Interface do programa DesignBuilder. GHIASSI (2013).....	37
Figura 19- Interface do programa Calcsoilsurftemp. PINTO (2014).....	38
Figura 20- Interface do módulo ZoneEarthtube do EnergyPlus. PINTO (2014).....	39
Figura 21- Perfil de condutividade térmica para o solo de Brasília. SOUSA JÚNIOR (2017). .....	42
Figura 22 – Modelagem do Pavilhão João Calmon. ....	45
Figura 23 – Modelagem da residência unifamiliar.....	45
Figura 24 – Pavilhão João Calmon. GoogleMaps.....	46
Figura 25- Planta do Pavilhão João Calmon. CEPLAN.....	47
Figura 26 - Configuração de paredes internas em alvenaria do Pavilhão João Calmon. ....	48
Figura 27 - Configuração de teto do Pavilhão João Calmon.....	48
Figura 28- Configuração de piso do Pavilhão João Calmon. ....	49
Figura 29 - Configuração de paredes metálicas do Pavilhão João Calmon. ....	49
Figura 30 - Configuração da lateral do Pavilhão João Calmon em vidro e brise metálico .....	50
Figura 31 – Modelagem do brise metálico com as medidas realizadas .....	50
Figura 32 – Divisão do edifício segundo zonas e ocupação .....	51
Figura 33- Planta baixa da habitação. (OLIVEIRA, 2012).....	52
Figura 34 - Configuração de paredes em alvenaria da habitação.....	53
Figura 35 - Configuração de teto da habitação. ....	53
Figura 36- Configuração de piso da habitação.....	53
Figura 37 – Divisão da residência conforme os cômodos.....	54
Figura 38 – Aumento do número de horas de conforto nas zonas térmicas do PJC .....	55
Figura 39 – Aumento do número de horas de conforto nas zonas térmicas da habitação .....	55
Figura 40 – Influência da taxa de renovação de ar na temperatura operativa das salas 1 do PJC .....	56
Figura 41 – Influência da taxa de renovação de ar na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação.....	57
Figura 42 – Influência do comprimento da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC .....	58

Figura 43 – Influência do comprimento da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação.....	59
Figura 44 – Influência da profundidade da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC .....	60
Figura 45 – Influência da profundidade da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação.....	60
Figura 46 – Influência do diâmetro da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC .....	61
Figura 47 – Influência do diâmetro da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação.....	62
Figura 48 – Influência do material da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC .....	63
Figura 49 – Influência do material da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação.....	63
Figura 50 – Influência da cobertura do solo na temperatura operativa das salas 1 do PJC .....	64
Figura 51 – Influência da cobertura do solo na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação.....	64
Figura 52 – Índices de conforto térmico (PMV). Salas do Pavilhão João Calmon.....	66
Figura 53 – Índices de conforto térmico (PMV). Zonas da Habitação. ....	67
Figura 54- Temperatura e conforto. PROJETEEE (2018). ....	74
Figura 55- Rosa dos ventos. PROJETEEE (2018). ....	74
Figura 56- Rosa dos ventos (noite). PROJETEEE (2018) .....	75
Figura 57- Rosa dos ventos (dia). PROJETEEE (2018) .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Diretrizes construtivas (LAMBERTS, 2014, p.99).....	18
Tabela 2- Coeficientes k e a para o cálculo de ventilação natural. (LAMBERTS et Al., 2014, p.175).....	23
Tabela 3- Diferença entre coeficientes de pressão do vento em casas com campo aberto. (LAMBERTS et Al., 2014, p.176) .....	24
Tabela 4- Coeficiente de pressão do vento para loteamentos. (LAMBERTS et Al., 2014). ...	24
Tabela 5- Ventilação mínima necessária em ambientes. (LAMBERTS et Al., 2014).....	25
Tabela 6- Parâmetros de entrada do CalcSurfSoilTemp. (SOUSA, É., 2014). ....	38
Tabela 7 - Parâmetros térmicos do solo do software EnergyPlus. (GONZALES, 2017). ....	42
Tabela 8 - Parâmetros das simulações com tubos enterrados. PJC .....	43
Tabela 9 - Parâmetros das simulações com tubos enterrados. Habitação .....	44
Tabela 10 - Parâmetros dos EAHE após análise paramétrica .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda pela redução do gasto energético mundial está aumentando conforme os anos passam. Esse aumento está relacionado principalmente com os aspectos relacionados à sustentabilidade e a economia.

Quanto mais a população mundial aumenta (hoje já se encontra nos patamares dos 7,6 bilhões de habitantes, segundo a ONU), mais aumenta o uso dos recursos naturais do planeta, porém existe uma quantidade finita de recursos. Por esse motivo faz-se necessário à redução da utilização dos recursos naturais não renováveis, e diminuição no uso da energia decorrente destes recursos.

Existem dois vieses principais quanto se trata deste assunto: o primeiro ponto de vista é o econômico, sabe-se que a utilização de energia tem um custo elevado, sendo o recurso de maior gasto de várias empresas. Por isso, medidas que realizam a redução no gasto de energia de empresas e afins são sempre bem-vindas.

Paralelamente aos aspectos econômicos, tem-se a questão do conforto ambiental em edificações. O conforto ambiental está diretamente relacionado ao bem-estar do indivíduo e, além disso, ele sempre possui o objetivo de ser otimizado quando aplicado em edificações.

Tendo como base esses fatores, foi criado o conceito de Eficiência Energética, que, quando aplicado a edificações, tem como principal meta otimizar o conforto ambiental fazendo o uso da menor quantidade possível de energia. A eficiência energética pode ser avaliada sob vários pontos de vista, mas neste trabalho será avaliada sob o ponto de vista térmico.

Atualmente no Brasil, os meios mais utilizados em edificações para se atingir os parâmetros de conforto térmico são ares-condicionados e ventiladores, são, portanto, meios ativos, que fazem utilização de energia elétrica e reduzem a eficiência energética da edificação.

Existem meios passivos de se fazer com que a superestrutura consiga obedecer aos parâmetros de conforto térmico. Neste trabalho será realizado o estudo de como se utilizar da energia geotermal, por meio da utilização do Permutador de Calor-Solo-Ar (EAHE), para aumentar a eficiência energética do imóvel sem que haja comprometimento de seu conforto térmico.

Para isso, foi escolhido o Pavilhão João Calmon, edificação da UnB, e uma habitação unifamiliar como objeto de estudo para aplicação desse método. A NBR 15575:2013 sugere como ferramenta computacional de simulação o programa *EnergyPlus*, e a interface utilizada será o *DesignBuilder*.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Como objetivo principal deste trabalho propõe-se utilizar a energia geotermal para auxiliar no resfriamento e para melhorar o conforto térmico e a eficiência energética das salas de aulas do pavilhão João Calmon da Universidade de Brasília e em uma habitação unifamiliar.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Estudo e aplicação de ferramentas computacionais de simulação no conforto térmico;
- b) Estudo e aplicação de simulação computacional de tecnologias alternativas para edificações;
- c) Propor soluções energeticamente mais eficientes decorrentes da estimativa de conforto ambiental.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são apresentados conceitos que dão base para o estudo do tema de desempenho energético e térmico de edificações. São apresentados também os aspectos envolvidos no estudo de uma solução de ventilação geotérmica, e a proposta de um processo de simulação para verificar a eficiência dessa solução.

#### 3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A EDIFICAÇÕES

A eficiência energética, de forma geral, pode ser entendida como um conceito que tem como objetivo conseguir a realização de determinada tarefa com a utilização da menor quantidade de energia possível. No caso de edificações, esse objetivo é de atingir os parâmetros de conforto ambiental utilizando-se baixas quantidades de energia.

Várias são as atitudes, tomadas pela sociedade e agências reguladoras envolvidas, para a economia de energia em edificações: utilização de equipamentos térmicos mais eficientes, campanhas de conscientização da população e análises sobre desempenho energético que devem ser aplicados ainda na fase de projeto do empreendimento.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) faz investimentos em campanhas para conscientizar as pessoas sobre o desperdício de energia. Duas das mais conhecidas foram o lançamento do selo de eficiência energética e a etiqueta de cores. O selo de eficiência indica que determinado eletrodoméstico possui eficiência energética superior se comparado a algum similar. A etiqueta de cores, que foi feita em parceria com o INMETRO, classifica os eletrodomésticos numa escala de “A” a “E”, sendo que, quanto mais próximos da classificação “A”, mais econômicos são os aparelhos.



Figura 1- Selo PROCEL/INMETRO. DUSOLENGENHARIA(2018)



Figura 2- Etiqueta de cores PROCEL/INMETRO. DUSOLENGENHARIA (2018)

### 3.1.1 ARQUITETURA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O projeto arquitetônico deve ter como uma de suas bases a análise do futuro desempenho energético do edifício. Isso é necessário pois as decisões feitas na fase de projeto influenciarão a eficiência energética do empreendimento por toda sua vida. Portanto, é necessário a aplicação dos vários conceitos que cercam o tema de eficiência energética e de conforto ambiental.

O arquiteto deve fazer o estudo do clima do local onde será construído o imóvel e aplicar métodos de uso da luz natural e de regulação térmica passiva de ambientes. O projeto também pode incluir a utilização de fontes alternativas de energia, como a solar. Estas ideias devem ser levadas em consideração desde o plano de necessidades.

Os materiais que são usados na construção também geram grande impacto sobre as condições de conforto ambiental, e por consequência, na eficiência energética. A especificação dos materiais deve ser feita a fim de se evitar ganhos térmicos excessivos e obter melhorias nas condições de conforto interiores. Esta é uma atividade que deve ser feita pelo arquiteto em conjunto com os engenheiros logo nas etapas iniciais de projeto.

Para conseguir extrair um excelente desempenho energético da edificação, é necessário o conhecimento das variáveis climáticas, além do conhecimento acerca do conforto ambiental.

O arquiteto deve ter uma ideia sobre o comportamento das variáveis climáticas do local do projeto ao longo do ano. Desta forma poderá calçar-se de dados suficientes para identificar

os períodos de maior probabilidade de desconforto e, conseqüentemente, onde se faz importante sua intervenção no projeto. (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

### **3.1.2 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS**

Uma das bases do programa de necessidades para o projeto arquitetônico é o conhecimento do clima da região, por isso o projetista deve ter ciência desse. Um bom projeto de arquitetura deve compatibilizar o desempenho energético da edificação com as demandas de conforto do usuário e com o clima da área.

As variáveis climáticas são medidas nas estações meteorológicas que fornecem os dados da região no que diz respeito a sol, chuva, temperatura, ventos etc. O Ano Climático de referência (*TRY – Test Reference Year*) deve ser usado para a captação de dados referentes ao clima do local, porém os dados climáticos mais usados no Brasil são as normais climatológicas, devido as poucas cidades que apresentam dados fornecidos pelo *TRY*. As normais climatológicas servem satisfatoriamente a uma análise climática de várias localidades brasileiras.

#### **3.1.2.1 RADIAÇÃO SOLAR**

O Sol é a principal fonte de energia da Terra, sendo ela a principal influente nos ganhos térmicos de edifícios. Portanto, tem elevada relevância no estudo da eficiência energética de edificações. A incidência da luz solar no planeta não ocorre de forma uniforme, por isso existem vários tipos de clima ao redor do globo, pois as regiões foram se adaptando a quantidade de energia solar que recebiam. Essa irregularidade na distribuição da luz solar é causada pela inclinação ( $23^{\circ} 27'$ ) da Terra em relação ao plano do equador.

As medidas de radiação solar são a altura solar e o azimute solar, e a partir delas pode-se determinar a parcela de radiação direta (atinge diretamente a Terra) e a de radiação difusa (sofre espalhamento devido as partículas que estão na atmosfera). A Carta Solar é o dispositivo usado para realizar as medidas. A Carta Solar está em função da latitude do local em que se encontra. Em latitudes mais altas, os dias têm maior duração nos meses de verão do que nos meses de inverno. Em baixas latitudes, o sol tem comportamento semelhante nos dois solstícios, por isso o número de horas de sol diário é parecido.

A obtenção de dados de radiação solar deveria ser feita por medições, já separando os dois tipos de parcelas, entretanto, o que é mais utilizado no Brasil são as normais climatológicas,

ou estimativas feitas a partir do *TRY*. Se esses dados fossem levantados de forma mais precisa, o estudo da eficiência energética provavelmente seria mais simples e teria melhor resultado.

### **3.1.2.2 TEMPERATURA**

Temperatura é a grandeza física que indica o estado térmico do ambiente. É a variável climática mais fácil de medir, bastando um termômetro para isso. Sua variação resulta da radiação solar incidente e o coeficiente de absorção da superfície receptora, da condutividade e a capacidade térmica do solo e as perdas por radiação, convecção e evaporação. (BRAGER, 1998 *in* LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

A partir dos dados climáticos obtidos na *TRY* ou nas normais climatológicas, pode-se ter o conhecimento do comportamento anual da temperatura em determinada localidade. O estudo dos dados pode fornecer estimativas acerca da temperatura média, máxima e mínima para cada mês do ano e assim, proporcionar ao projetista dados necessários para a identificação dos períodos de desconforto.

Para uma mesma temperatura, a sensação de conforto térmico pode ser diferente em função de variáveis como o vento e a umidade do local. (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

### **3.1.2.3 VENTO**

Em uma região climática pode haver variações significativas de direção e de velocidade do movimento do ar. Isto acontece principalmente pela diferença de temperatura entre as massas de ar, o que provoca o seu deslocamento da área de maior pressão (ar mais frio e pesado) para a área de menor pressão (ar quente e leve). (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014)

O projetista pode conhecer o comportamento dos ventos predominantes na região a partir da rosa-dos-ventos. Este recurso pode auxiliá-lo na definição das posições das aberturas da edificação, assim conseguindo regular a temperatura do ambiente com menor uso de energia.

O comportamento do vento também é função da topografia do local, da vegetação, da rugosidade da superfície e da presença de edifícios e obstáculos.

### 3.1.2.4 UMIDADE

A umidade é a forma de medirmos a quantidade de água em estado de vapor/gás na atmosfera. A presença de água na atmosfera é devida a evaporação da água presente na superfície terrestre.

A umidade do ar é o principal agente natural de controle da amplitude térmica (variação de temperatura), isso acontece devido ao alto calor específico da água. Durante o dia, a água presente no ar absorve boa parte da radiação solar que incide na Terra, limitando a quantidade de calor que chega a superfície, e durante a noite, ela libera esse calor absorvido durante o dia. Isso faz com que a variação de temperatura seja pequena em lugares úmidos, e grande em lugares secos.

A umidade do ar também age diretamente na capacidade de evaporação do suor da pele. Se o ar é muito úmido, a evaporação é dificultada, caso contrário, é facilitada. Esse é um fator relevante para a análise do Conforto térmico. É importante que o projetista faça o estudo da umidade e da temperatura em conjunto ao longo do ano, para que possa tomar as melhores decisões.

### 3.2 ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO

O clima brasileiro é bastante variado, isso se dá porque o país possui dimensões continentais e também porque está localizado nos dois hemisférios. Graças a esse fato, o Brasil possui 6 (seis) tipos de climas diferentes em seu território: tropical, equatorial, semiárido, subtropical, tropical atlântico e tropical de altitude.

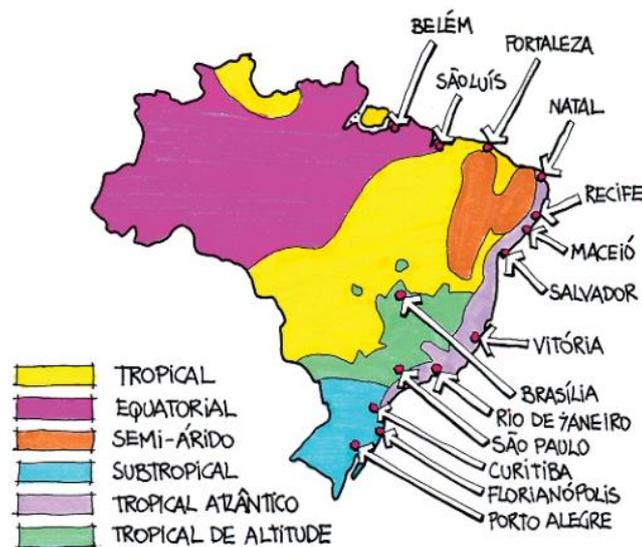


Figura 3- Climas do Brasil. (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014)

Contudo, quando se está no contexto de projetos, a classificação acima não é muito eficiente, dado sua subjetividade, por isso, a ABNT NBR 15220-3 apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro.

Foi feita a divisão do território nacional em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima e, para cada uma destas, formulou-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas para otimizar o desempenho térmico das edificações, através de sua melhor adaptação ao clima.

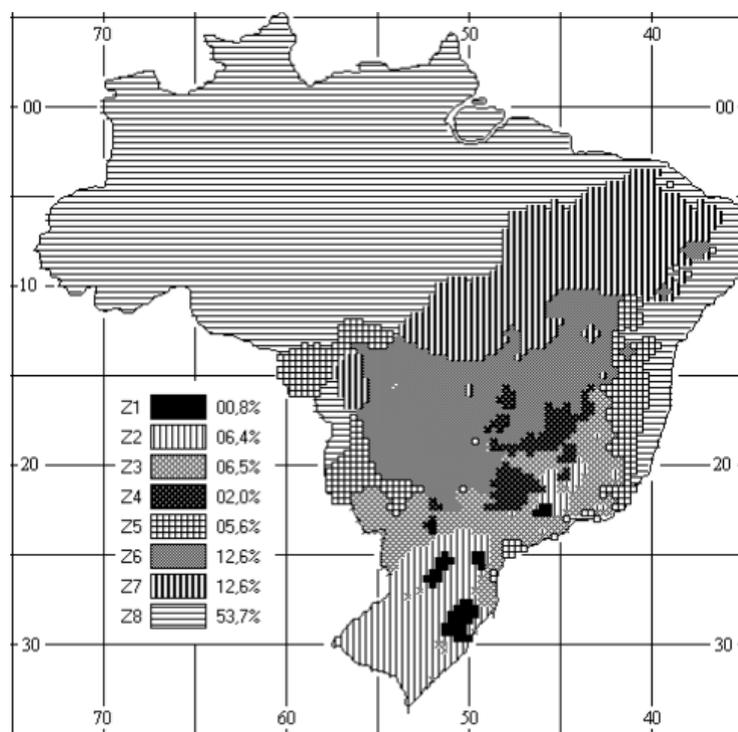


Figura 4- Zoneamento bioclimático brasileiro. ABNT NBR 15220-3 (2005).

Com o zoneamento em mãos, é possível conhecer o comportamento do clima de determinada região de forma mais objetiva. O quadro a seguir indica as diretrizes construtivas que devem ser usadas em cada zona.

Tabela 1- Diretrizes construtivas (LAMBERTS, 2014, p.99)

zona	estratégias		aberturas para ventilação A (em % da área de piso)	sombreamento das aberturas	parede			cobertura		
	verão	inverno			U	$\phi$	FS <sub>0</sub>	U	$\phi$	FS <sub>0</sub>
	1				aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	permitir sol apenas durante o inverno	≤ 3,0 (parede leve)	≤ 4,3	≤ 5,0
2	ventilação cruzada	aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	permitir sol apenas durante o inverno	≤ 3,0 (parede leve)	≤ 4,3	≤ 5,0	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
3	ventilação cruzada	aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	permitir sol apenas durante o inverno	≤ 3,6 (parede leve refletor a)	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
4	Resfriamento evaporativo e inércia térmica para resfriamento / ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa	aquecimento solar da edificação / vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	sombrear aberturas	≤ 2,2 (parede pesada)	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
5	ventilação cruzada	vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	sombrear aberturas	≤ 3,6 (parede leve refletor a)	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
6	Resfriamento evaporativo e inércia térmica para resfriamento / ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa	vedações internas pesadas (inércia térmica)	médias 15% < A < 25%	sombrear aberturas	≤ 2,2 (parede pesada)	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,0 (leve isolada)	≤ 3,3	≤ 6,5
7	Resfriamento evaporativo e inércia térmica para resfriamento / ventilação seletiva nos períodos quentes, em que a temperatura interna seja superior à externa		pequenas 10% < A < 15%	sombrear aberturas	≤ 2,2 (parede pesada)	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,0 (pesada)	≤ 6,5	≤ 6,5
8	ventilação cruzada permanente OBS: o condicionamento passivo será insuficiente durante as horas mais quentes		grandes A > 40%	sombrear aberturas	≤ 3,6 (parede leve refletor a)	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,3.FT (leve refletor a)	≤ 3,3	≤ 6,5

Legenda:

1. U – transmitância térmica [W/m<sup>2</sup>K]
2.  $\Phi$  – atraso térmico em horas
3. FS<sub>0</sub> – fator solar para superfícies opacas

### **3.3 CONFORTO TÉRMICO**

O conforto ambiental pode ser definido como o conjunto de condições ambientais que permitem ao indivíduo o bem-estar do ponto de vista térmico, antropométrico, visual, acústico, entre outros. Este é um conceito muito amplo e pode ser avaliado de diferentes frentes, porém o enfoque desse trabalho será no conforto térmico.

Segundo ASHRAE (2005), conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico. (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

O ser humano usa de vários recursos para garantir o seu Conforto térmico, sendo os principais deles a vestimenta, a arquitetura e a tecnologia. O homem é um ser homeotérmico, a partir do uso do oxigênio presente no ar o organismo humano promove a queima de nutrientes para captar a suas calorias e utilizá-las para manter a temperatura do corpo constante em aproximadamente 37°C. Esse processo é necessário pois o corpo humano está constantemente trocando calor com o meio através dos fenômenos físicos da condução, convecção, radiação, evaporação e respiração.

#### **3.3.1 VARIÁVEIS DE CONFORTO TÉRMICO**

As variáveis que possuem influência sobre o conforto térmico e que podem ser quantificadas com certa facilidade são a temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. Essas são chamadas de variáveis ambientais. Além delas, ainda existem as que são independentes do meio, que são a vestimenta e a atividade física.

A atividade física está diretamente relacionada ao metabolismo e, portanto, ao calor gerado por ele. É importante que o projetista saiba qual será a finalidade da edificação (escola, academia, etc.) para saber o qual tipo de solução para regulação térmica do ambiente será necessária. A ISO 7730 tabela valores de gasto de energia ( $W/m^2$ ) para atividades corriqueiras.

A vestimenta também possui relevância no conforto térmico do homem. Ocorrem trocas de calor entre o organismo humano e a roupa por meio dos processos físicos, também ocorrem entre a roupa e o meio. Quanto maior a resistência térmica da roupa, menos calor ela perde para o meio e assim consegue-se manter uma temperatura mais elevada no indivíduo do que no meio. A ISO 7730 tabela valores de resistência térmica de várias vestimentas.

### 3.3.2 ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO

Os índices de conforto térmico foram criados com o intuito de quantificar a análise do conforto térmico, que até então era qualitativa.

O Voto Médio Predito (PMV) trata-se de um valor numérico que representa a sensibilidade humana ao frio e ao calor. Valores negativos remetem ao frio, e valores positivos ao calor, o conforto térmico é alcançado quando PMV é igual a zero. O PMV é calculado a partir de uma equação deduzida por Fanger (1972) para o conforto levando em consideração todas as variáveis de conforto e pessoas de diferentes nacionalidades, idades e sexos.

Um segundo conceito foi implementado pela ISO 7730, a Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD – predicted percentage of dissatisfied). A ISO 7730 de 2005 também estabeleceu que o valor de PPD não deve exceder 10%, o que implica que o PMV deve ser maior que -0,5 e menor que 0,5.

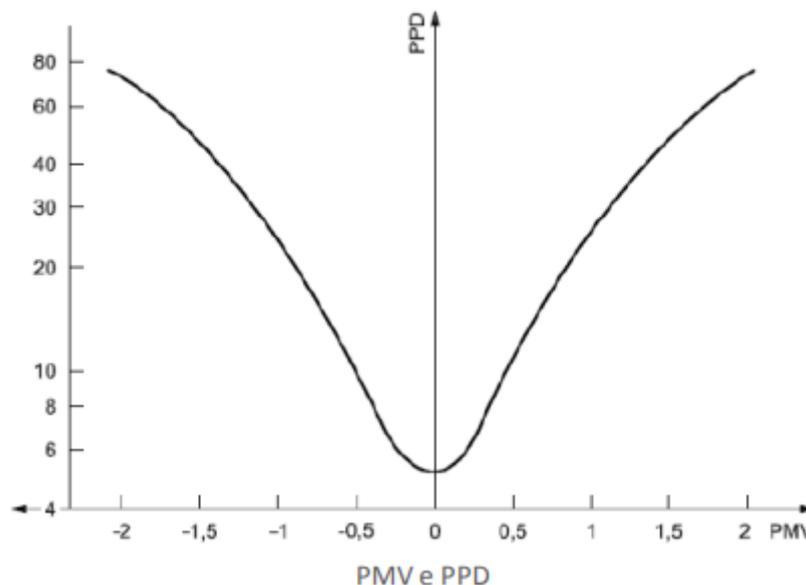


Figura 5- Relação entre PMV e PPD. (LabEEE)

O cálculo manual dos índices é inviável devido à complexidade da equação de Fanger, por isso foram desenvolvidos softwares para os cálculos dos índices. Alguns exemplos são o *Analysis – CST*, o *Comfort Calculator* e o *PMV Tool*.

### 3.3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Dentre os instrumentos utilizados para a aferição das variáveis ambientais de interesse para o estudo do desempenho energético das edificações pode-se destacar os termômetros, psicrômetros, anemômetros e confortímetros.

Os termômetros são utilizados para realizar medidas de temperatura. Para a temperatura do ar, utiliza-se o termômetro de bulbo seco. Para a temperatura radiante, é necessário utilizar o termômetro de globo e realizar cálculos a partir dos dados obtidos.

O psicrômetro é usado para medir a umidade relativa do ar. A partir dos dados obtidos no psicrômetro, consegue-se determinar a umidade relativa do local a partir da carta psicrométrica. Esse é um importante recurso no entendimento nas transformações de ar úmido.

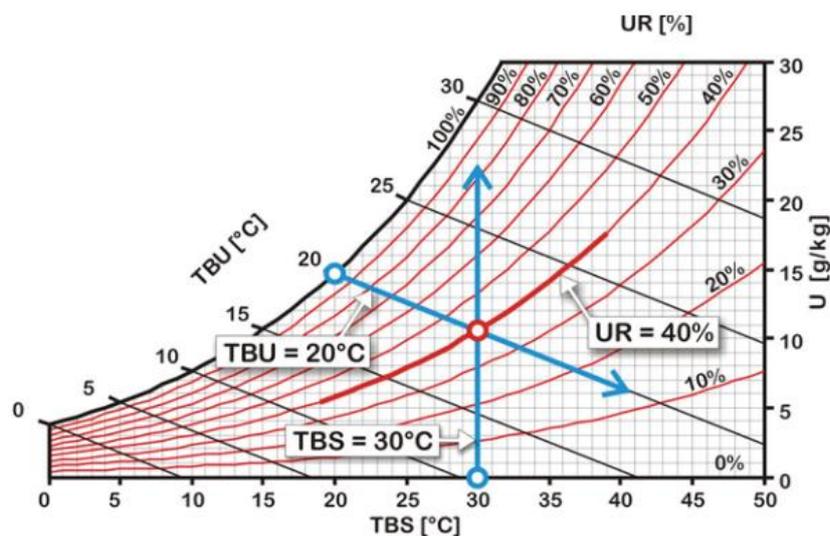


Figura 6- Carta psicrométrica. (LAMBERTS; DUTRA ; PEREIRA, 2014)

O anemômetro é o aparelho para medir velocidade do ar. Os anemômetros mais comuns são o de copos, o de palhetas e o de fio quente.

O confortímetro é um aparelho que realiza a medição de todas as variáveis ambientais. Este aparelho tem um computador próprio que realiza o cálculo do PMV, desenvolve gráficos e armazena dados para futuras análises.



Figura 7-Psicrômetro Giratório. LOGISMARKE(2018).



Figura 8- Termômetro de Globo Digital. HIGHMED(2018).



Figura 9- Anemômetro de palhetas giratórias. NEI(2018).

### 3.4 VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural é, após o sombreamento, a estratégia bioclimática mais importante para o Brasil. A ventilação natural é eficaz entre temperaturas de 20°C e 32°C, pois a partir daí os ganhos térmicos por convecção funcionariam mais como aquecimento do ambiente do que como resfriamento. (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014)

A maior parte das capitais brasileiras faz uso da ventilação natural como principal estratégia no verão e mesmo ao longo de todo o ano.

O principal meio de compreender-se o comportamento do vento é por meio da análise da rosa dos ventos. A rosa-dos-ventos mostra as estatísticas anuais de velocidade e frequência do vento de determinada localidade.

É importante ressaltar que os dados de vento são normalmente coletados em estações meteorológicas em locais mais abertos, como aeroportos e áreas suburbanas, longe da rugosidade da cidade. Deve-se, portanto, fazer a correção dos valores indicados nas rosas-dos-ventos.

A velocidade do vento é medida a 10 (dez) metros de altura do solo, esse valor deve ser corrigido para se adaptar as condições de contorno da cidade. Bittencourt e Cândido (2005) modelaram uma equação para realizar essa correção:

$$\frac{V}{V_m} = k * z^a$$

Onde:

$V_m$  – velocidade média do vento a 10 metros de altura (m/s)

$V$  – Velocidade corrigida na altura das aberturas da edificação (m/s)

$k, a$  – coeficientes baseados nas condições de contorno do edifício

Os valores de  $k$  e de  $a$  podem ser obtidos a partir da tabela a seguir:

Tabela 2- Coeficientes  $k$  e  $a$  para o cálculo de ventilação natural. (LAMBERTS et Al., 2014, p.175)

<b>Localização da Edificação</b>	<b><math>k</math></b>	<b><math>a</math></b>
campo aberto plano	0,68	0,17
campo com algumas barreiras	0,52	0,20
ambiente urbano	0,35	0,25
centro da cidade	0,21	0,33

Posteriormente a correção da velocidade do vento, deve-se fazer o cálculo da pressão de vento, que tem como variáveis o afastamento entre as edificações e o ângulo de incidência do vento nas aberturas. É possível realizar o cálculo com o uso das tabelas a seguir:

Tabela 3- Diferença entre coeficientes de pressão do vento em casas com campo aberto. (LAMBERTS et Al., 2014, p.176)

Ângulo de Incidência ( $\theta$ )	Diferença entre os coeficientes de pressão do vento ( $\Delta C_{PL}$ )
$0 \leq \theta \leq 30^\circ$	1,2
$30^\circ < \theta \leq 90^\circ$	$0,1 + 0,0183 \cdot (90 - \theta)$

Tabela 4- Coeficiente de pressão do vento para loteamentos. (LAMBERTS et Al., 2014).

Distância entre casas	Coeficientes de pressão do vento ( $\Delta C_p$ )
uma casa	$0,3 \cdot \Delta C_{PL}$
duas casas	$0,6 \cdot \Delta C_{PL}$

A partir desses dois dados, é possível calcular uma série de outras variáveis relevantes para o conceito de ventilação. Uma dessas é o número de trocas de ar (N). Para garantir a qualidade do ar de determinado ambiente, define-se um número mínimo para o valor de N, que é calculado pela equação:

$$N = 3600 * \frac{Q}{v}$$

Onde:

N – número de trocas de ar por hora

Q – vazão de ar (m<sup>3</sup>/s)

v- volume do ambiente ventilado (m<sup>3</sup>)

Há uma recomendação para a ventilação mínima necessária em ambientes em função do número de pessoas:

Tabela 5- Ventilação mínima necessária em ambientes. (LAMBERTS et Al., 2014)

espaço disponível por pessoa (m <sup>3</sup> )	ar fresco requerido por pessoa (m <sup>3</sup> /h)		
	mínimo	valores recomendáveis	
		sem fumar	fumando
3	40,7	61,2	81,4
6	25,6	38,5	51,1
9	18,7	28,1	37,4
12	14,4	21,6	28,8

A ventilação natural é função da disposição da edificação no terreno e da disposição de obstáculos (vegetação, prédios, etc.) ao seu redor. Os obstáculos agem como barreiras de vento, fazendo com que ocorra redução na velocidade do vento, aumento de sombreamento e mudança no ângulo de incidência do vento.

O vento predominante do verão deve ser explorado para resfriar os ambientes quando necessário, e o vento predominante do inverno deve ser evitado pois nesta época do ano deseja-se reduzir as perdas de calor.

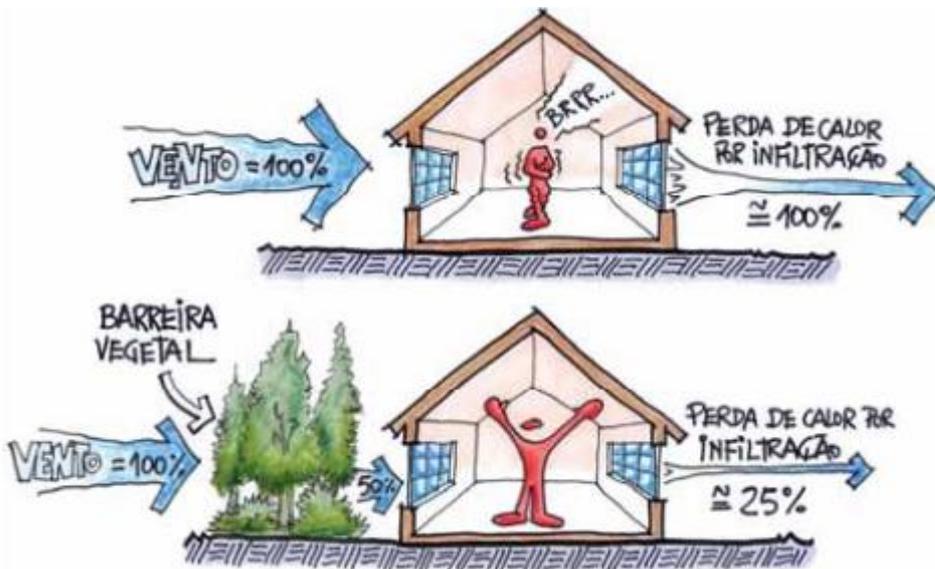


Figura 10 - Perda de calor usando a vegetação como barreira. (LAMBERTS, 2014, p.181)

A figura mostra que as perdas de calor são reduzidas numa proporção equivalente ao quadrado da redução da intensidade do vento incidente.

Cabe ao projetista pensar em como dispor o edifício no terreno e em como utilizar os obstáculos do terreno a fim de promover conforto térmico a edificação.

### **3.5 INÉRCIA TÉRMICA**

Inércia térmica é a resistência que um edifício possui em mudar sua temperatura interna. Essa resistência é devida a sua massa térmica.

Edifícios com grande massa térmica implicam em um período de armazenamento de energia mais elevado com a atenuação dos picos de temperatura e da diminuição da necessidade de um aquecimento ou resfriamento do edifício. Em edifícios desse tipo, no verão a energia é acumulada durante o dia e à noite ocorre a diminuição natural da temperatura e a ventilação natural permite o resfriamento do edifício. Contudo, em climas quentes e úmidos uma massa térmica demasiadamente elevada pode acarretar grandes custos com resfriamento. No inverno, a energia acumulada durante o dia pode ser utilizada para aquecer o ambiente na noite. (SOUSA, M., 2014).

Em edifícios com baixa massa térmica, o aquecimento e o arrefecimento ocorrem de maneira mais rápida. Isso é desejável em caso de ocupação intermitente pois se reflete num menor consumo de energia, entretanto, em edifícios de ocupação permanente essa massa térmica reduzida pode conduzir a um consumo maior de energia para a aclimação.

Dessa maneira, as estratégias que buscam aumentar a inércia térmica dos edifícios leves tem sido cada vez mais estudadas. Uma maneira de se conseguir isso é com os permutadores de calor solo-ar que utilizam a grande massa térmica do solo para a aclimação dos edifícios.

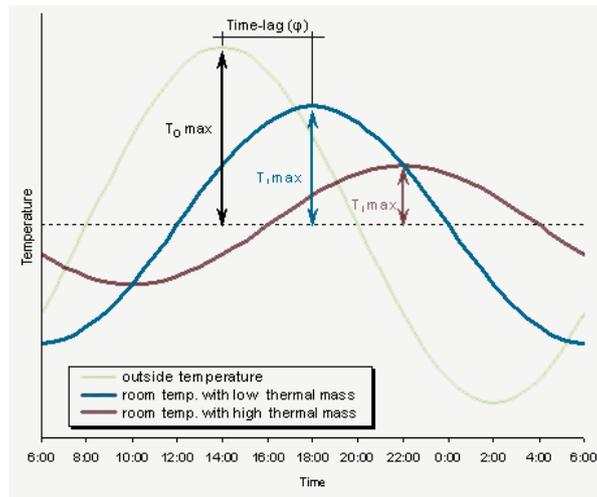


Figura 11 - Fenômeno do abatimento da temperatura e atraso do fluxo de calor. (SAIGE,2018).

### 3.6 ENERGIA GEOTÉRMICA

Segundo Sousa, M. (2014), energia geotérmica é aquela armazenada pela Terra abaixo de sua superfície na forma de calor. Pode ser dividida em energia geotérmica profunda e superficial. A profunda é devida ao calor gerado no interior do planeta e tem como aplicações principais a geração de eletricidade e calor. A superficial é oriunda do calor irradiado pelo Sol e acumulado no solo a profundidades de 2 a 100 metros com possíveis aproveitamentos em aquecimento de águas sanitárias, sistemas de pavimentos radiantes e sistemas de permutadores de calor solo-ar. (SOUSA, E., 2014)

O aproveitamento da energia superficial não requer a existência de condições geológicas especiais sendo necessária apenas a condição de escavação adequada. O solo, apesar de possuir uma capacidade térmica inferior quando comparada com a da água, por exemplo, possui grande inércia térmica devido ao seu elevado volume de armazenamento. Isso possibilita o fenômeno do amortecimento térmico e o atraso temporal entre a temperatura ambiente e a temperatura do solo a certa profundidade. Esses fenômenos constituem-se nas condições adequadas ao aproveitamento energético em permutadores de calor. (SOUSA, M., 2014).

### 3.7 PERMUTADORES DE CALOR SOLO-AR (EAHE)

Constituem os sistemas de ventilação que utilizam a inércia térmica da terra, e consequentemente a diferença de temperatura entre o ar ambiente e o ar do solo, para a realização de trocas de calor através de tubos enterrados a fim de climatizar e ventilar edifícios. São também conhecidos como poços canadianos, poços provençais e *Earth-to-Air-Heat-Exchanger (EAHE)*, na denominação inglesa de permutadores de calor solo-ar. (SOUSA,M., 2014).

A denominação de poço canadiano é geralmente empregada quando o sistema de ventilação promove o aquecimento do ar no período de inverno enquanto a denominação de poço provençal é mais utilizada quando o sistema resfria o ar da edificação no período de verão. Em ambos os casos o mecanismo de troca de calor é análogo. (PINTO, 2014).

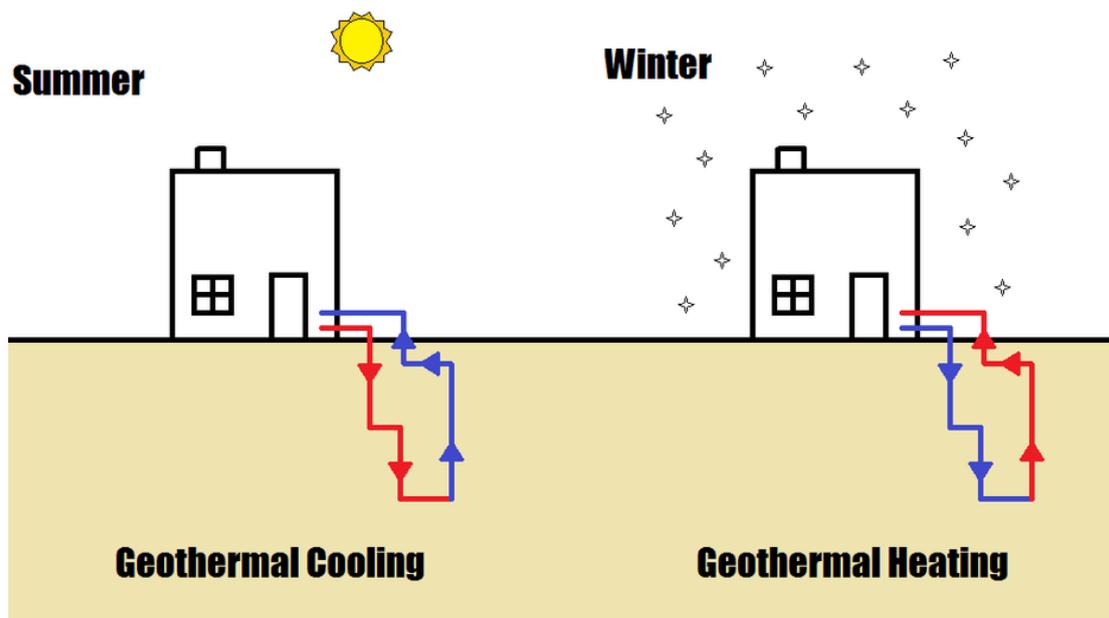


Figura 12- Princípio de funcionamento dos EAHE. *Diversifiedpiping* (2018).

Nos permutadores de calor solo-ar, a entrada do ar se dá através de um fosso ou torre concebido com o objetivo de realizar uma pré-filtragem do ar a fim de não permitir a entrada de partículas de poeira e microrganismos. Após a entrada do ar na tubulação, esse troca calor com solo, principalmente por condução, enquanto a troca de calor entre o tubo e o ar ocorre principalmente por convecção. (SOUSA,M., 2014; MONTEIRO, 2008).

Esses sistemas possuem como características a simplicidade operacional e pouca exigência tecnológica. Para forçar a circulação do ar do ambiente para o interior do edifício é

importante que os permutadores tenham acoplados a si um sistema de ventilação regulável que se adeque às necessidades de climatização e ventilação do edifício. (SOUSA,M., 2014).

A necessidade de acoplamento do ventilador não descaracteriza os *EAHE* como um sistema de ventilação passiva pois, segundo (MISRA et al., 2012), os sistemas passivos de climatização são aqueles que tem a capacidade de consumir pouca ou nenhuma energia quando comparados com sistemas ativos.



Figura 13- Filtro de entrada de um EAHE. (REHAU. 2018)

A utilização do solo como trocador de calor é conhecida há muito tempo. Na região da antiga Pérsia por volta de 1000 a.c foi desenvolvido um sistema de túneis, denominado de *qanat*, que recolhia águas subterrâneas e as transportavam a locais de cultivos. Nesses túneis eram construídos poços verticais que permitiam a remoção do material escavado e a ventilação das galerias surgindo a ideia de arrefecimento e ventilação de edifícios. Os *qanats* trabalhavam em conjunto com torres de vento formando uma zona de baixa pressão que promovia a circulação do ar e diminuição da temperatura. O ar quente entra pelos poços escavados e é resfriado ao longo dos túneis pelos quais percorre até adentrar ao edifício. (SOUSA, M., 2014)

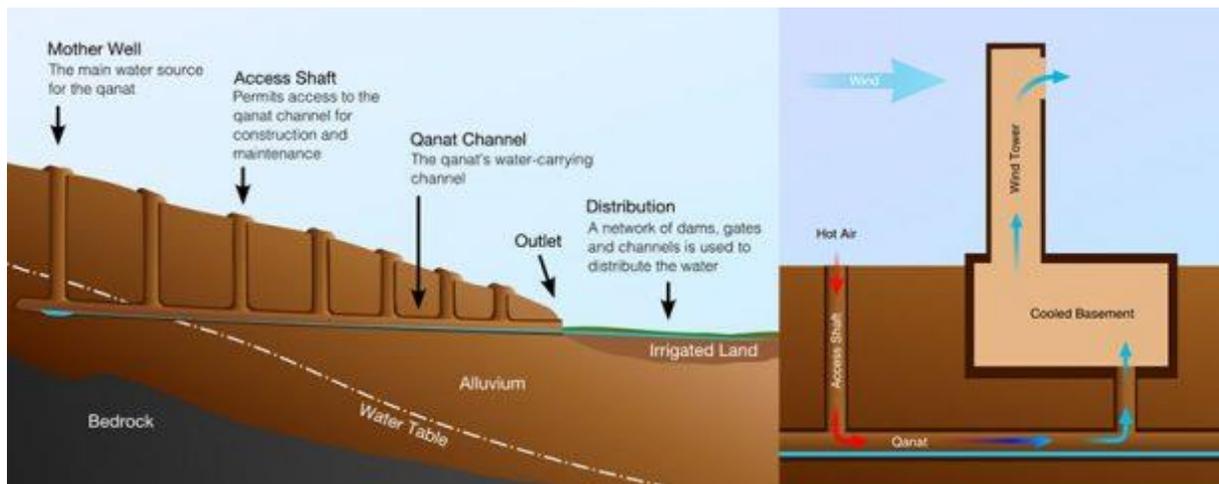


Figura 14- Funcionamento de um *qanat*. Site: *WonderfulEngineering* (2018)

Segundo (BISONIYA et al., 2012), a utilização dos permutadores de calor solo-ar tornou-se bastante comum desde a década de 90 na Áustria, Dinamarca, Alemanha e Índia e vem sendo progressivamente adotada na América do Norte. Nos EUA, esses sistemas têm sido utilizados em aplicações agrícolas e hortícolas nas últimas décadas.

Os permutadores de calor solo-ar são umas das aplicações de energia sustentável que mais crescem no mundo registrando um aumento de 10% em cerca de 30 países nos últimos anos. Na Europa, em 2007, tinham sido construídas e completadas mais de 5000 unidades habitacionais com aclimatação passiva. A partir de meados do século XX o número de pesquisas sobre os sistemas de tubulações enterradas cresceu consideravelmente, surgindo modelos experimentais e analíticos para a descrição e previsão do desempenho dos sistemas. (BISONIYA et al., 2012). No item 3.7.3 será feita uma revisão bibliográfica sobre a evolução dos estudos na área.

### 3.7.1. SOLUÇÕES EXISTENTES

Existem dois tipos de sistemas permutadores de calor solo-ar: os sistemas abertos e os sistemas fechados.

O sistema aberto é disposto de maneira que o ar que entra na tubulação enterrada chega ao ventilador onde é filtrado e vai para o interior da edificação. Esse tipo permite a renovação do ar é o sistema de ventilação geotérmico mais utilizado. Geralmente é empregado nos sistemas-híbridos, aqueles que reúnem um sistema permutador de calor com sistemas de climatizadores convencionais. (SOUSA,E., 2014)

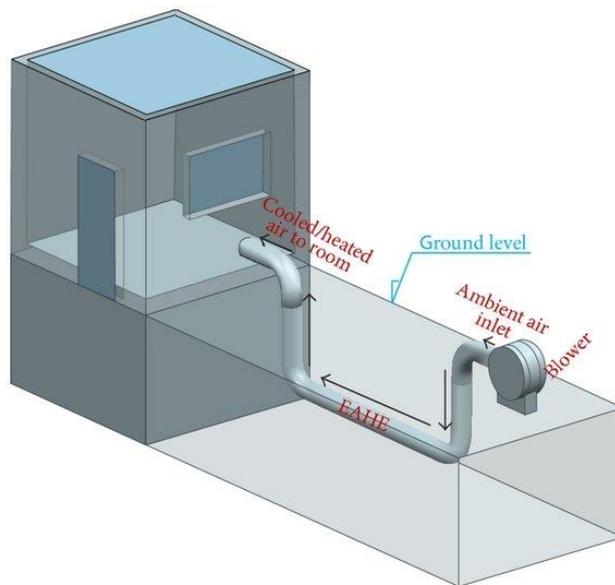


Figura 15- Sistema *EAHE* aberto, (BISONYA et al., 2014).

O sistema fechado conduz o ar do interior do edifício às tubulações onde ocorrem as trocas de calor e este retorna ao edifício. Esse sistema é mais eficaz que o sistema aberto para os períodos em que as temperaturas são mais extremas, porém não renova o ar da edificação e vem caindo em desuso. (SOUSA, M., 2014).

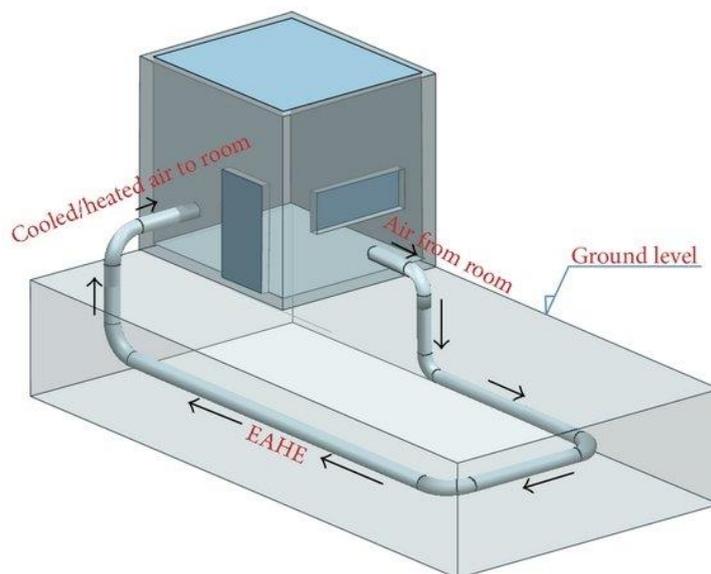


Figura 16- Sistema *EAHE* fechado, (BISONYA et al., 2014).

A instalação do sistema de tubulação pode ser realizada em áreas de terreno livre adjacentes à edificação o que pode não ser possível. Outras formas de instalação podem ser

feitas abaixo da edificação ou ao redor dela. Essas últimas apresentam como desvantagem a difícil manutenção das tubulações. (SOUSA, M., 2014).

Com relação à configuração das tubulações, a empresa alemã *REHAU* fornece três tipos de traçados: em anel, em serpentina e em grelha. O traçado em anel é ideal para sistemas de menores dimensões e tem a possibilidade de reaproveitamento da escavação realizada para a construção das fundações. O traçado em serpentina é adequado para sistemas de dimensões intermediárias que necessitam de maior comprimento de tubulação. O traçado em grelha é adequado para grandes necessidades de ar e possui como benefício um maior equilíbrio de pressões na rede além da não interrupção de funcionamento caso algum trecho venha a se comprometer. (SOUSA, M., 2014).

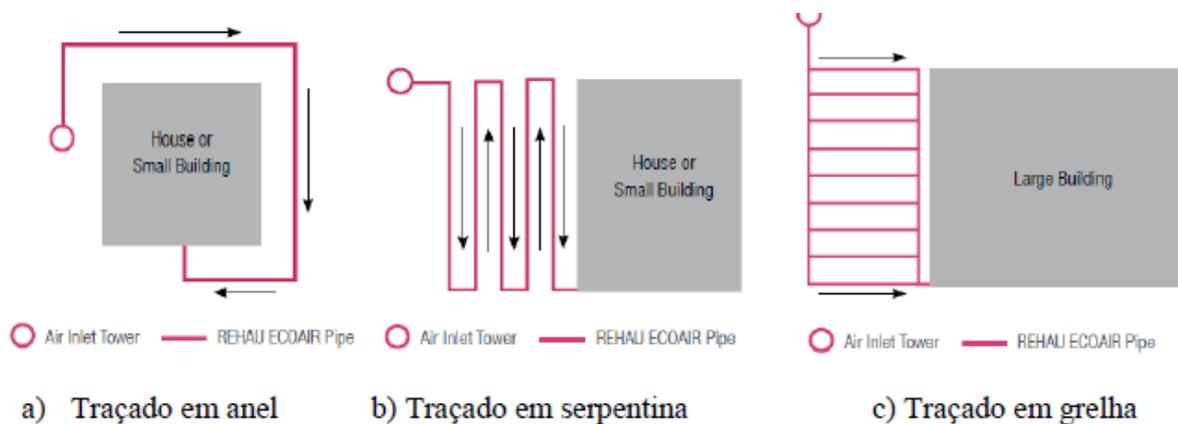


Figura 17- Configurações das instalações. SOUSA,M (2014)

### 3.7.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Segundo (SOUSA,M., 2014), os sistemas permutadores de calor solo-ar podem substituir ou complementar os sistemas convencionais reduzindo o consumo de energia e consequentemente os custos. Representam uma alternativa menos agressiva à atmosfera pois não utilizam compressores com clorofluorcarbonetos e outros poluidores utilizando o ar como único fluido, constituindo-se, dessa forma, uma alternativa sustentável. (SOUSA,E., 2014)

Apresentam baixos custos de construção, manutenção e operação devido a sua simplicidade, volumes de escavação relativamente baixos e utilização de materiais convencionais como tubos de polietileno ou manilhas de concreto. Em 2014, para instalação em Portugal, o orçamento de um sistema de permutadores de calor solo-ar resultou em custo

total de 3192,35 €, o custo de manutenção para o período de 10 anos em 496,61 € e o custo de mão de obra de 425,12 €. (SOUSA, E 2014)

Para climas mediterrânicos e tropicais podem ser utilizados como única fonte de aquecimento durante o período de inverno. Se mostram um sistema de aquecimento com solução melhor que o aquecimento convencional para períodos de operação superiores a 20-30 anos. (SOUSA, E., 2014)

Apesar de possuírem eficiência de aquecimento ou resfriamento inferior à eficiência dos sistemas convencionais, os *EAHE* apresentam como diferencial o fato de promover ventilação e renovação do ar interior da edificação permitindo uma melhoria da qualidade do ar quando da utilização de filtros adequados que impedem a entrada de microrganismos e poeira na edificação. (SOUSA, M., 2014)

Os *EAHE* permitem que haja uma redução das aberturas da edificação reduzindo o nível de ruídos provenientes dessas e um aumento da segurança. (MONTEIRO, 2008).

Contudo, podem ser elencados alguns aspectos desvantajosos dos sistemas *EAHE*. Exigem a existência de área de terreno disponível e a movimentação de terra pode resultar em elevados custos a depender da disposição das tubulações e do tipo de solo da localidade. É recomendável a instalação no período de construção sendo de difícil instalação para edificações já prontas. (MONTEIRO, 2008).

O sistema pode gerar condensação da umidade do ar devido ao resfriamento ao longo dos tubos, principalmente no verão, gerando condições favoráveis ao crescimento de organismos, para combater esse problema torna-se necessária a instalação de uma bomba no ponto mais baixo da tubulação a fim de drenar essa água, o que implica numa redução da eficiência do sistema. (SOUSA, M., 2014)

O ar que circula pelos tubos, bem como o ventilador usado no sistema podem, por outro lado, servir como fonte de ruídos para a edificação. (MONTEIRO, 2008).

Em períodos intermediários a eficiência do sistema de ventilação geotérmica fica prejudicada pois a diferença de temperatura entre o ambiente e o solo é atenuada, reduzindo, dessa maneira, as trocas de calor no solo. Ainda assim, é recomendável a continuação do funcionamento para se evitar a acumulação de bolores devido à estagnação do ar. (SOUSA, M., 2014)

De acordo com (SOUSA, M., 2014), devido à grande variabilidade das condições envolvidas como condutividade térmica do solo, radiação incidente, temperaturas do solo e do ar e umidades relativas, é de difícil previsão o desempenho dos sistemas de ventilação

geotérmica. Como se trata de uma indústria ainda pouco desenvolvida torna-se difícil o ajuste adequado dos sistemas a essas diferentes condições. (MONTEIRO, 2008)

### **3.7.3. MODELOS DE COMPORTAMENTO E DESEMPENHO DOS EAHE**

Para se analisar a eficiência de um sistema de ventilação geotérmica é utilizado o coeficiente de desempenho, *coefficient of performance (COP)*. Trata-se da relação entre a potência de resfriamento ou aquecimento e a potência que precisa ser consumida pelo ventilador instalado para funcionamento do sistema. Portanto um valor de *COP* superior a 1 indica eficácia do sistema instalado enquanto um valor inferior a 1 indica que está ocorrendo desperdício de energia. (SOUSA, M., 2014).

Vários estudos foram realizados nas últimas décadas sobre os permutadores de calor solo-ar envolvendo análises experimentais, analíticas e numéricas. A seguir são descritos alguns dos principais estudos na área bem como algumas pesquisas recentes.

Em 1994, Mihalakakou et al. desenvolveram um modelo numérico para a avaliação da influência da superfície terrestre no desempenho de um sistema EAHE com um ou mais tubos paralelos enterrados. O estudo revelou que uma fina camada de grama pode melhorar o potencial do sistema. (MIKAHALAKAKOU et al., 1994 *in* FERRAZ, 2015).

Em 2000, Hollmuller e Lachal conceberam um modelo tridimensional através do método dos elementos finitos que leva em conta a transferência de calor sensível e latente, perdas por atrito, infiltração e fluxo de água ao longo dos tubos. O modelo permite também o controle do fluxo de ar e geometria flexível. A simulação foi validada com dados experimentais. O estudo avaliou o desempenho de um EAHE na cidade de Genebra e concluiu que existe uma assimetria entre os potenciais de aquecimento e resfriamento do mesmo sistema sendo o processo de resfriamento mais eficiente que o de aquecimento. (HOLLMULLER e LACHAL, 2000 *in* MONTEIRO, 2008; SOUSA, M., 2014).

Em 2003, De Paepe e Jassens desenvolveram um modelo analítico unidimensional que relaciona o desempenho termo-hidráulico dos EAHE com seus parâmetros dimensionais. Dessa maneira foi possível formular um método de dimensionamento para os EAHE que fornece uma eficiência otimizada para uma perda de carga aceitável de maneira independente dos parâmetros do solo e do clima. Com esse método o desempenho o projeto de EAHE depende de três parâmetros: diâmetro, comprimento e quantidade de tubos paralelos. (DE PAEPE E JASSENS, 2003 *in* MONTEIRO, 2008; NUNES, 2015)

Em 2003, Ghosal et al. estudaram a aplicação de EAHE em Nova Dheli por meio de um modelo analítico simplificado. Os dutos de 39 m de comprimento e 60 cm de diâmetro foram enterrados em forma de serpentina a uma profundidade de 1 m e as temperaturas foram registradas durante o ano de 2002. Obtiveram como resultados um aumento de temperatura de aproximadamente 6-7°C no Inverno e uma diminuição de 3-4°C no Verão. Os resultados experimentais e a modelagem mostraram-se de acordo. (GHOSAL et, al. *in* NUNES, 2015).

Wu, em 2007, estudou o resfriamento de edificações no verão por meio de dutos enterrados. Nesse estudo foram avaliados a influência de parâmetros como comprimento, raio, profundidade, taxa de fluxo de ar no desempenho térmico e capacidade de resfriamento do sistema EAHE. A modelagem foi desenvolvida de maneira implícita baseada na transferência de calor e nos fluidos dinâmicos com a aplicação de um código CFD (Computational Fluid Dynamics) no software PHOENICS. Observou-se uma capacidade de refrigeração diária de até 74,6 kWh. (WU, 2007 *in* FERRAZ, 2015).

Em 2009, Bansal formulou um modelo para o aquecimento de um EAHE em Amjer, Índia, através do software FLUENT. Nesse trabalho, foi possível obter um ganho de 4,1- 4,8 °C com tubulações de 23,42 m. Observa-se que o material empregado, PVC ou metal não afetou significativamente os ganhos do sistema, mas sim a velocidade do ar. (BANSAL, 2009 *in* KAPPLER, 2016).

Em 2011, Trzaki e Zawada realizaram um estudo com a aplicação de modelagem usando método dos elementos finitos para avaliar o desempenho do EAHE. Observou-se que têm influência no desempenho fatores como naturais como o sombreamento da área além de outros parâmetros como profundidade, comprimento, diâmetro e espaçamentos. (TRZAKI e ZAWADA *in* NUNES, 2015).

Misra desenvolveu, em 2013, um estudo experimental de um sistema EAHE com dutos possuindo formato de U dispostos horizontalmente na Índia, localidade de clima seco e quente. Para a simulação foi utilizado o software FLUENT com um modelo de turbulência. Foram avaliados a condutividade térmica do solo, velocidades de escoamento do ar, diâmetro do tubo em decorrência de uso contínuo do sistema. O estudo concluiu que menores diâmetros se mostram mais necessários conforme os solos apresentam maiores condutividades térmicas e que o desempenho do sistema é afetado negativamente por um aumento da velocidade do fluido. (MISRA, 2013 *in* FERRAZ, 2015).

Em 2014, Kipper estudou numericamente o desempenho de sistemas de EAHE sob a ótica de diversas configurações geométricas. Esse estudo concluiu que houve uma redução

média de 1°C do desempenho térmico comparado ao solo com duto retilíneo e uma redução significativa da área de solo. (KIPPER, 2014 *in* FERRAZ, 2015).

Em 2014, Vaz estudou o desempenho de um sistema EAHE na cidade de Viamão-RS no qual três dutos independentes foram instalados e foram monitoradas as temperaturas do solo, do ar externo e dos dutos enterrados no ano de 2007. O estudo mostrou que nos meses de maio, junho e julho o sistema apresentou desempenhos melhores para o aquecimento e os meses de fevereiro, março e abril melhores para o resfriamento. (VAZ, 2014 *in* FERRAZ, 2015).

### **3.7.4.SOFTWARES E PROCESSO DE SIMULAÇÃO**

Para a avaliação de eficiência energética e conforto térmico das edificações a ABNT (2013) faz recomendações acerca dos softwares a serem utilizados:

“Para a realização das simulações computacionais recomenda-se o emprego do programa *EnergyPlus*. Outros programas de simulação poderão ser utilizados, desde que permitam a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capazes de reproduzir os efeitos de inércia térmica e sejam validados pela ASHRAE Standard 140”.

O *EnergyPlus* trata-se de um software do Departamento de Energia dos Estados Unidos e é um dos mais utilizados no mundo para a realização de simulações termo-energéticas. Esse programa foi criado tendo como objetivos estimar as trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo energético de edifícios a partir de simulações acerca do aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e outros fluxos energéticos baseando-se na descrição física dos edifícios e da sua envolvente. (LAMBERTS et Al, 2010; SOUSA, M., 2014)

Segundo *EnergyPlus* (2013) para tornar possível a simulação é necessária a utilização de um arquivo climático condizente com a região na qual o edifício se encontra. Nesse arquivo se encontram as informações sobre radiação solar, temperaturas e outras variáveis decorrentes de modelos solares avançados e condições climáticas de longo prazo que constituem o ano-sintético que permitirão conhecer o desempenho geral da edificação. (SOUSA, M. 2014).

Com o objetivo de melhorar o processo de modelagem é possível utilizar-se do Design Builder como interface gráfica do *EnergyPlus*.

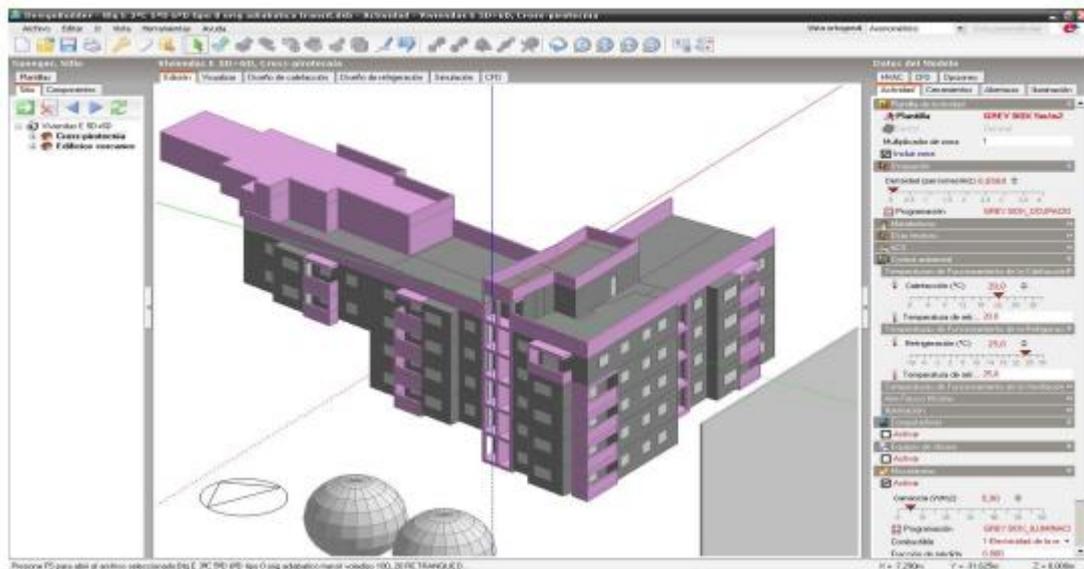


Figura 18- Interface do programa *DesignBuilder*. GHIASSI (2013).

A modelagem comportamental do solo no DesignBuilder é feita através da ferramenta *CalcSoilSurfTemp*. Trata-se de um modelo simplificado em que a onda de temperatura é transmitida da superfície, através de um meio semi-infinito, para o interior do solo fornecendo a temperatura desse a determinada profundidade, as trocas entre os tubos e o ar são modelados por meio de um modelo clássico. A temperatura da superfície é calculada considerando várias condições. (GINESTET, et. al., 2013). Os dados de entrada dessa ferramenta são, além do arquivo climático, os parâmetros de condições do solo na profundidade e na superfície.

Tabela 6- Parâmetros de entrada do *CalcSurfSoilTemp*. (SOUSA, É., 2014).

<b>Condições do solo em profundidade</b>	Pesado e saturado
	Pesado e húmido
	Pesado e seco
	Leve e seco
<b>Condições do solo à superfície</b>	Descoberto e molhado
	Descoberto e húmido
	Descoberto e árido
	Descoberto e seco
	Coberto e molhado
	Coberto e húmido
	Coberto e árido
	Coberto e seco

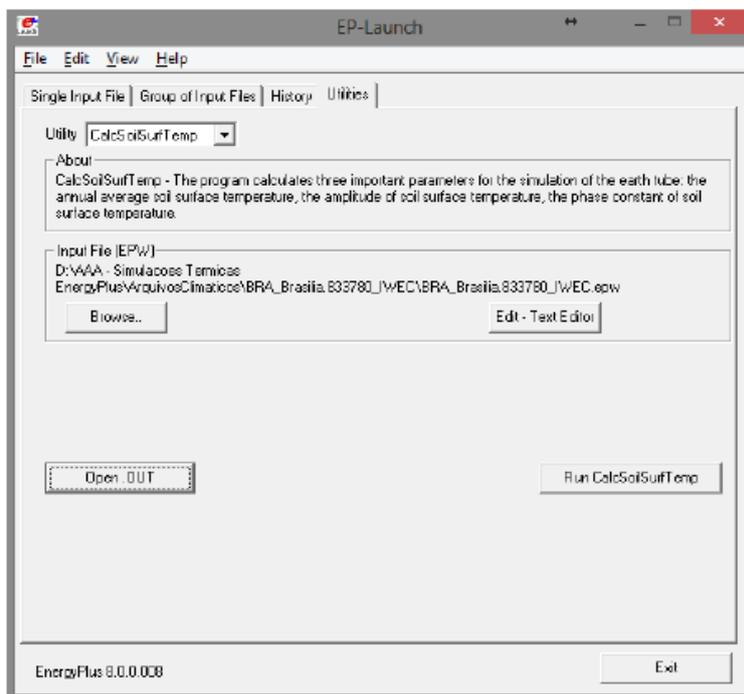


Figura 19- Interface do programa *Calcsoilsurftemp*. PINTO (2014).

Para o dimensionamento dos tubos podem ser utilizados alguns softwares já disponíveis. O GAEA (Desenho gráfico de permutadores de calor), software criado na Universidade de Siegen, na Alemanha, é específico para o dimensionamento de permutadores de calor ar solo, proporcionando uma análise individualizada do sistema. O EnergyPlus também faz esse tipo de análise. (PINTO, 2014).

Para o estudo de desempenho de permutadores de calor solo-ar, a ferramenta gráfica Design Builder não permite a modelagem direta. Entretanto, o Energy Plus possui o módulo ZoneEarthTube que permite a modelagem através de um modelo complexo de transferência de calor. Os dados de entrada da ferramenta em questão são, além do arquivo climático, a temperatura média, a amplitude da temperatura e a constante de fase da superfície do solo. Estes são calculados previamente através da ferramenta *CalcSoilSurfTemp*. (SOUSA, É., 2014).

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Earth Tube is specified as a design level which is modified by a Schedule fraction, temperature difference and wind speed:  
 $EarthTube = E \cdot design \cdot F \cdot schedule \cdot [A + B \cdot (T_{zone} - T_{soil})] + C \cdot WindSpd + D \cdot WindSpd^2$

Field Description:  
 ID: N9  
 Default: 15  
 Range: 0 < X, but no maximum

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Zone Name		Thermal Zone: P1 - Lab. de Experiment.	Thermal Zone: P2 - Lab. de Experiment.	Thermal Zone: P1-Circ. Horiz.	Thermal Zone: P2-Circ. Horiz.	Thermal Zone: P3-Circ. Horiz.
Schedule Name		Poco	Poco	Poco	Poco	Poco
Design Flow Rate	m <sup>3</sup> /s	0,668	0,668	0,668	0,668	0,668
Minimum Zone Temperature when Cooling	C	-10	-10	-10	-10	-10
Maximum Zone Temperature when Heating	C	50	50	50	50	50
Delta Temperature	deltaC	0	0	0	0	0
Earthtube Type		Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Fan Pressure Rise	Pa	200	200	200	200	200
Fan Total Efficiency		0,6045	0,6045	0,6045	0,6045	0,6045
Pipe Radius	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pipe Thickness	m	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01
Pipe Length	m	200	200	200	200	200
Pipe Thermal Conductivity	W/m-K	80	80	80	80	80
Pipe Depth Under Ground Surface	m	4	4	4	4	4
Soil Condition		HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp
Average Soil Surface Temperature	C	23,29932785	23,29932785	23,29932785	23,29932785	23,29932785
Amplitude of Soil Surface Temperature	C	5,20856142	5,20856142	5,20856142	5,20856142	5,20856142
Phase Constant of Soil Surface Temperature	days	115	115	115	115	115
Constant Term Flow Coefficient		0,606	0,606	0,606	0,606	0,606
Temperature Term Flow Coefficient		0,02019999	0,02019999	0,02019999	0,02019999	0,02019999
Velocity Term Flow Coefficient		0,0005980001	0,0005980001	0,0005980001	0,0005980001	0,0005980001
Velocity Squared Term Flow Coefficient		0	0	0	0	0

Figura 20- Interface do módulo *ZoneEarthtube* do *EnergyPlus*. PINTO (2014).

É possível ligar os arquivos gerados pelo *EnergyPlus*, no formato IDF e adicioná-los ao *DesignBuilder* e processá-los. (GINESTET, et. al., 2013). Dessa forma é possível proceder a investigação do desempenho térmico e conforto de uma edificação no seu estado atual, levando em consideração todas as variáveis envolvidas e descritas anteriormente, e também avaliar o impacto, nesses mesmos fatores, da implementação de um sistema de ventilação geotérmico. Uma forma de avaliar esse impacto pode ser pela observação da variação de temperaturas do

interior do edifício e pelos valores de consumo energético mensais e anuais do edifício com e sem sistema de ventilação.

#### **4. METODOLOGIA**

A seguir são descritas as etapas realizadas a fim de se investigar a atuação do sistema de refrigeração utilizando tubos enterrados.

Serão estudadas uma edificação educacional, o Pavilhão João Calmon, localizado no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, e uma habitação unifamiliar seguindo as especificações do programa Minha Casa Minha Vida com o objetivo de descrever a atuação do permutador de calor solo-ar na diminuição da temperatura e a melhora do conforto térmico dos ocupantes nesses dois casos.

Primeiramente foi realizada uma pesquisa acerca do solo da região da edificação com o objetivo de definir o tipo de solo que será usado como parâmetro de entrada para o software de simulação.

Em seguida, são definidos os parâmetros de entrada da simulação dos tubos com o intuito de avaliar a influência dos seis parâmetros principais: troca de ar, comprimento do tubo, profundidade, diâmetro, cobertura do solo e material utilizado no desempenho térmico das duas edificações estudadas.

Feito isso, as duas edificações são modeladas no software *DesignBuilder* de acordo com os projetos arquitetônicos disponíveis considerando os aspectos de materiais construtivos, aberturas, ocupação e iluminação com o propósito de obter o desempenho térmico dos dois casos sem a consideração de nenhuma forma de climatização e dar suporte às análises decorrentes da implementação da ventilação através de tubos enterrados.

Com a implementação do permutador no software, são realizadas diversas simulações utilizando o *EnergyPlus*, que está acoplado ao *DesignBuilder*, alterando-se cada um dos seis parâmetros para fazer o estudo de o quanto a temperatura é sensível a cada um deles.

Por fim são realizadas as análises dos resultados e as conclusões gerais da pesquisa juntamente com a proposição de futuros trabalhos na área.

#### **4.1. ARQUIVO CLIMÁTICO**

Para os dois casos estudados o local a ser considerado tanto para a simulação anual de desempenho térmico quanto para as considerações de temperatura do solo foi a de Brasília-DF por meio do arquivo climático Brasília-(IWEC) disponível no próprio software *DesignBuilder* o qual apresenta as condições meteorológicas da região tais como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento ao longo do ano além de informações acerca da localização (latitude e longitude) e elevação topográfica.

#### **4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**

O Distrito Federal possui uma geomorfologia distribuída em chapadas com predominância de relevo residual e aplainado com topografia plana e levemente ondulada. A caracterização geológica do DF divide o território nos grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. No Plano Piloto o grupo geológico é o Paranoá com solos dos tipos latossolo vermelho, cambissolo e latossolo vermelho-amarelo. (BLANCO, 1995; CARDOSO, 2002 *in* SOUSA JÚNIOR, 2017).

Utilizando estudos que descreviam o perfil geológico, geotécnico e mineralógico do subsolo do campus experimental da UnB, SOUSA JÚNIOR (2017) determinou, através de correlações, a condutividade térmica e a capacidade de calor específica do solo ao longo de sua profundidade como mostra a figura 21. Como já descrito anteriormente o programa *Calcsoilstrfemp* do *EnergyPlus* classifica o solo ao longo da profundidade em quatro tipos (tabela 6). Essa classificação carrega consigo uma consideração de caráter paramétrico de acordo com as propriedades de condutividade e difusividade térmica do solo conforme é descrito na tabela 7 mostrada a seguir:

Tabela 7 - Parâmetros térmicos do solo do software *EnergyPlus*. (GONZALES, 2017).

Tipo de solo	$k_s$ (W/m.K)	$\alpha_s$ (m <sup>2</sup> /s)
<i>Heavy and Saturated</i>	2,42	9,04 <sup>-07</sup>
<i>Heavy and Damp</i>	1,30	6,45 <sup>-07</sup>
<i>Heavy and Dry</i>	0,865	5,16 <sup>-07</sup>
<i>Light and Dry</i>	0,346	2,80 <sup>-07</sup>

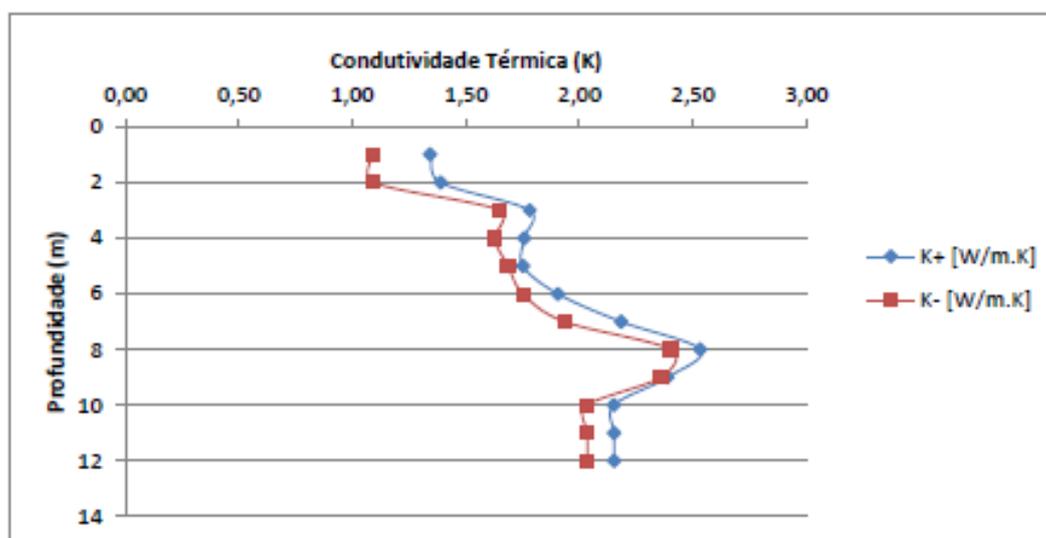


Figura 21- Perfil de condutividade térmica para o solo de Brasília. SOUSA JÚNIOR (2017).

A partir da análise dos parâmetros de entrada considerados pelo *EnergyPlus* e pelo perfil de condutividade térmica do solo obtida por SOUSA JÚNIOR (2017) o solo escolhido foi o do tipo *Heavy and Damp* para fins de simulação já que para os valores de profundidade da tubulação a serem simulados (0,75 m a 6,00 m) os valores de condutividade térmica ficam compreendidos no intervalo de 1,10-1,90 w/mK que são mais próximos do tipo de solo considerado pelo software *EnergyPlus*.

#### 4.3. SIMULAÇÕES COM PERMUTADORES DE CALOR (PJC)

Com o objetivo de analisar os parâmetros envolvidos no permutador de calor solo-ar serão realizadas uma série de 16 simulações para o caso da implementação no Pavilhão João Calmon. Os parâmetros de entrada do software *EnergyPlus* v8.3 são descritos na tabela 8. A metodologia de análise de cada parâmetro consiste em fixar os demais e variar o que está em análise. O resultado das simulações será mostrado em gráficos na seção 6.

Tabela 8 - Parâmetros das simulações com tubos enterrados. PJC

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR - ACH					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
P1	5	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P2	10	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P3	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P4	20	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
P5	15	20	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P6	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P3	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P7	15	200	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
P3	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P8	15	100	Aço 50 (W/mK)	1,5	0,05
P9	15	100	Aço 50 (W/mK)	4,5	0,05
P10	15	100	Aço 50 (W/mK)	6	0,05
INFLUÊNCIA DO RAIOS					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
P11	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,2
P3	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P12	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,01
INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
P3	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
P13	15	100	Concreto 2,0 (W/mK)	0,75	0,05
P14	15	100	PVC 0,17 (W/mK)	0,75	0,05

INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO						
SIMULAÇÃO	ACH	L	Material	Profundidade	Raio	Cobertura do solo
P3	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05	Covered and Wet
P15	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05	Bare and Wet
P16	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05	Bare and Dry

#### 4.4. SIMULAÇÕES COM PERMUTADORES DE CALOR (HABITAÇÃO)

Similarmente ao que foi descrito para o Pavilhão João Calmon será feito para o caso da habitação unifamiliar. Os parâmetros simulados em 16 simulações com permutadores de calor na habitação são descritos na tabela 9 a seguir:

Tabela 9 - Parâmetros das simulações com tubos enterrados. Habitação

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR - ACH					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
C1	5	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C2	10	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C3	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C4	20	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
C5	15	20	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C3	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C6	15	100	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C7	15	200	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
C3	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C8	15	60	Aço 50 (W/mK)	1,5	0,05
C9	15	60	Aço 50 (W/mK)	4,5	0,05
C10	15	60	Aço 50 (W/mK)	6	0,05
INFLUÊNCIA DO RAI0					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
C11	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,2
C3	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C12	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,01
INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS					
SIMULAÇÃO	ACH	L (m)	Material	Profundidade	Raio (m)
C3	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05
C13	15	60	Concreto 2,0 (W/mK)	0,75	0,05
C14	15	60	PVC 0,17 (W/mK)	0,75	0,05

INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO						
SIMULAÇÃO	ACH	L	Material	Profundidade	Raio	Cobertura do solo
C3	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05	Covered and Wet
C15	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05	Bare and Wet
C16	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05	Bare and Dry

## 5. MODELAGEM DOS DOIS EDIFÍCIOS ESTUDADOS

Nessa seção do trabalho são descritos os aspectos levados em conta na escolha e modelagem das duas edificações do Pavilhão João Calmon e da habitação popular tais como arquitetura, materiais, configurações de ocupação e iluminação que são variáveis fundamentais na análise de conforto térmico que servirá de base para a avaliação do sistema de ventilação geotérmica em estudo. As figuras 22 e 23 mostram o resultado final das duas modelagens no software *DesignBuilder*.

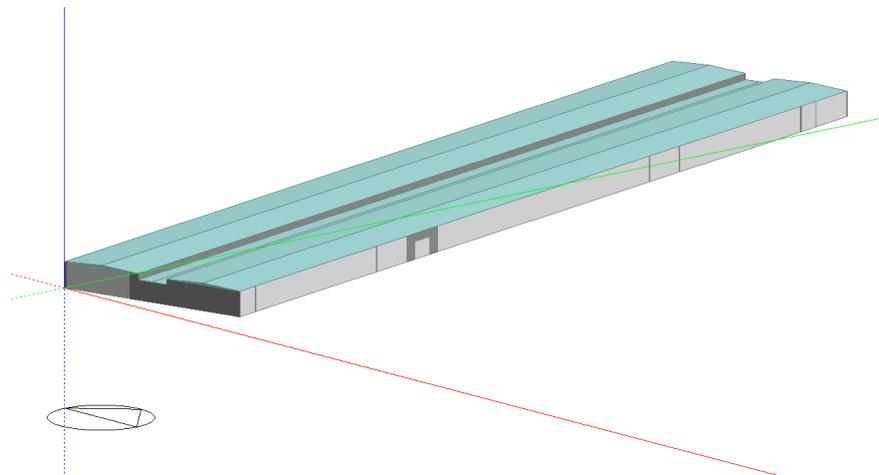


Figura 22 – Modelagem do Pavilhão João Calmon.



Figura 23 – Modelagem da residência unifamiliar.

### 5.1. EDIFICAÇÃO EDUCACIONAL - PAVILHÃO JOÃO CALMON

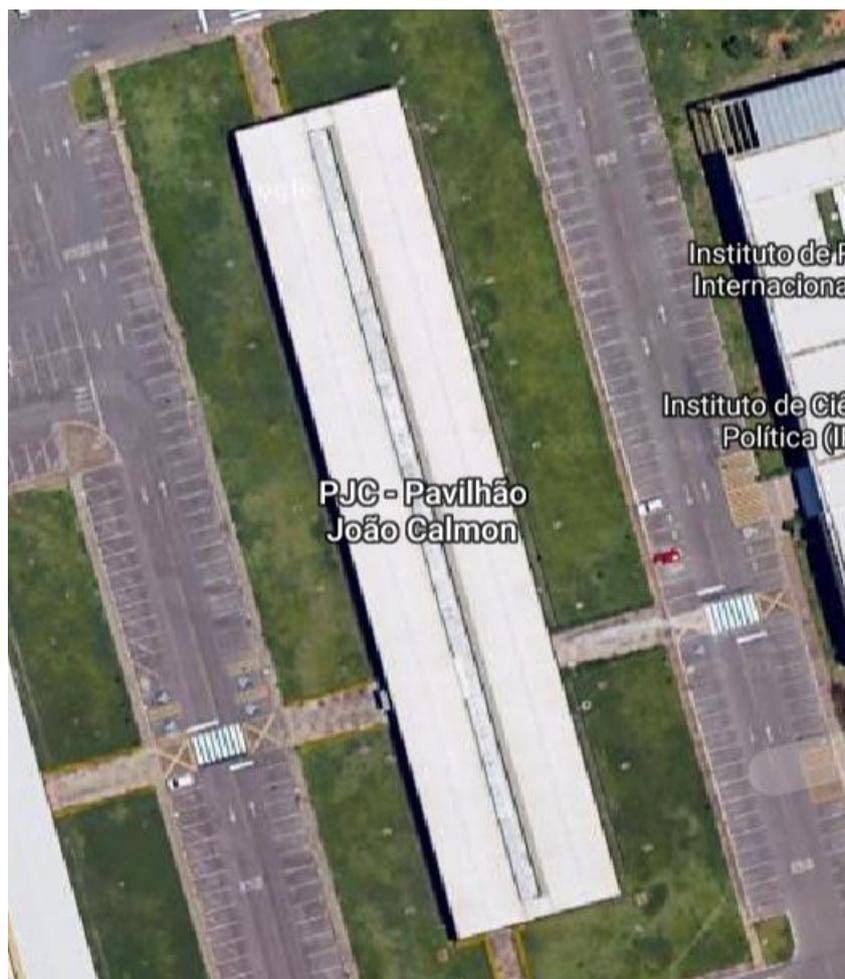


Figura 24 – Pavilhão João Calmon. GoogleMaps.

O Pavilhão João Calmon é um bloco de salas de aula localizado no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Trata-se de uma edificação térrea composta majoritariamente de salas de aula além de alguns espaços para funcionários e atividades administrativas. A edificação comporta as aulas dos mais variados cursos e suas salas recebem turmas de cerca de 50 alunos nos horários de 8:00 a 22:00 horas. Os usuários dessa edificação, que não conta com nenhum sistema de resfriamento ativo, reclamam do calor excessivo durante as aulas. (BORGES, 2018).

Em 2015, O Ministério Público Federal recomendou que a Universidade de Brasília tomasse providências para garantir o conforto térmico dos usuários da instituição. Na recomendação consta pedidos de alterações arquitetônicas nos Pavilhões João Calmon e Anísio Teixeira. (Jornal de Brasília, 2015).

A partir da planta arquitetônica fornecida pelo CEPLAN foi possível modelar a edificação no *DesignBuilder* e inserir as informações de materiais construtivos, aberturas, divisão e uso da edificação.

### 5.1.1. ARQUITETURA

A edificação possui 120m x 24 m e consiste de salas de aula, uma área de descanso para funcionários, uma lanchonete com área para preparação de comidas, dois banheiros de uso coletivo, um corredor que dá acesso a todas essas áreas e duas saídas laterais. O corredor central possui pé-direito de 2,40 m enquanto as salas e outros ambientes possuem pé-direito de 3,15 m.

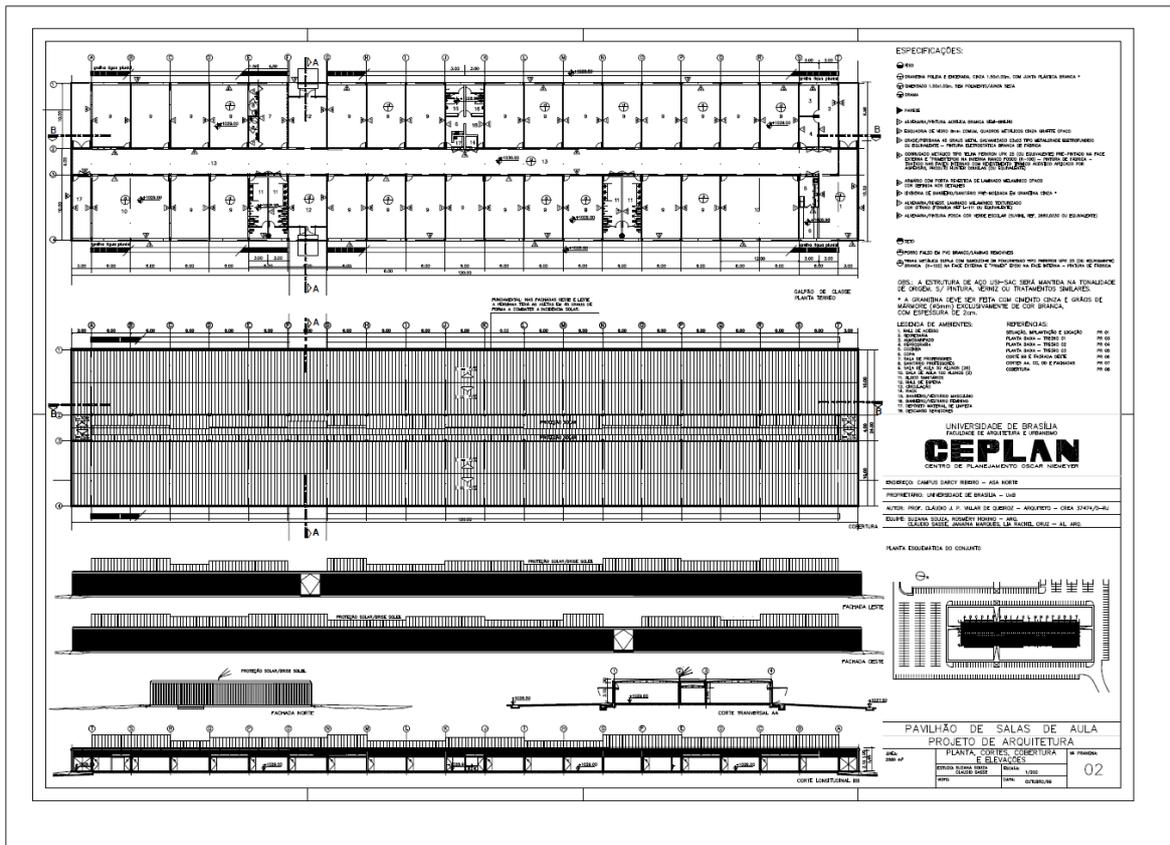


Figura 25- Planta do Pavilhão João Calmon. CEPLAN

### 5.1.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

As paredes internas do edifício são constituídas de alvenaria revestida internamente e externamente de argamassa totalizando uma largura total de 14 cm. A pintura é acrílica branca semi-brilho. A figura 26 ilustra a configuração definida no *Designbuilder*.

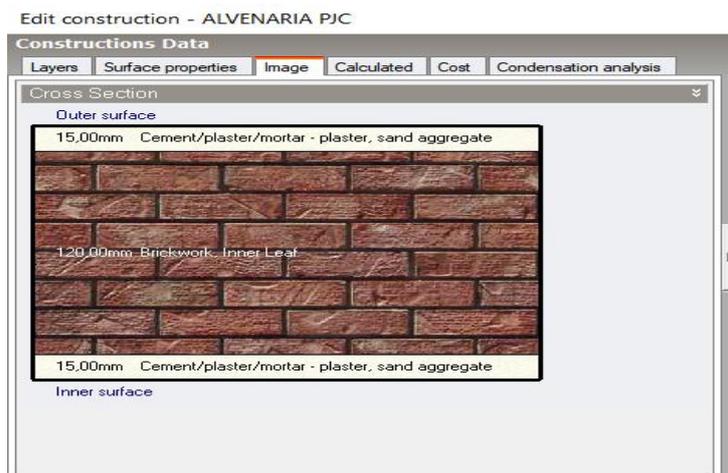


Figura 26 - Configuração de paredes internas em alvenaria do Pavilhão João Calmon.

O teto da edificação consiste em telha metálica dupla com sanduíche de poliuretano tipo Perkron UPK 25 branca na face externa e primer epóxi na face interna com forro falso em PVC branco. Essas configurações foram inseridas no software como mostrado na figura 27.

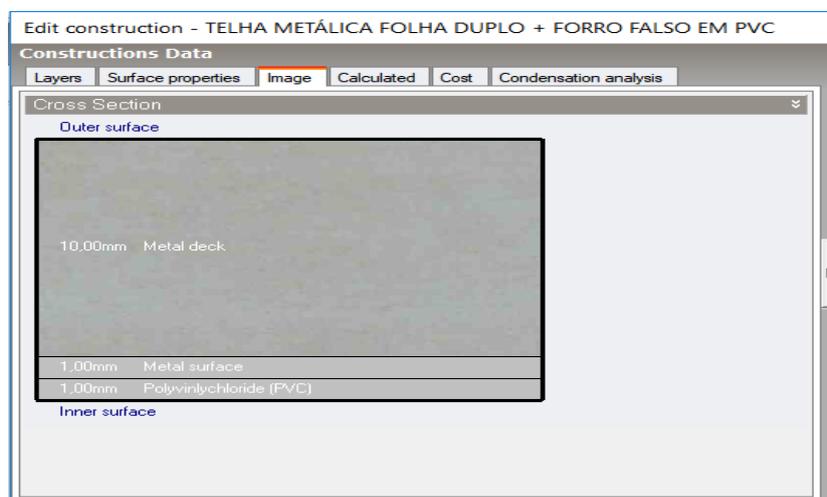


Figura 27 - Configuração de teto do Pavilhão João Calmon.

O piso da edificação é de granitina polida e encerada, cinza de 1,50x1,00 m com junta plástica branca. Para a modelagem no software foi adotado uma camada única de 100 mm de espessura como mostrado na figura 28.



Figura 28- Configuração de piso do Pavilhão João Calmon.

As paredes externas das faces Sul e Norte do edifício são compostas de um corrugado metálico tipo telha Pekron UPK 25 nas faces externas e primer epoxi nas internas com preenchimento de material termo-acústico. No software essas paredes foram definidas como mostra a figura 29.



Figura 29 - Configuração de paredes metálicas do Pavilhão João Calmon.

As fachadas Leste e Oeste do edifício são constituídas de uma esquadria de vidro 8 mm comum em quadros metálicos cinza interna a um brise metálico constituído de uma grade em 45° de metal galvanizado tipo metalgrade. A figura 30 mostra a opção type-fill surface (100%) para que o vidro ocupe toda a fachada e a configuração do brise metálico denominado *PJC. Brise+Vidro* configurado externamente.

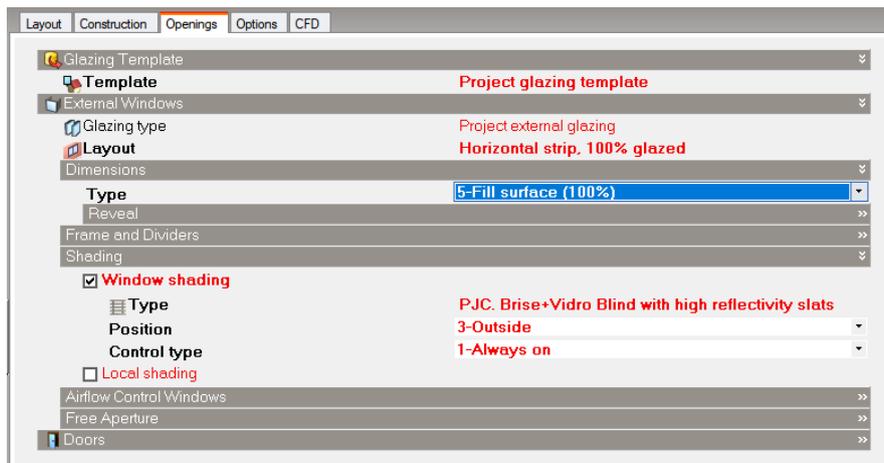


Figura 30 - Configuração da lateral do Pavilhão João Calmon em vidro e brise metálico

A figura 31 ilustra o lançamento das medidas do brise metálico coletadas no projeto e verificadas *in loco*. Nota-se o lançamento da angulação em  $45^\circ$ , o espaçamento de 35 cm com relação ao vidro e os espaçamentos de 3 cm entre cada chapa metálica de 3 cm de comprimento.

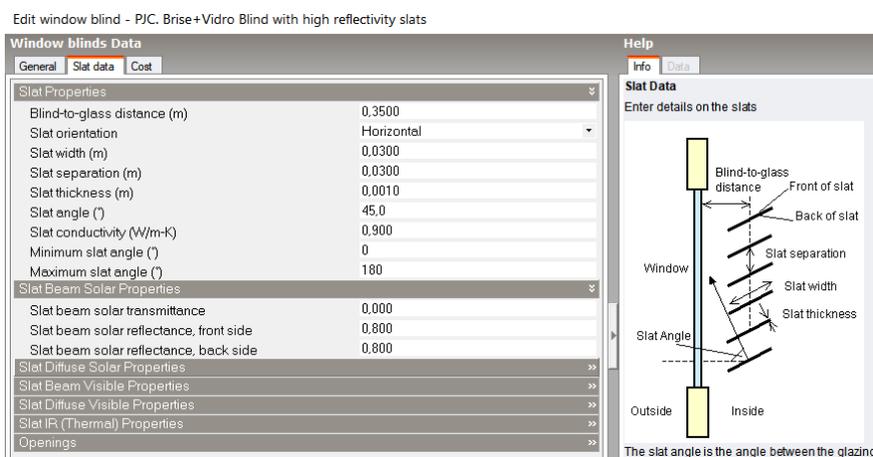


Figura 31 – Modelagem do brise metálico com as medidas realizadas

### 5.1.3. OCUPAÇÃO E ILUMINAÇÃO

Devido ao grande número de ambientes do Pavilhão João Calmon e objetivando uma maior velocidade das simulações optou-se por agrupar as salas de aula adjacentes em uma única zona térmica resultando em seis zonas térmicas de salas de aula, as demais foram deixadas da maneira com que foram originalmente previstas no projeto arquitetônico.

Cada zona foi classificada de acordo com suas atividades por meio da aba “*Activity*” do *DesignBuilder*. Essa classificação informa ao software as informações acerca da densidade de cada espaço, taxas metabólicas e equipamentos presentes. As salas de aula foram definidas como “*Teaching Areas*” na pasta “*Education*” do software que possui valores padrão para cada variável envolvida.

Para a iluminação foi usada a configuração “*Reference*” da guia “*Lighting*” para todas as zonas do edifício e operação de cada zona foi classificada de acordo com o seu uso. A figura 32 ilustra o PJC com todas as classificações de zonas adotadas.

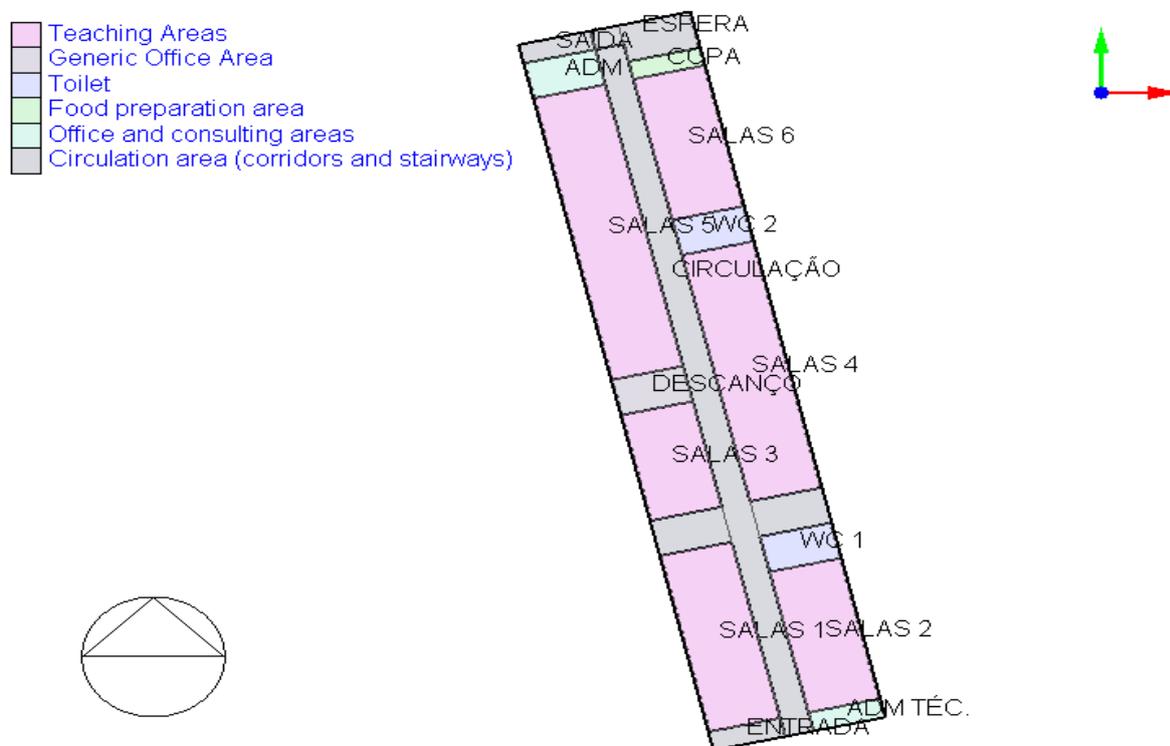


Figura 32 – Divisão do edifício segundo zonas e ocupação

## 5.2. HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL

No presente trabalho será avaliada também a influência dos permutadores de calor solar no conforto térmico de usuários de uma habitação que segue as especificações a serem atendidas pelo programa do Governo Federal “*Minha Casa, Minha Vida*” que representam uma tendência atual da construção residencial no Brasil. As características tipológicas e geométricas

dessa habitação foram obtidas do trabalho de OLIVEIRA (2012) que estudou as propriedades térmicas dos fechamentos opacos para habitações desse tipo.

### 5.2.1. ARQUITETURA

O projeto arquitetônico da habitação consiste em dois dormitórios, uma sala e cozinha conjugadas e um banheiro resultando em uma área de 40,8 m<sup>2</sup>. A habitação possui um pé-direito de 2,70 m além de beirais nas faces norte e sul com 0,80 m. A figura 32 apresenta a planta baixa da habitação.

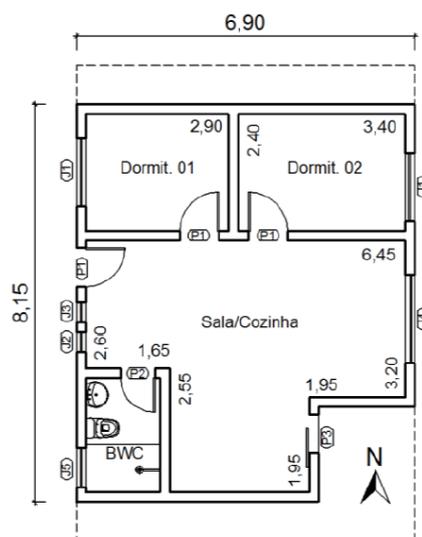


Figura 33- Planta baixa da habitação. (OLIVEIRA, 2012).

### 5.2.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Para a modelagem da habitação foram configurados no software *DesignBuilder* como fechamentos opacos e divisórias internas as paredes de alvenaria com 14 cm de largura compostas de tijolos cerâmicos assentados e revestidos com 2,5 cm de argamassa internamente e externamente e pintura externa na cor branca conforme mostra a figura 33. Como fechamento superior foi configurada a existência de uma laje de concreto armado com 10 cm de espessura coberta externamente com telhado em fibrocimento conforme descrita na figura 34. Para o piso da habitação foi considerado como sendo de concreto com 10 cm de espessura conforme mostra a figura 35.



Figura 34 - Configuração de paredes em alvenaria da habitação.



Figura 35 - Configuração de teto da habitação.



Figura 36- Configuração de piso da habitação.

### 5.2.3. OCUPAÇÃO E ILUMINAÇÃO

Para a habitação, cada cômodo foi considerado como uma zona térmica distinta resultando em quatro zonas classificadas de acordo com o seu uso por meio da aba “*Activity*” na pasta “*Residential Spaces*” do software. Para a iluminação foi usada a configuração “*Reference*” da guia “*Lighting*” para todo o edifício e operação de cada zona foi classificada de acordo com o seu uso. A figura 32 ilustra a habitação com todas as classificações adotadas.

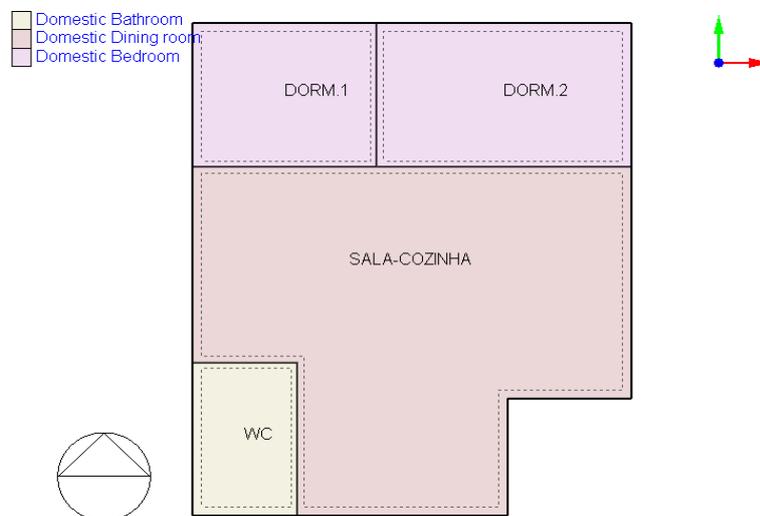


Figura 37 – Divisão da residência conforme os cômodos

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de diversas simulações variando-se os valores de taxa de renovação de ar das zonas, que reflete na vazão que o ventilador gera na tubulação, de comprimento do tubo, de profundidade enterrada, de diâmetro do tubo, de condutividade térmica do tubo devido ao uso de outro material e de cobertura do solo em que o tubo está enterrado observou-se a influência do sistema de ventilação geotérmica na temperatura operativa das zonas térmicas e no conforto adaptativo dos usuários. Foi possível perceber que as zonas térmicas localizadas a Oeste foram consideravelmente mais afetadas do que as localizadas na fachada Leste. As figuras 38 e 39 ilustram a porcentagem de horas de conforto dos usuários nas zonas térmicas de salas de aula do Pavilhão João Calmon e nas zonas da habitação unifamiliar respectivamente nas situações sem permutador de calor e com a implementação dos tubos (P03 e C03).

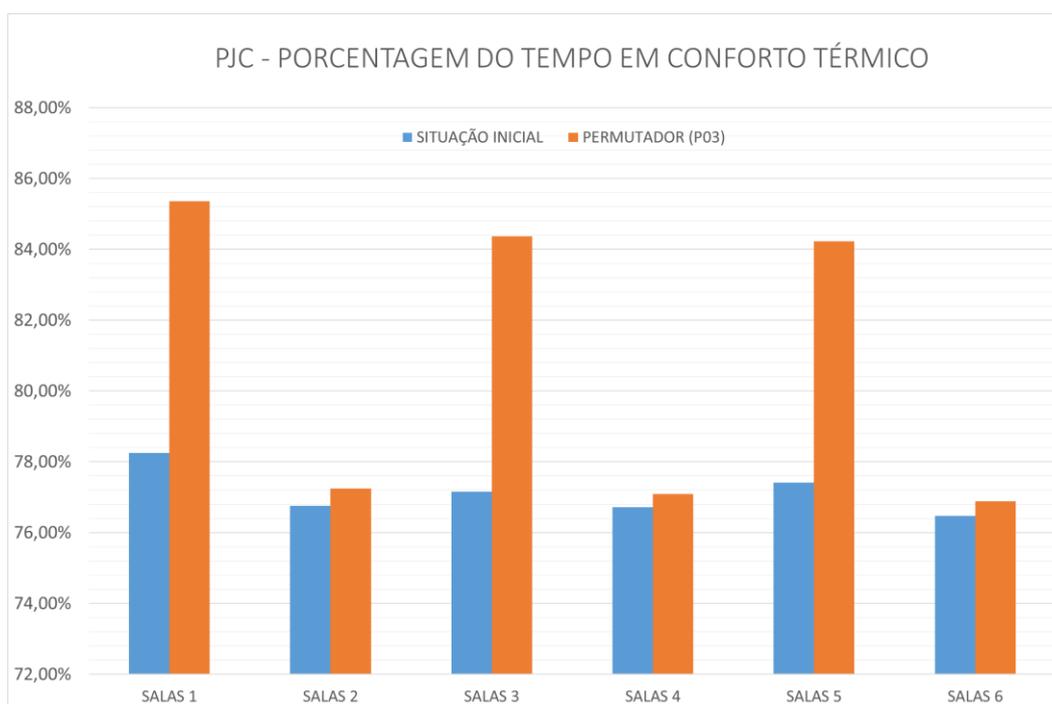


Figura 38 – Aumento do número de horas de conforto nas zonas térmicas do PJC

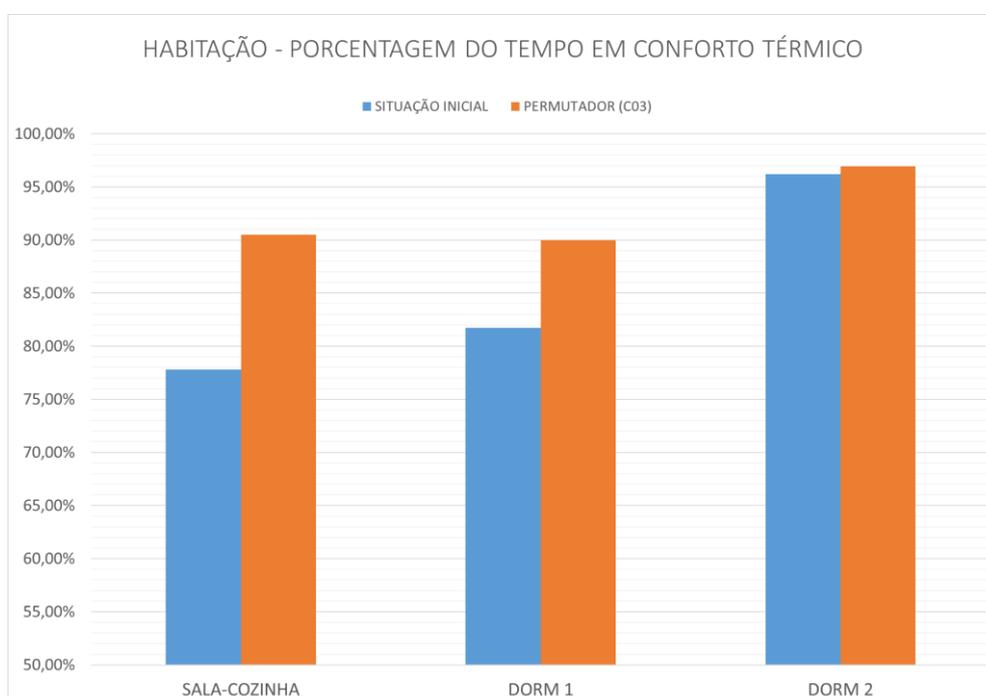


Figura 39 – Aumento do número de horas de conforto nas zonas térmicas da habitação

Tendo em vista o exposto anteriormente, a análise paramétrica do permutador de calor solo-ar será feita com base na zona térmica “SALAS 1” para representar o PJC e na zona térmica

“SALA-COZINHA” para representar o efeito sobre a habitação, de modo que os gráficos apresentados não se tornem demasiadamente numerosos. Dessa forma, nos próximos tópicos serão apresentados os gráficos de temperatura operativa dessas zonas térmicas dos dois edifícios ao longo do ano consoante as mudanças de parâmetros adotadas nas simulações.

## 6.1. TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR (ACH)

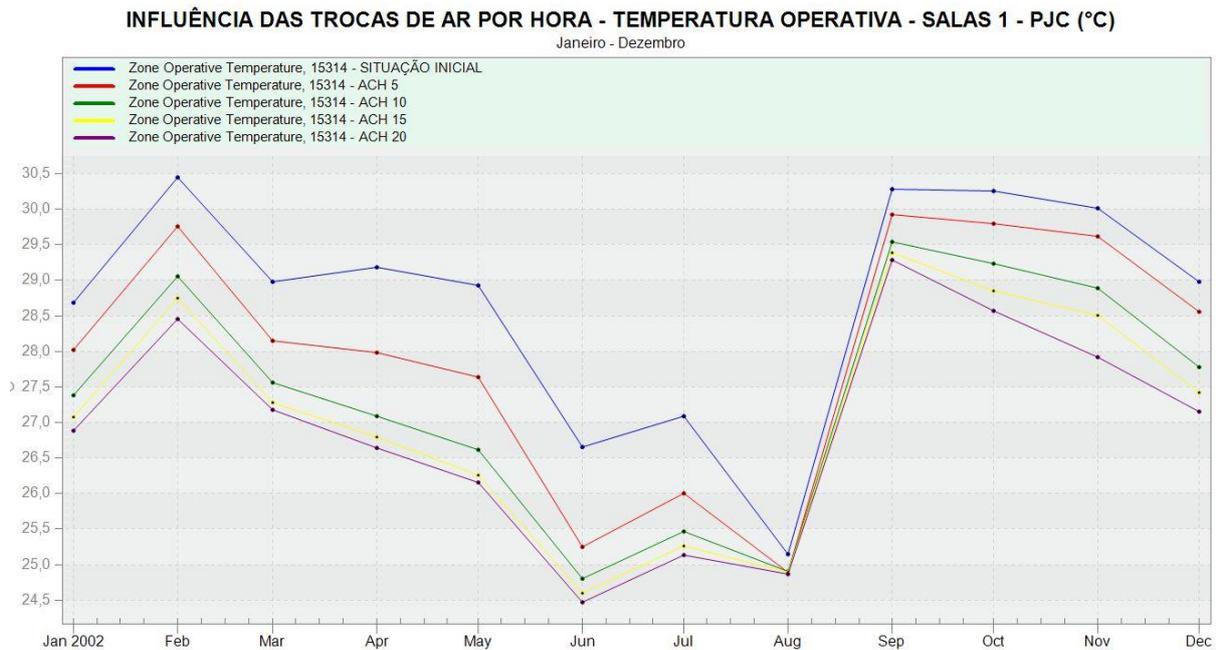


Figura 40 – Influência da taxa de renovação de ar na temperatura operativa das salas 1 do PJC

### INFLUÊNCIA TROCAS DE AR POR HORA - TEMPERATURA OPERATIVA - SALA/COZINHA - HABITAÇÃO - (°C)

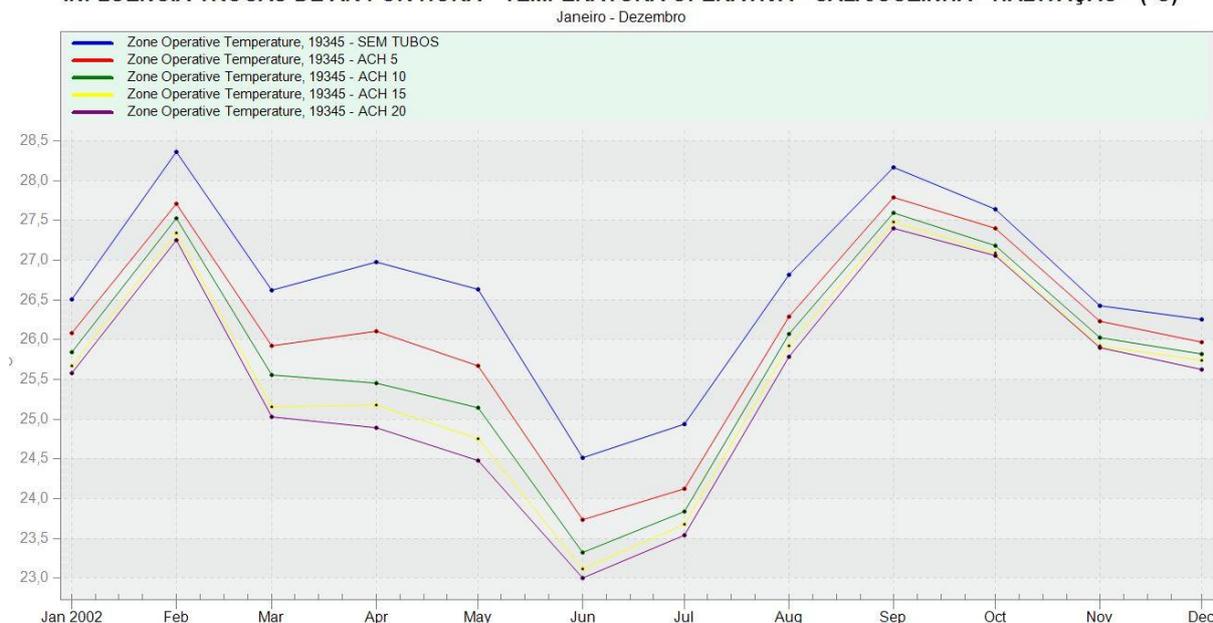


Figura 41 – Influência da taxa de renovação de ar na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação

É possível afirmar ao analisar os gráficos resultantes das simulações que a taxa de renovação de ar é a variável que mais exerceu influência na diminuição de temperatura e no aumento de conforto térmico dos usuários.

Na zona térmica do PJC, há uma queda na temperatura operativa de cerca de 0,7 °C ao se passar de 5 renovações de ar por hora para 10, uma queda adicional de 0,3 °C ocorre ao se passar para 15 renovações e de cerca de 0,2 °C adicionais na passagem de 15 para 20 renovações. Para a sala/cozinha da habitação as quedas nas temperaturas operativas para os mesmos valores de renovações de ar são de 0,30 °C, 0,2 °C e 0,13 °C.

## 6.2. COMPRIMENTO DO TUBO

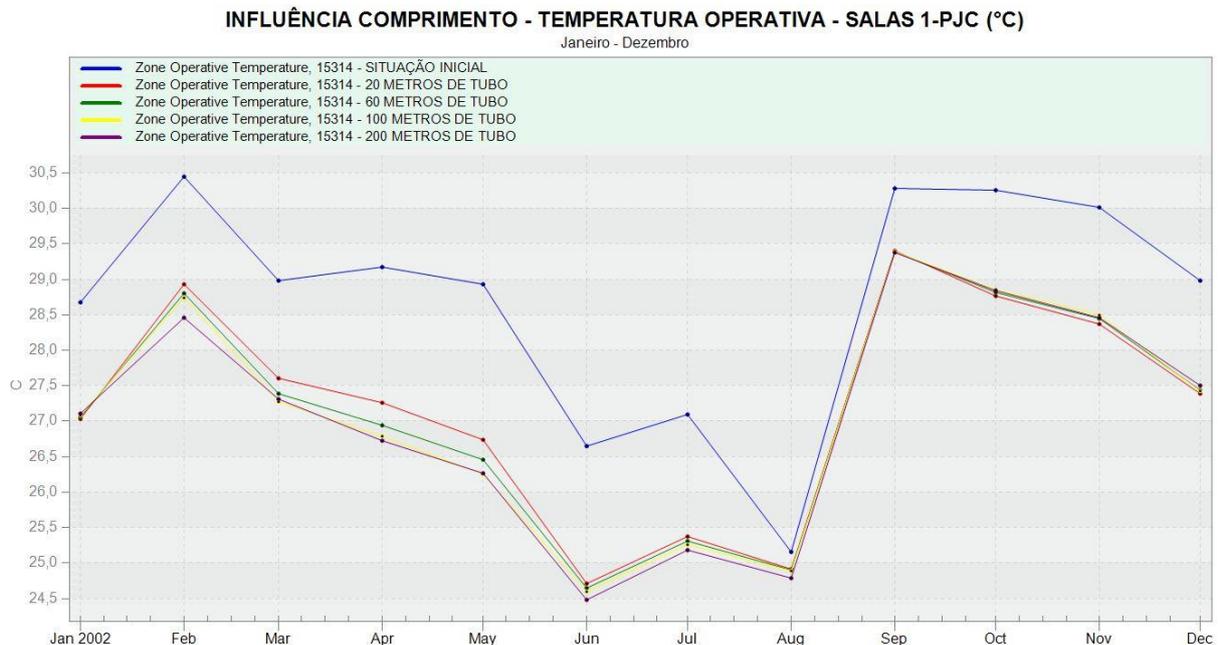


Figura 42 – Influência do comprimento da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC

Para o grupo de salas 1 do Pavilhão João Calmon foi possível observar que no intervalo dos meses de fevereiro a setembro, o aumento no comprimento da tubulação atual de maneira a diminuir a temperatura da zona térmica sendo mais significativa durante os meses de março a maio implicando em uma diminuição de aproximadamente  $0,3^{\circ}\text{C}$  para um aumento de 20 a 100 m de tubulação. No intervalo de outubro a janeiro não há vantagem ao arrefecimento do edifício ao se utilizar maiores comprimentos de tubulação. No caso da edificação em questão, aspectos de caráter construtivo teriam importância na escolha de um comprimento adequado que permitisse a distribuição de ar para o interior do edifício.

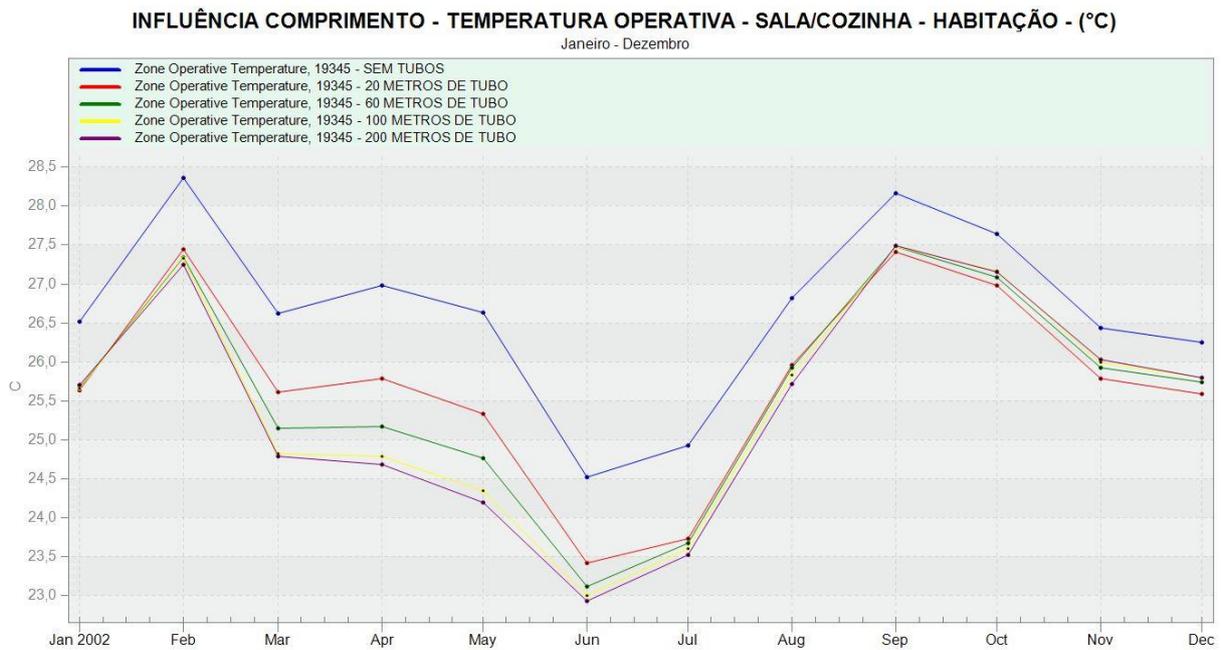


Figura 43 – Influência do comprimento da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação

No caso da sala/cozinha da habitação, no intervalo dos meses de fevereiro a setembro, o aumento no comprimento da tubulação atua de maneira a diminuir a temperatura da zona térmica sendo mais significativa durante os meses de março a junho implicando em uma diminuição de aproximadamente  $0,5^{\circ}\text{C}$  para um aumento de 20 para 60 m e uma diminuição adicional de  $0,3^{\circ}\text{C}$  quando se aumenta de 60 para 100 m de tubulação. No intervalo de setembro a janeiro não há vantagem ao arrefecimento do edifício ao se utilizar maiores comprimentos de tubulação. Como esperado, para uma edificação de menores dimensões, o comprimento da tubulação se mostrou mais relevante para o resfriamento do que no caso do Pavilhão João Calmon.

### 6.3. PROFUNDIDADE DO TUBO ENTERRADO

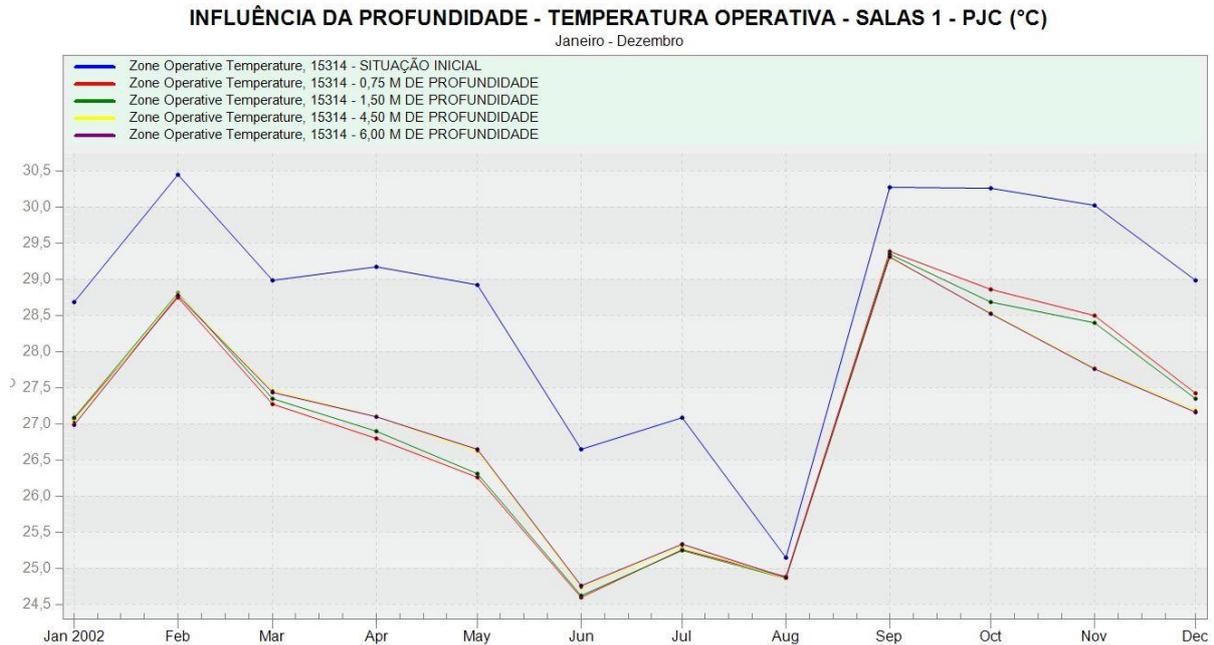


Figura 44 – Influência da profundidade da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC

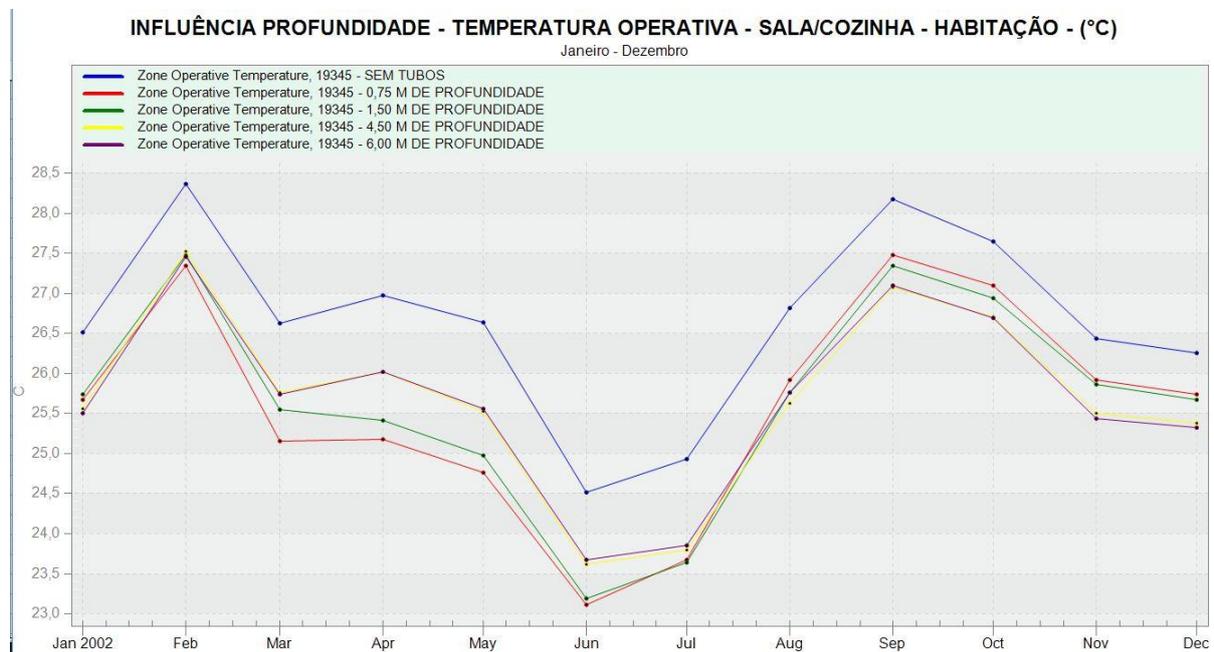


Figura 45 – Influência da profundidade da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação

Com relação à variação de profundidade de colocação do tubo do permutador de calor os gráficos das figuras 44 e 45 mostram que, para as duas edificações, há um aumento na

temperatura operativas dos edifícios com o aumento progressivo da profundidade para o primeiro semestre do ano no entanto, para o segundo semestre, o aumento na profundidade gera uma diminuição das temperaturas. Numericamente, esses dois fenômenos, guardam uma certa simetria, ou seja, o aumento da temperatura na primeira metade do período é aproximadamente equivalente à sua diminuição no segundo.

Dessa maneira, é possível afirmar que na adoção de uma determinada profundidade para as tubulações é preferível que esta não seja muito profunda pois os custos adicionais de escavação, segundo as simulações feitas, não se concretizam em um desempenho superior do sistema de climatização proposto.

#### 6.4. DIÂMETRO DO TUBO

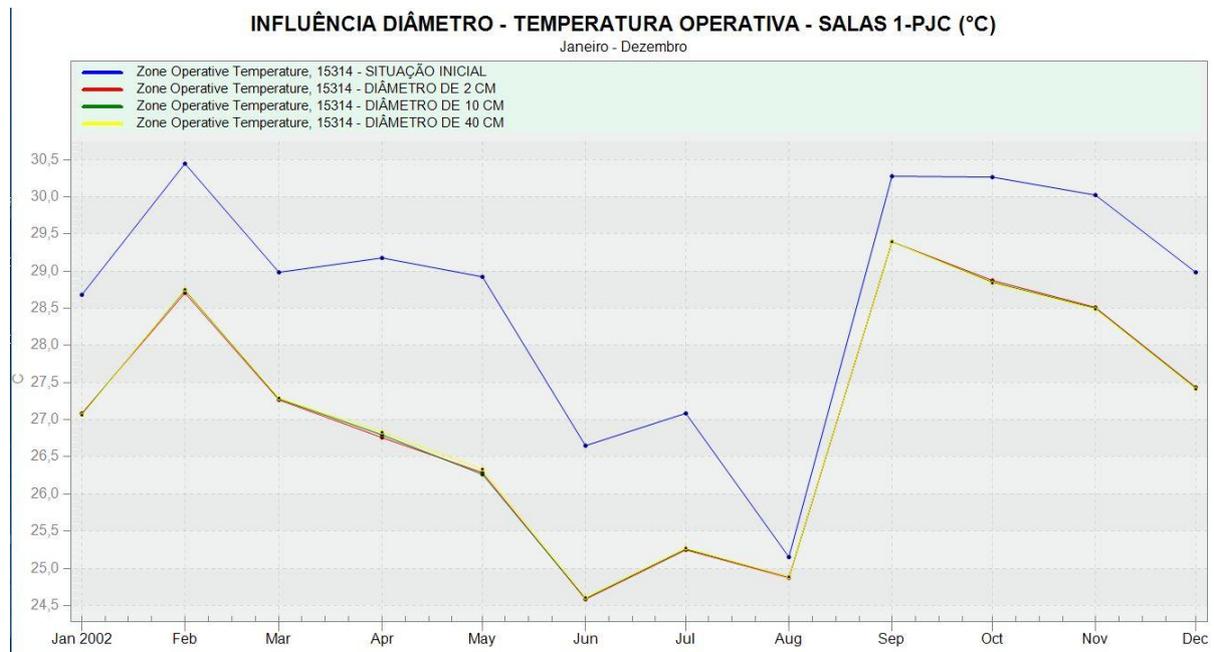


Figura 46 – Influência do diâmetro da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC

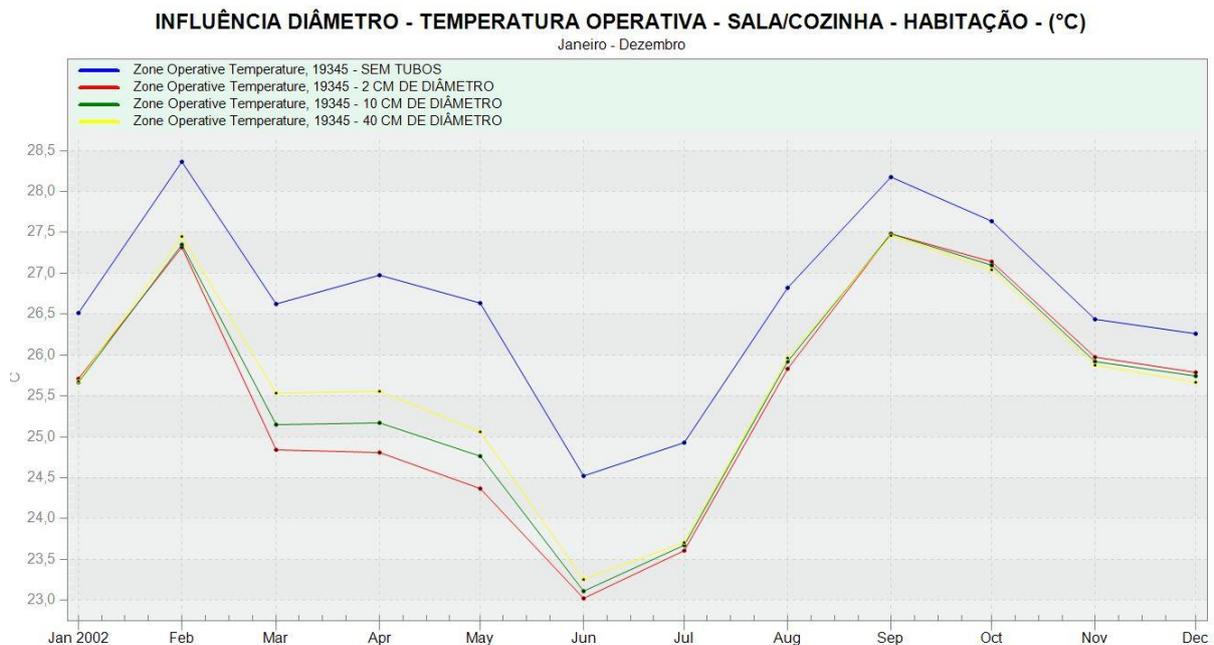


Figura 47 – Influência do diâmetro da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação

A variação do diâmetro da tubulação, como mostra o gráfico da figura 46, para o caso do PJC, não gera efeitos consideráveis para a temperatura operativa do ambiente.

No caso da habitação, é possível perceber, no período de março a maio, que o aumento do diâmetro da tubulação de 20 mm para 100 mm resulta em um aumento de cerca de 0,2 °C na temperatura operativa e de mais 0,2 °C quando se aumenta de 100 mm para 400 mm sendo, portanto, desejável o uso de menores diâmetros para o arrefecimento da habitação. Nos demais meses há uma equivalência no desempenho dos diversos diâmetros.

## 6.5. MATERIAL DO TUBO

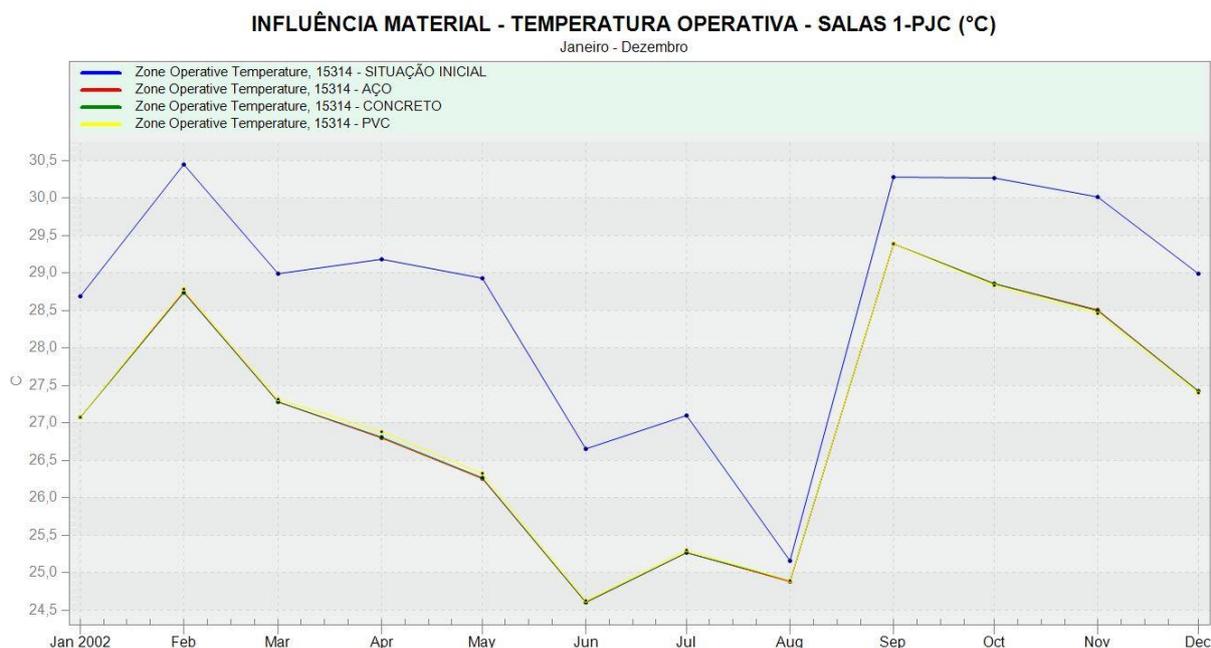


Figura 48 – Influência do material da tubulação na temperatura operativa das salas 1 do PJC

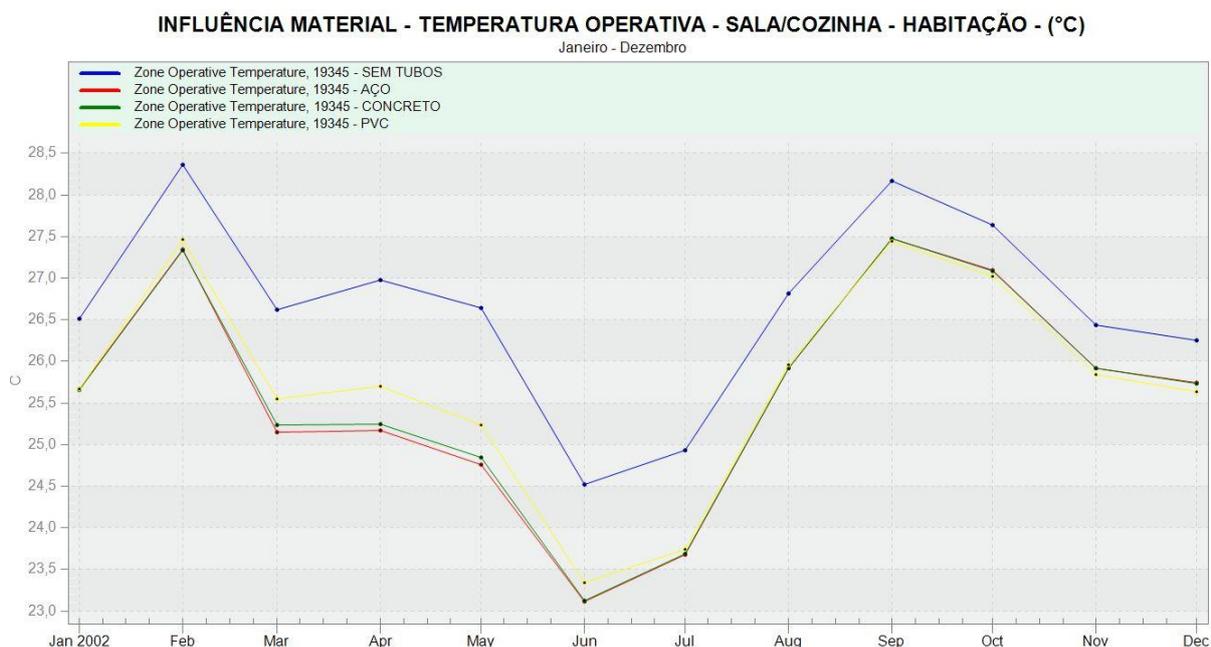


Figura 49 – Influência do material da tubulação na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação

Para as salas do PJC não houve importância no material da tubulação para o desempenho da ventilação por tubos enterrados. No entanto, para a habitação, a utilização de PVC como material se mostrou desvantajosa na medida que resultou em temperaturas operativas, em média 0,3°C maiores, para o período de fevereiro a junho. Portanto, é desejável a utilização de aço ou concreto desde que destes não resultem custos elevados para o *EAHE*.

## 6.6. COBERTURA DO SOLO

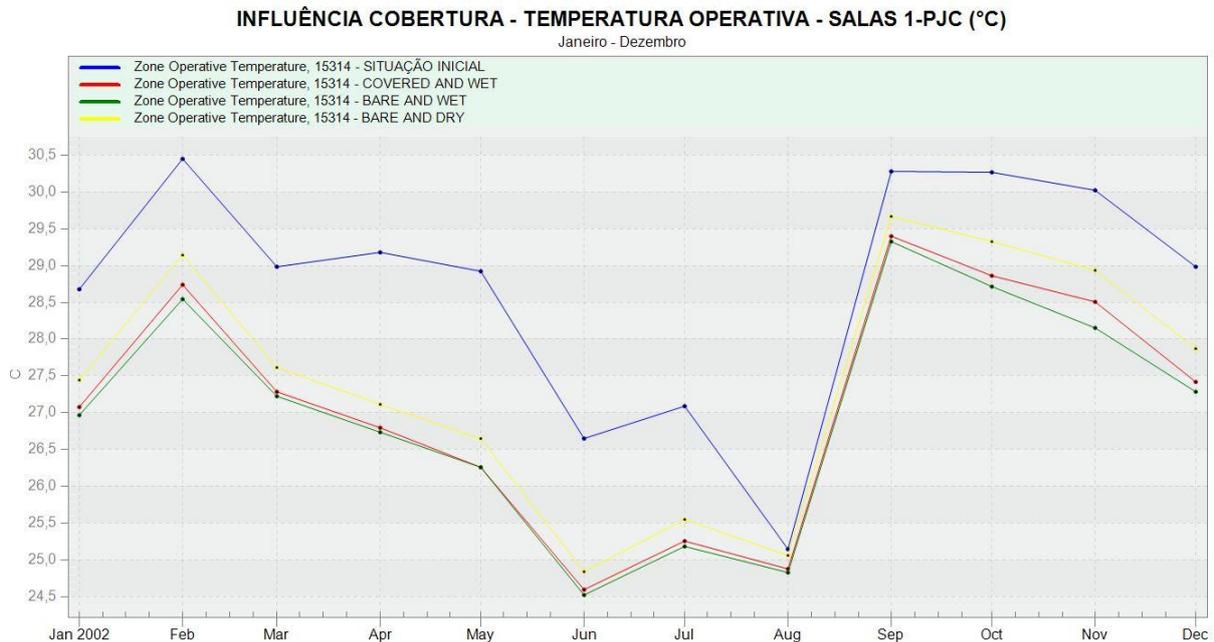


Figura 50 – Influência da cobertura do solo na temperatura operativa das salas 1 do PJC

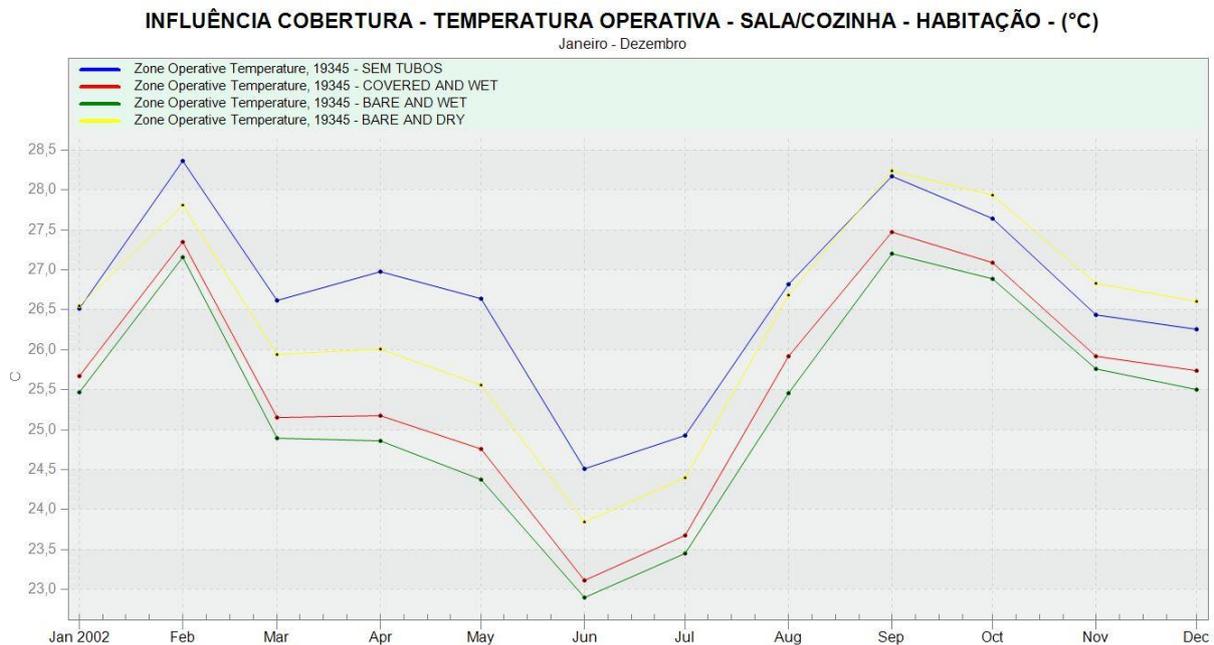


Figura 51 – Influência da cobertura do solo na temperatura operativa da sala/cozinha da habitação

Em ambos os casos, um solo seco, apresenta um impacto negativo resultando em maiores temperaturas operativas sendo esse fator responsável por um aumento médio de 0,7 °C para a habitação e de 0,3 °C para a edificação educacional. Para um sólido úmido, uma

cobertura atua de maneira desvantajosa no sistema, aumentando as temperaturas em cerca de 0,1 °C e 0,2 °C no PJC e na habitação respectivamente. Dessa maneira, uma forma mais eficiente para o permutador de calor dos casos estudados deveria prever uma condição úmida e descoberta ao solo.

## 6.7. ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DOS EAHE

Feita as considerações acerca dos parâmetros será feita uma análise da implementação dos permutadores de calor solo-ar sob a ótica do conforto térmico dos usuários. Para isso será simulado os dois casos com os parâmetros mostrados na tabela 10 e apresentados os gráficos do índice de conforto térmico de Fanger anual para as zonas térmicas “salas 1”, “salas 3” e “salas 5” do Pavilhão João Calmon e nas três zonas térmicas da habitação.

Tabela 10 - Parâmetros dos EAHE após análise paramétrica

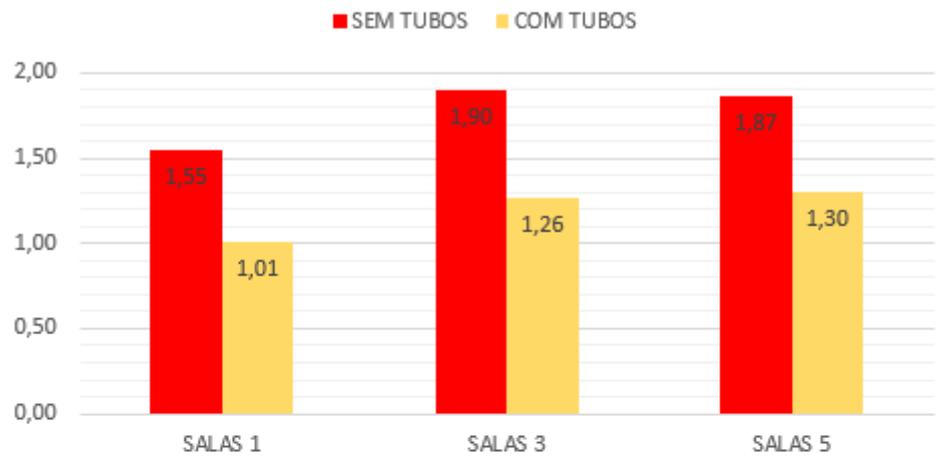
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO - EAHE						
SIMULAÇÃO	ACH	L	Material	Profundidade	Raio	Cobertura do solo
PJC	15	100	PVC 0,17 (W/mK)	0,75	0,05	Bare and Wet
HAB	15	60	Aço 50 (W/mK)	0,75	0,05	Covered and Wet

Os gráficos das figuras 52 e 53 mostram a diminuição nas temperaturas operativas anuais e o impacto no conforto térmico, por meio do índice de Fanger (PMV), das zonas de salas de aula que foram influenciadas pela ventilação geotérmica, no caso do PJC, e nos três cômodos da habitação unifamiliar.

No caso da edificação educacional é possível perceber que houve uma melhora nas condições de conforto com a redução média de 1,8 °C, porém tal melhora não foi suficiente para se atingir o intervalo de conforto -0,5 a +0,5 do PMV.

Já para o caso da habitação é possível notar que as temperaturas operativas, mais amenas do que as do PJC, sofreram uma diminuição de cerca de 1,0 °C que se expressaram no conforto térmico dentro do intervalo desejado para a “Sala/Cozinha” e para “Dormitório 1”. A zona térmica correspondente ao “Dormitório 2” apresentava um leve desconforto ao frio que foi aumentado com a ventilação geotérmica.

## PMV FANGER - ANUAL - PJC



## TEMPERATURA OPERATIVA - MÉDIA ANUAL (°C) PJC

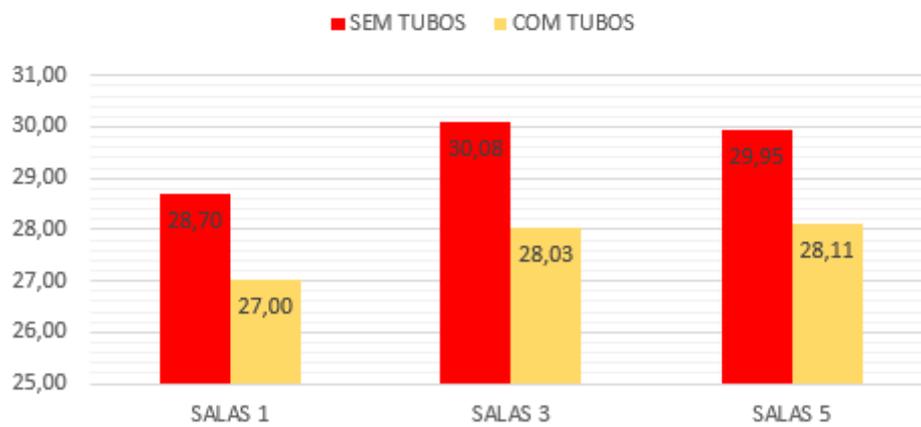


Figura 52 – Índices de conforto térmico (PMV). Salas do Pavilhão João Calmon

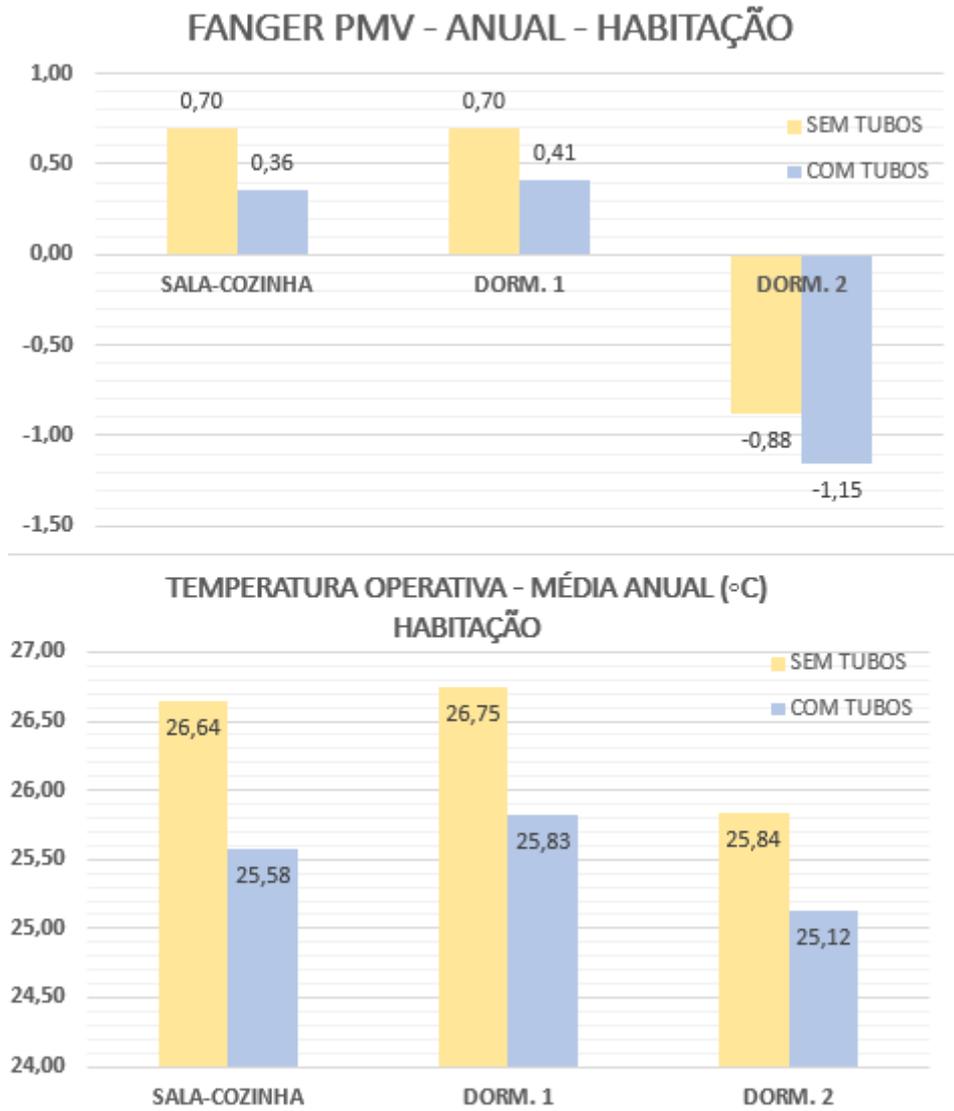


Figura 53 – Índices de conforto térmico (PMV). Zonas da Habitação.

## 7. CONCLUSÕES

Os objetivos gerais deste trabalho foram avaliar o comportamento de permutadores de calor solo-ar (*EAHE*) por meio de simulações computacionais de dois edifícios para o clima e solo de Brasília-DF.

Os resultados das simulações mostraram que as zonas térmicas de cada edificação se comportam de maneira diferente ao serem expostas à ventilação de ar resfriado por meio de tubos enterrados, sendo algumas consideravelmente influenciadas e outras pouco resfriadas de acordo com a sua localização no edifício.

Dando-se o enfoque às zonas mais afetadas pelo sistema de ventilação, foi possível fazer algumas considerações acerca dos parâmetros. Dentre elas: grande influência do número de renovações de ar e portanto da vazão de ar trocado; maiores comprimentos de tubo contribuem para a queda das temperaturas ainda que esta queda não seja numericamente muito grande; a utilização a grandes profundidades não se justifica pois a profundidade a qual a tubulação é enterrada atua de maneira diferente ao longo do ano no desempenho do *EAHE* ora aumentando, ora diminuindo; quanto ao material o PVC se mostrou desvantajoso no caso da habitação e no caso do PJC não houve diferença significativa no uso de materiais diversos e quanto à cobertura do solo é possível dizer que é importante a manutenção de um solo úmido e descoberto para a performance do permutador de calor.

De maneira geral, pela análise do índice PMV antes e depois da solução adotada, é possível afirmar que os permutadores de calor solo-ar se configuram em uma estratégia possível de climatização de edifícios na medida que, para o caso de habitações unifamiliares, levou a um desempenho térmico próximo ao ideal. No caso de edificações maiores e com grande ocupação como o PJC, a implementação do permutador de calor solo-ar levou a um aumento no conforto, porém o índice PMV não chegou a alcançar o intervalo desejado, o que sugere que esse modelo deve ser complementado com a implementação de uma outra solução ( torres de vento, meios ativos de climatização, etc.) para atingir os parâmetros adequados. Realizando-se assim uma combinação de soluções.

Por fim, é possível dizer que o trabalho chegou aos objetivos iniciais, tendo em vista que foi possível verificar os princípios envolvidos no arrefecimento dos edifícios por meio dos tubos enterrados. Contudo, cabe a ressalva que o estudo deve ser continuado e aprofundado de modo a se verificar a viabilidade econômica considerando os custos de implementação, operação e manutenção durante a vida útil e justificar o investimento na implementação de um sistema de ventilação geotérmico perante outras soluções de climatização passiva e ativa.

Também é necessário o estudo da implantação do permutador de calor solo-ar juntamente com outras formas de climatização de edifícios para avaliar as possíveis combinações de soluções existentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 15575 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos.** Rio de Janeiro, 2013.

BISONIYA et al. **Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger (EAHE) systems in India: A review**, Renewable and Sustainable Reviews, Bhopal-Índia,19 (2013), p.239, 11 de Dezembro de 2012.

BISONIYA et al. **Study on Calculation Models of Earth-Air Heat Exchanger Systems**, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Energy, Bhopal-Índia, Volume 2014, Artigo 859286, p.3, 4 de Setembro de 2014.

DIVERSIFIEDPIPING. **Geothermal Energy.** Disponível em: <http://www.diversifiedpiping.com/geothermal.html>. Acessado em: 30/11/2018.

DUSOLENGENHARIA. **Como funciona o Selo Procel?** Disponível em: <https://www.dusolengenharia.com.br/post/como-funciona-o-selo-procel/> Acessado em: 30/11/2018.

BORGES, B. **Utilização de torres de vento em edificações para a maximização do conforto térmico.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

FERRAZ, J. **Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar comparando diferentes modelagens para turbulência.** 2015. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional)- Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2015.

GHIASSI, N. **Development of a Building Data Model for a Performance-Based Optimization Environment.** 2013. Master Thesis at Vienna University of Technology, Department of Building Physics and Building Ecology, Exam date: 19.04.2013.

GINESTET, et al. **Energy performance of earth-air heat exchanger: impact of various input parameters na simulation results**, Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, França, Agosto de 2013.

GONZALES, T. **Projeto de climatização de alto desempenho para adega de cachaça**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

HIGHMED. **Soluções em tecnologia de medição**. Disponível em:  
<https://www.highmed.com.br/hmtgd-1800-termometro-de-globo-digital-com-datalogger/p>  
Acessado em: 09/12/2018.

KAPPLER, G. **Avaliação do potencial de climatização de Sistema terra-água-ar auxiliado por energia fotovoltaica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016

LABEEE. **Desempenho térmico de edificações. Aula 2: Conforto térmico**. Disponível em:  
<http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV%205161%20Aula%202%20-%20Conforto%20termico.pdf> .Acessado em: 09/12/2018.

LAMBERTS, R. et al. **Casa eficiente: simulação computacional do desempenho termo-energético, Volume 4**, Florianópolis, UFSC/LabEEE, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed., Rio de Janeiro, Eletrobras/Procel, 2014.

LOGISMARKET. **O diretório industrial para empresas e profissionais**. Disponível em:  
<https://www.logismarket.ind.br/emporionet/psicrometro-giratorio/3256217964-1409321899-p.html> Acessado em: 09/12/2018

MISRA, et al. **Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger**. Energy and Buildings 49 (2012) p531–535, 29 de Fevereiro de 2012.

MONTEIRO, M. **Permutadores de calor ar-solo. Análise da pré-viabilidade.** 2008. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos) – Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

NEI. **Instrumentos de Precisão LTDA.** Disponível em:

<https://www.nei.com.br/produto/2007-08-anemometro-portatil-skilltech-instrumentos-de-precisao-ltda-1?id=e3913da3-5ba7-11e4-8697-0e94104de12e> Acessado em: 09/12/2018

NUNES, B. **Modelagem computacional aplicada ao estudo de trocador de calor solo-ar com configuração geométrica complexa.** 2015. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional)- Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2015.

PINTO, G. **Proposta de edificação experimental com balanço energético nulo para a Universidade de Brasília.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

PROJETEEE. **Projetando Edificações Energeticamente Eficientes.** Disponível em:

[http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=DF+-+Bras%C3%ADlia&id\\_cidade=bra\\_df\\_brasilia-kubitschek.intl.ap.833780\\_try.1962](http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=DF+-+Bras%C3%ADlia&id_cidade=bra_df_brasilia-kubitschek.intl.ap.833780_try.1962).

Acesso em: 23/11/2018

REHAU. **Awadukt Thermo Ground-Air Heat Exchanger.** Disponível em:

<https://www.rehau.com/gb-en/homeowners/ground-air-heat-exchanger-erth-tubes>.

Acesso em: 30/11/2018.

SAIGE. **Consulenza progettazione energetica.** Disponível em:

[http://www.saige.it/it\\_IT/consulenza-progettazione-energetica/](http://www.saige.it/it_IT/consulenza-progettazione-energetica/) .Acesso em: 30/11/2018

SOUSA, É. **Aplicabilidade de sistemas de ventilação com permutador de calor ar-solo no clima português.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2014.

SOUSA, M. **Análise do desempenho energético de sistemas de ventilação geotérmica.**

2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

**SOUSA JÚNIOR, R. Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

**WONDERFULENGINEERING. Qanat Are Underground Channels That Supply Water in Iraq For Centuries.** Disponível em: <https://wonderfulengineering.com/qanat-are-underground-channels-that-supply-water-in-iraq-for-centuries/> . Acesso em: 30/11/2018.

## ANEXO - DADOS CLIMÁTICOS DE BRASÍLIA

Para realizar o estudo de Conforto térmico do Pavilhão João Calmon, a base de dados usada será o ProjetEEE, plataforma do governo brasileiro com informações bioclimáticas de várias cidades brasileiras. Os arquivos climáticos utilizados são provenientes do INMET 2016 disponíveis para download em <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>.

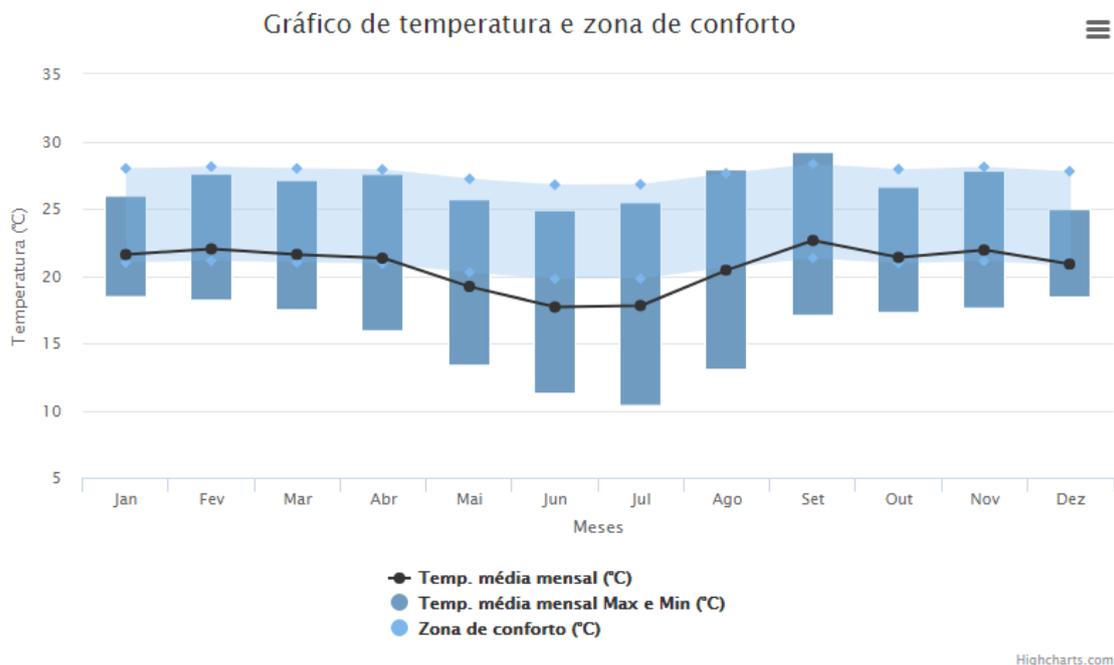


Figura 54-Temperatura e conforto. PROJETEIII (2018).

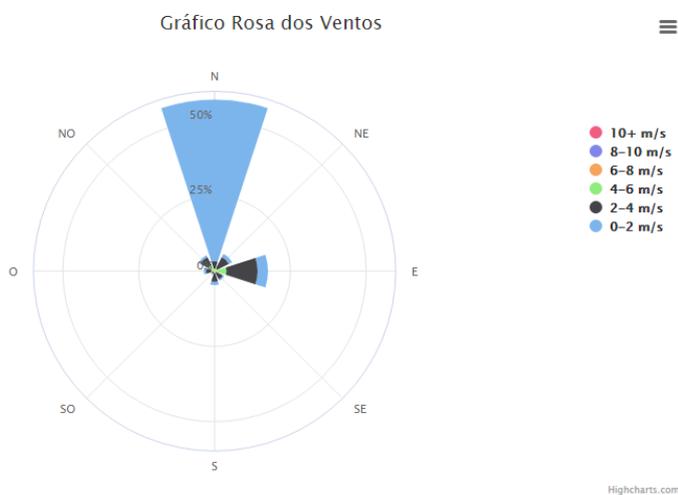


Figura 55- Rosa dos ventos. PROJETEIII (2018).

Gráfico Rosa dos Ventos (Noite)

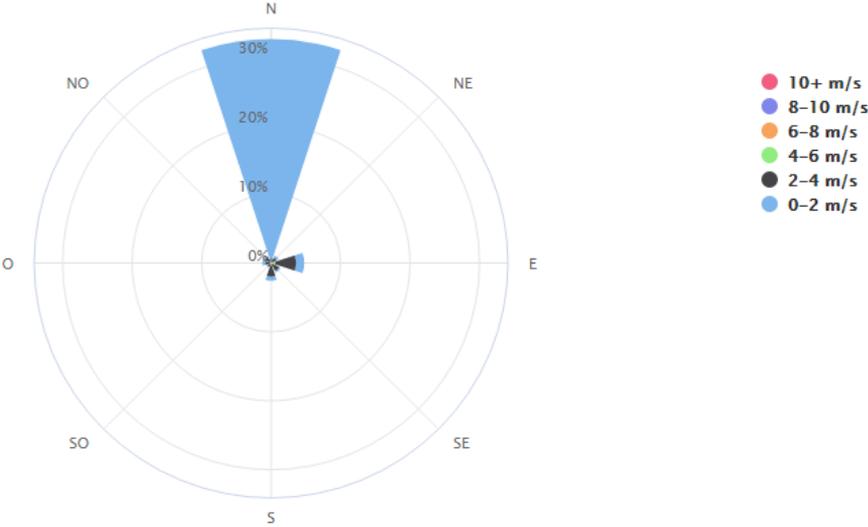


Figura 56- Rosa dos ventos (noite). PROJETEEE (2018)

Gráfico Rosa dos Ventos (Dia)

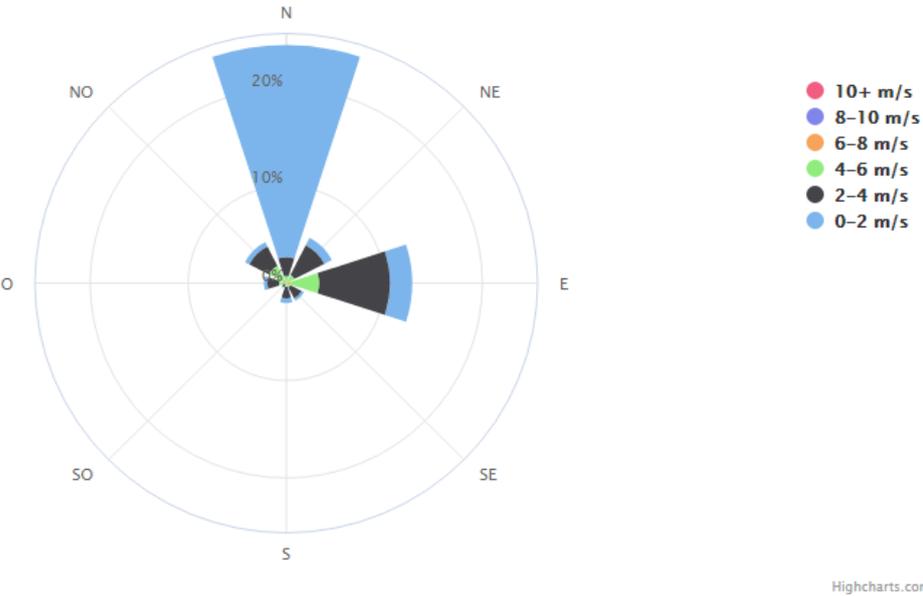


Figura 57- Rosa dos ventos (dia). PROJETEEE (2018)