



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Integração do EnergyPlus e MATLAB para
Otimização da Eficiência Energética em
Automação Predial**

Por,
Guilherme Ribeiro Barcellos

Brasília, Julho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO	2
1.3. ESTRUTURA DO TEXTO.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. SISTEMAS TÉRMICOS	3
2.2. SISTEMAS DE AR CONDICIONADO.....	8
2.3. SISTEMAS DE CONTROLE.....	10
2.3.1. <i>Liga-Desliga</i>	11
2.3.2. <i>Proporcional com PWM</i>	12
2.3.3. <i>PI</i>	14
2.4. COMUNICAÇÃO ENTRE PROGRAMAS POR MEIO DE <i>SOCKETS</i>	15
3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	16
3.1. ENERGY PLUS	16
3.2. MATLAB/SIMULINK.....	20
3.3. OPENSTUDIO	22
3.4. <i>BUILDING CONTROL VIRTUAL TEST BED (BCVTB)</i>	26
4. PROPOSTA DE SIMULAÇÃO.....	30
4.1. AMBIENTE PREDIAL.....	30
4.2. IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE	34
4.3. COSIMULAÇÃO – ENERGY PLUS/SIMULINK.....	38
4.3.1. <i>Preparação do modelo no EnergyPlus</i>	38
4.3.2. <i>Preparação do diagrama de blocos do Simulink</i>	41
4.3.3. <i>Utilização do BCVTB</i>	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. AMBIENTE UTILIZANDO CONTROLADOR LIGA-DESLIGA	44
5.2. AMBIENTE UTILIZANDO CONTROLADOR PROPORCIONAL COM PWM	46
5.3. AMBIENTE UTILIZANDO CONTROLADOR PI.....	48
5.4. DISCUSSÃO.....	50

6. CONCLUSÃO	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE A – CÓDIGOS ENERGYPLUS	62
APÊNDICE B – GRÁFICOS E RESULTADOS COMPLEMENTARES	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - MODELO ELÉTRICO COM DOIS NÓS UTILIZADO PARA O CÁLCULO DA CONDUÇÃO UTILIZANDO ESPAÇO DE ESTADOS	5
FIGURA 2-2 – BALANÇO TÉRMICO DO AMBIENTE EXTERNO	7
FIGURA 2-3 – BALANÇO TÉRMICO DO AMBIENTE INTERNO	8
FIGURA 2-4 – ESQUEMÁTICO DE UM AR-CONDICIONADO TÍPICO.....	9
FIGURA 2-5 – ESQUEMÁTICO DE UM PTAC UTILIZADO PELO ENERGYPLUS.	10
FIGURA 2-6 – HISTERESE DO CONTROLADOR LIGA-DESLIGA.....	11
FIGURA 3-1 – VISÃO GERAL DA ESTRUTURA DO ENERGYPLUS.....	18
FIGURA 3-2 – GERENCIADOR INTEGRADO DE SOLUÇÕES.....	19
FIGURA 3-3 – ETAPAS DO PROCESSO DE PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE.	22
FIGURA 3-4 – SKETCHUP <i>PLUG-IN TOOLBARS</i>	23
FIGURA 3-5 – INTERFACE GRÁFICA DO OPENSTUDIO.	23
FIGURA 3-6 – ABA <i>HVAC SYSTEMS</i>	25
FIGURA 3-7 – CONFIGURAÇÃO DO BLOCO SIMULADOR PARA ENERGYPLUS E SIMULINK	28
FIGURA 3-8 – <i>SCRIPT</i> EM MATLAB QUE CHAMA O MODELO CRIADO EM SIMULINK.....	29
FIGURA 4-1 – MODELO 3D DA SALA.	30
FIGURA 4-2 – <i>SCHEDULE</i> PADRÃO PARA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DE REFRIGERAÇÃO.	31
FIGURA 4-3 – CONFIGURAÇÃO DOS ESPAÇOS DO MODELO.	32
FIGURA 4-4 – CONFIGURAÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS DO MODELO.	33
FIGURA 4-5 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLADOR LIGA-DESLIGA.	35
FIGURA 4-6 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLADOR PROPORCIONAL UTILIZANDO PWM.....	36
FIGURA 4-7 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLADOR PI	37
FIGURA 4-8 – DIAGRAMA DE BLOCOS QUE CALCULA O ERRO QUADRÁTICO.....	38
FIGURA 4-9 – CÓDIGO QUE CRIA O OBJETOS NECESSÁRIOS PARA A COMUNICAÇÃO DO ENERGYPLUS COM A INTERFACE EXTERNA.	40
FIGURA 4-10 – CÓDIGO UTILIZADO NO ARQUIVO <i>VARIABLES.CFG</i>	41
FIGURA 4-11 – CONFIGURAÇÃO DO BLOCO BCVTB NO SIMULINK.....	41
FIGURA 4-12 – LIGAÇÃO ENTRE ENERGYPLUS E SIMULINK NO AMBIENTE DO BCVTB.	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 4-1 – DIVISÃO DOS AMBIENTES POR ÁREA.....	31
TABELA 4-2 – DIMENSIONAMENTO INICIAL DOS EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO	34
TABELA 4-3 – DIMENSIONAMENTO FINAL DOS EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO.....	39
TABELA 5-1 – LIGA-DESLIGA – CONSUMO ELÉTRICO E ERRO QUADRÁTICO POR AMBIENTE.....	46
TABELA 5-2 – PROPORCIONAL – CONSUMO ELÉTRICO E ERRO QUADRÁTICO POR AMBIENTE.....	48
TABELA 5-3 – PI – CONSUMO ELÉTRICO E ERRO QUADRÁTICO POR AMBIENTE.....	49
TABELA 5-4 – COMPARAÇÃO ENTRE O ERRO QUADRÁTICO DOS CONTROLADORES P E PI	51
TABELA 5-5 – DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO PARA NOVO FATOR DE DIMENSIONAMENTO.....	51
TABELA 5-6 – COMPARAÇÃO ENTRE O ERRO QUADRÁTICO DOS CONTROLADORES P E PI PARA NOVO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	53
TABELA 5-7 – COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO ELÉTRICO DOS CONTROLADORES P E PI PARA NOVO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	54
TABELA 5-8 – TEMPO DE EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE SIMULAÇÃO	56

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2-1 – RESPOSTA DO CONTROLADOR LIGA-DESLIGA	12
GRÁFICO 2-2 – MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO PARA UMA ENTRADA DO TIPO RAMPA.....	13
GRÁFICO 2-3 – RESPOSTA DO CONTROLADOR PROPORCIONAL COM PWM	13
GRÁFICO 2-4 – RESPOSTA DO CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL.....	14
GRÁFICO 5-1 – LIGA-DESLIGA – TEMPERATURA INTERNA DA ZONA UMA NO DECORRER DE UMA SEMANA.	44
GRÁFICO 5-2 – LIGA-DESLIGA – TEMPERATURA INTERNA DETALHADA DA ZONA 1 PARA QUINTO DIA DE SIMULAÇÃO.	46
GRÁFICO 5-3 – PROPORCIONAL – TEMPERATURA INTERNA DA ZONA UMA NO DECORRER DE UMA SEMANA.	47
GRÁFICO 5-4 – PROPORCIONAL – TEMPERATURA INTERNA DETALHADA DA ZONA 1 PARA QUINTO DIA DE SIMULAÇÃO.....	48
GRÁFICO 5-5 – PI – TEMPERATURA INTERNA DA ZONA UMA NO DECORRER DE UMA SEMANA.	49
GRÁFICO 5-6 – PI – TEMPERATURA INTERNA DETALHADA DA ZONA 1 PARA QUINTO DIA DE SIMULAÇÃO.....	49
GRÁFICO 5-7 – PROPORCIONAL PARA NOVO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO – TEMPERATURA INTERNA DETALHADA DA ZONA 1 PARA QUARTO DIA DE SIMULAÇÃO.....	54
GRÁFICO 5-8 – PI PARA NOVO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO – TEMPERATURA INTERNA DETALHADA DA ZONA 1 PARA QUARTO DIA DE SIMULAÇÃO.	55

LISTA DE SIGLAS

ASHRAE	- <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
ASCII	- <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BCVTB	- <i>Building Control Test Bed</i>
BSD	- <i>Berkeley Software Distribution</i>
EMS	- <i>Energy Management System</i>
IPC	- <i>Interprocess Communication</i>
HVAC	- <i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>
P	- <i>Proporcional</i>
PI	- <i>Proporcional Itegral</i>
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O mercado de automação predial e residencial vem ganhando grande espaço no cenário mundial devido, principalmente, ao potencial que tem de racionalização do uso da energia e dos benefícios que pode trazer a seus usuários. Por isso, grandes esforços e estudos estão sendo feitos para otimizar sistemas, baratear o custo de implementação e facilitar o acesso dos usuários.

Uma das principais limitações enfrentadas pelos engenheiros de controle é a dificuldade de simular os sistemas de controle projetados, em ambientes que se aproximam a realidade. Por outro lado, já existem programas como o EnergyPlus, capaz de simular, de forma eficiente, todo o comportamento térmico de edifícios de forma integrada com sua estrutura, seus sistemas instalados e o ambiente externo. Sistemas de controle, por sua vez, são modelados com muita facilidade, com a utilização do MATLAB/Simulink, devido a grande versatilidade e quantidade de funções disponíveis para o projetista.

A integração entre essas duas ferramentas pode tornar o projeto de edifícios inteligentes, que buscam utilizar seus recursos de forma mais racional possível, muito mais eficiente. A opção seria utilizar outras ferramentas permitissem a comunicação entre os processos de cada um dos programas, proporcionando um ambiente de simulação cooperativa ou co-simulação, em que os dois programas trocassem informações entre si, visto que ainda não existe comunicação direta entre eles.

Tendo isso em vista, será projetado e simulado um sistema de ar-condicionado instalado em uma sala comercial. Os equipamentos de ar-condicionado condicionado foram dispostos em fachadas diferentes do edifício e atendem a salas que apresentam cargas térmicas distintas, sendo assim cada máquina está sujeita a uma condição específica.

A geometria e a dinâmica térmica dos ambientes podem ser simuladas no EnergyPlus enquanto os sistemas de controle são modelados com mais facilidade no MATLAB/Simulink. Sendo assim, a integração entre os dois programas poderá ter grande relevância no projeto de edifícios que buscam ser mais eficientes.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar as vantagens e verificar a precisão do uso integrado de um modelo de edificação criado em EnergyPlus com um sistema de controle modelado em Simulink. Para isso é preciso definir uma ferramenta que sirva como ponte entre os dois programas e criar modelos de sistemas que possam comunicar entre si.

1.3. ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro deles um capítulo introdutório em que serão apresentados o contexto e motivação para realizar esse trabalho, bem como o seu objetivo.

Em seguida serão abordados aspectos teóricos relacionados ao trabalho. Será apresentado uma breve explicação sobre a dinâmica do sistema térmico utilizado para realizar simulações de edifícios, bem como aspectos importantes de sistemas de refrigeração. Também serão descritos os controladores do tipo Liga-Desliga, proporcional com PWM e proporcional integral que serão utilizados. Finalmente será feita uma introdução a respeito da comunicação entre diferentes processos.

O capítulo três apresenta as ferramentas computacionais necessárias para desenvolver o modelo utilizado neste trabalho. Nesse capítulo serão abordadas as principais funcionalidades do EnergyPlus, MATLAB/Simlink, OpenStudio e BCVTB.

O próximo capítulo trata da construção do modelo simulado desde a definição de sua geometria básica, passando pela definição de suas cargas térmicas, dimensionamento de equipamentos, modelagem dos sistemas de controle até a configuração do ambiente que permite a comunicação entre EnergyPlus e Simulink.

No capítulo cinco são apresentados resultados obtidos da simulação conjunta assim como é feita a avaliação dos sistemas implementados. Por último são apresentadas, no capítulo seis as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SISTEMAS TÉRMICOS

É crescente aumento da importância da simulação dinâmica de edifícios e o comportamento de seus sistemas devido a sua relevância em prever, de forma precisa, o consumo energético de um prédio e dimensionar e planejar seus sistemas HVAC (FELGNER, MERZ e LITZ, 2006). A análise detalhada dos sistemas dinâmicos permite que sejam realizados projetos de sistemas de controle mais complexos e eficientes.

Para se entender como funciona a dinâmica do fluxo de calor em um edifício é preciso identificar quais são suas fontes e quais fatores a influenciam. Sendo assim é preciso compreender como o calor flui entre os ambientes de um prédio, devido aos fenômenos de condução, convecção e radiação. Para isso, é comum utilizar a descrição feita por funções de transferência e modelos elétricos equivalentes.

A condução térmica é o fenômeno em que o calor é transmitido de molécula por molécula, devido a um gradiente de calor. Cada material tem uma forma particular de se comportar, de acordo com sua constituição. Alguns materiais possuem a característica de se comportarem como isolante térmico, ou seja, o material conduz pouco calor. Sua resistência térmica é alta. Por outro lado, existem aqueles que se comportam como condutores térmicos em que sua resistência térmica é baixa. A resistência de um material é determinada por sua área, espessura e condutividade térmica.

De modo geral a transferência de calor que ocorre em uma parede se dá predominantemente por condução. Por isso, esse é um fenômeno de grande importância para a análise em ambientes fechados que se comunicam por paredes. De maneira geral a condução térmica pode ser calculada utilizando a Equação 2-1.

$$q = \frac{kA}{\Delta X} \Delta T \quad (2-1)$$

Sendo:

- **q** = taxa de fluxo de calor em kcal/s;
- **k** = condutividade térmica em kcal/m s °C;
- **A** = área normal ao fluxo de calor em m²;

- ΔX = espessura do condutor em m;
- ΔT = diferença de temperatura, °C.

A transferência de calor por convecção ocorre devido a existência de um fluido com temperaturas diferentes em um mesmo ambiente. A densidade do fluido se altera quando submetido a uma temperatura maior ou menor. Essa diferença entre densidade faz com que exista uma movimentação de massa que promove a transferência de calor. Sendo assim, a Equação 2-2 representa como é feito esse cálculo.

$$q = HA\Delta T \quad (2-2)$$

Sendo:

- q = taxa de fluxo de calor em kcal/s;
- H = coeficiente de convecção, kcal/m² s °C;
- A = área normal ao fluxo de calor, m²;
- ΔT = diferença de temperatura, °C.

Da mesma forma que materiais distintos conduzem calor de forma diferente, cada material apresenta mais ou menos resistência a transferir calor por convecção. Sendo essa resistência dependente da área normal ao fluxo e do coeficiente de convecção.

A última forma de transferência de calor a ser abordada é a transferência por radiação. Diferentemente dos outros fenômenos a radiação ocorre por meio de ondas eletromagnéticas. Quanto maior a temperatura de um corpo maior será a transferência de calor por radiação realizada por ele. Dessa forma, parte da equação de transferência de calor em um edifício leva em consideração o calor emitido por pessoas, equipamentos, objetos e, principalmente, pelo sol.

Devido a utilização, neste trabalho, de ferramentas desenvolvidas especificamente para a simulação de edifícios inteiros, levando em conta diversos parâmetros térmicos se faz necessário descrever de forma breve como é feita a abordagem e cálculo do fluxo de calor. Para tanto será utilizado como referência o documento *Engineering Reference* disponibilizado como parte da documentação da versão 8.5 do EnergyPlus.

O cálculo da função de transferência de condução térmica pode ser feito utilizando a princípio dois métodos. Um deles emprega o método de Laplace (HITTLE e BISHOP.,

1983) o outro é utilizar a abordagem em espaço de estados (OUYANG e HAGHIGHAT., 1991). Uma das vantagens do uso da técnica de espaço de estados é que as equações de fluxo de calor podem ser descritas apenas como função das variáveis de entrada, que neste caso é a temperaturas dos ambientes. Isso elimina a necessidade de resolver o sistema para as raízes no domínio de Laplace. Além disso, a matriz resultante apresenta mais significado físico do que as funções complexas utilizadas pelo método de Laplace. Dessa forma, desenvolve-se o método em espaço de estados para o modelo proposto pela Figura 2-1, composta por uma laje com dois nós internos e convecção em ambos os lados.

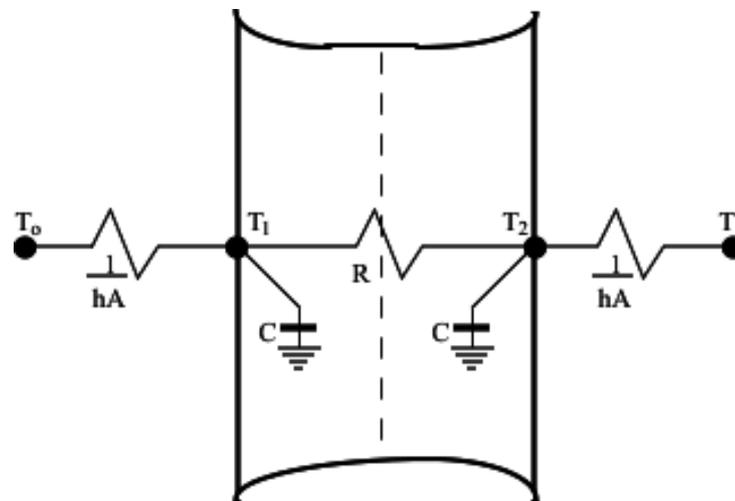


Figura 2-1 - Modelo elétrico com dois nós utilizado para o cálculo da condução utilizando espaço de estados

O modelo de espaço de estados básico é definido como:

$$\frac{d[x]}{dt} = [A][x] + [B][u] \quad (2-3)$$

$$[y] = [C][x] + [D][u] \quad (2-4)$$

Onde \mathbf{x} é o vetor de variáveis de estado, \mathbf{y} é o vetor de saída, \mathbf{u} é o vetor de entrada, t é o tempo e \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} são as matrizes de coeficiente. Para o caso de um sistema com n nós tem se que:

$$\frac{d \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ \vdots \\ Tn \end{bmatrix}}{dt} = [A] \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ \vdots \\ Tn \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} Ti \\ To \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$\begin{bmatrix} q''_i \\ q''_o \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ \vdots \\ Tn \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} Ti \\ To \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Sendo $T1, T2, \dots, Tn$ são as temperaturas nodais, n é o número de nós, Ti e To são, respectivamente, as temperaturas externa e interna do ambiente e q''_i e q''_o são os fluxos de calor desejados.

Montando as equações para o caso da Figura 2-1 tem-se que:

$$C \frac{dT1}{dt} = hA(To - T1) + \frac{T2 - T1}{R} \quad (2-7)$$

$$C \frac{dT2}{dt} = hA(Ti - T2) + \frac{T1 - T2}{R} \quad (2-8)$$

$$q''_i = h(Ti - T2) \quad (2-9)$$

$$q''_o = h(T1 - To) \quad (2-10)$$

Onde:

- $R = \frac{l}{kA}$, em que l é o comprimento, k é a condutividade térmica e A é área exposta ao ambiente;
- $C = \frac{\rho c_p l A}{2}$, em que ρ é a densidade do material e c_p é a capacidade térmica.

A forma matricial final das equações acima fica expresso pelas equações 2-11 e 2-12.

$$\begin{bmatrix} \frac{dT1}{dt} \\ \frac{dT2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{RC} - \frac{hA}{C} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & \frac{-1}{RC} - \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{hA}{C} & 0 \\ 0 & \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} To \\ Ti \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$$\begin{bmatrix} q''_i \\ q''_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -h \\ h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & h \\ -h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} To \\ Ti \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

Uma vez definida a função de transferência de condução é interessante que seja feita a análise dos elementos do balanço de calor nas superfícies externas e internas. Iniciando pelo ambiente externo representando pela Figura 2-2 obtém-se que o balanço térmico é dado por:

$$q''_{\alpha_{sol}} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (2-13)$$

Sendo que:

- $q''_{\alpha_{sol}}$ = Fluxo de calor absorvido pela radiação solar (comprimento de onda pequeno) difusa e direta;
- q''_{LWR} = Fluxo da troca de radiação de comprimento de onda longo com o ar e arredores;
- q''_{conv} = Fluxo de calor por convecção com o ar do ambiente externo;
- q''_{ko} = Fluxo de calor que flui para o interior da parede.

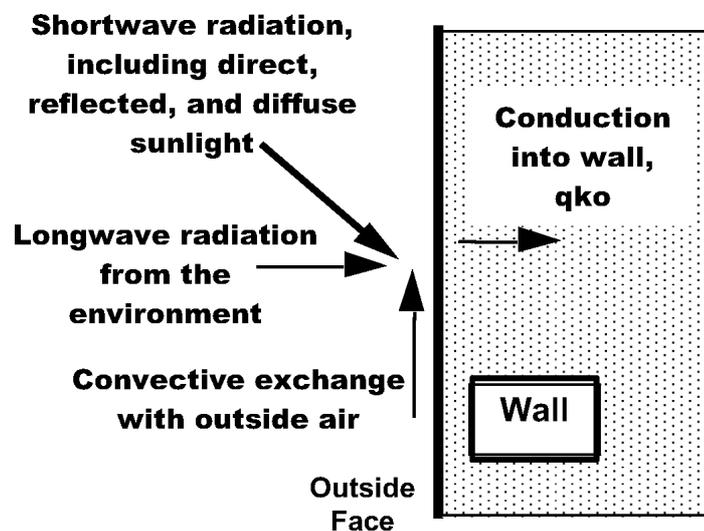


Figura 2-2 – Balanço térmico do ambiente externo

De forma geral, o fluxo de calor absorvido pela radiação solar é influenciado pela localização da superfície, seu ângulo, as propriedades dos materiais, condições climáticas entre outros fatores. Já o fluxo de calor, absorvido por radiação como comprimento de onda longo, é calculado a partir da temperatura da superfície, sua absorvidade, temperatura do céu e do chão e o fator de visão do céu e da terra.

Realizando agora a análise do balanço térmico para o ambiente interno da Figura 2-3, obtém-se que:

$$q''_{LWX} + q''_{sw} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2-14)$$

Onde:

- q''_{LWX} = Fluxo da irradiação de comprimento de onda longo da troca entre a superfície da zona;

- q''_{sw} = Fluxo da troca de radiação de comprimento de onda curto originado da iluminação interna;
- q''_{LWS} = Fluxo de radiação de comprimento de onda longo originado pelos equipamentos na zona;
- q''_{ki} = Fluxo de condução através da parede;
- q''_{sol} = Fluxo da transmissão de radiação solar absorvido na superfície;
- q''_{conv} = Fluxo de calor por convecção com o ar do ambiente externo.

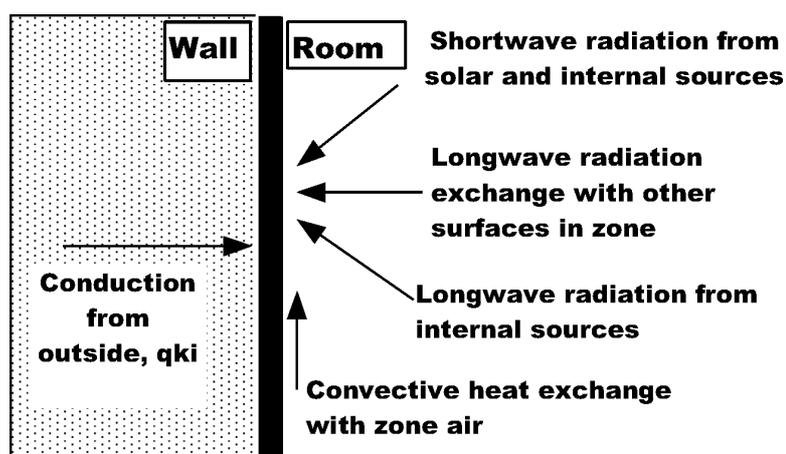


Figura 2-3 – Balanço térmico do ambiente interno

Para esse caso, geralmente o balanço térmico é modelado utilizando quatro componentes de transferência de calor, sendo eles: condução através dos elementos do edifício, convecção de ar, o intercâmbio de irradiação de comprimento de onda longo e absorção e refletância de radiação de comprimento de onda curto. O intercâmbio de radiação com comprimento de onda longo inclui a emissão e absorção de fontes de radiação de baixa temperatura, como pessoas, equipamentos e as superfícies da zona. A radiação que incide na superfície, devido a radiação solar que entra por janelas e portas e aquela que tem origem de fonte internas como lâmpadas, são também caracterizadas como radiação de comprimento de onda curto.

O documento *Engineering Reference* traz com maior detalhe esses e outros fatores que são considerados no cálculo da dinâmica do edifício e permite um estudo profundo de cada elemento.

2.2. SISTEMAS DE AR CONDICIONADO

Sistemas HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) representam aspecto importante do projeto de edificações eficientes. O consumo energético do sistema de

climatização representa cerca de 50% do consumo total do edifício (PÉREZ-LOMBARD, ORTIZ e POUT, 2008). Essa assertiva ressalta a importância da escolha adequada dos equipamentos. Sistemas HVAC são classificados de acordo com o método de produzir, entregar e controlar o aquecimento, ventilação e condicionamento de ar no ambiente desejado. Portanto o projetista deve compreender quais as necessidades de cada ambiente e situação em que ele está inserido (HANDBOOK, ASHRAE, 2008). A determinação e dimensionamento do sistema deve levar em consideração diversos aspectos, como a ocupação do ambiente, temperatura e humidade desejadas, custo dos equipamentos, qualidade do ar, entre muitos outros fatores.

Um dos sistemas comercialmente mais utilizados, devido ao baixo custo de investimento, instalação e operação, são os ar-condicionados do tipo janela e *Split*. Eles são projetados para utilização através de paredes ou em janelas promovendo conforto térmico ao resfriar, aquecer, desumidificar e circular o ar de um ambiente.

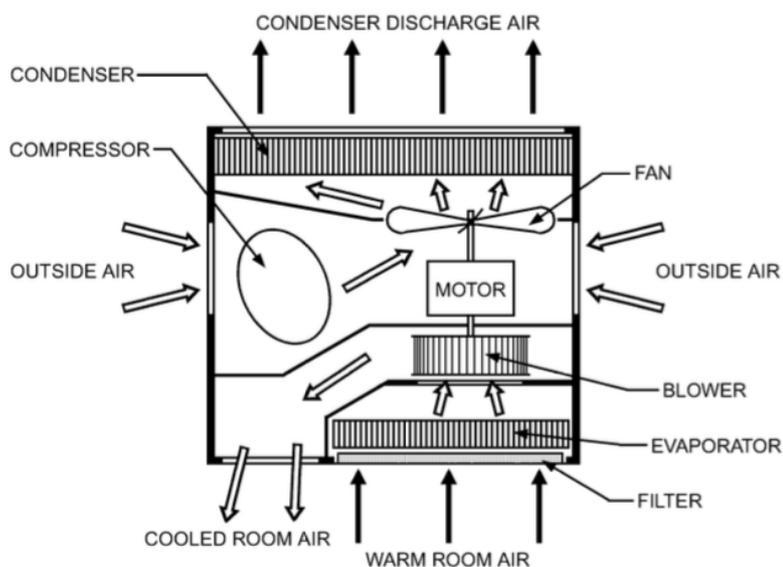


Figura 2-4 – Esquemático de um ar-condicionado típico.

Fonte: 2008 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment (SI) p. 49.1.

A Figura 2-4 apresenta um fluxo esquemático do funcionamento de um ar-condicionado típico, refrigerando o ar do ambiente interno. De forma simplificada, o ar quente do ambiente refrigerado passa pelo processo de resfriamento, perdendo calor e então é reintroduzido no ambiente.

O processo de resfriamento se inicia quando o ar quente da sala passa pelo evaporador que absorve esse calor e vaporiza o líquido refrigerante, que está frio e a

baixa pressão. Esse vapor carrega o calor para o compressor, que comprime o vapor e aumenta sua temperatura acima da temperatura externa. No condensador o vapor quente em alta pressão perde seu calor para o meio externo, condensa e reduz a sua temperatura. Em seguida o líquido refrigerante, sob pressão, passa por um limitador que reduz sua pressão e temperatura. O líquido refrigerado, agora resfriado e a baixa pressão entra novamente no evaporador para iniciar um novo ciclo (HANDBOOK, ASHRAE, 2008).

No EnergyPlus esse tipo de sistema pode ser modelado utilizando um objeto do tipo *ZoneHVAC:PackagedTerminalAirConditioner*, que consiste em um aparelho de ar condicionado composto por um misturador de ar do ambiente externo (*outdoor air mixer*), uma serpentina de refrigeração de expansão direta (*Direct Expansion (DX) cooling coil*), uma bobina de aquecimento e um ventilador (*supply air fan*). A imagem esquemática esquemático desse sistema é apresentada na Figura 2-5.

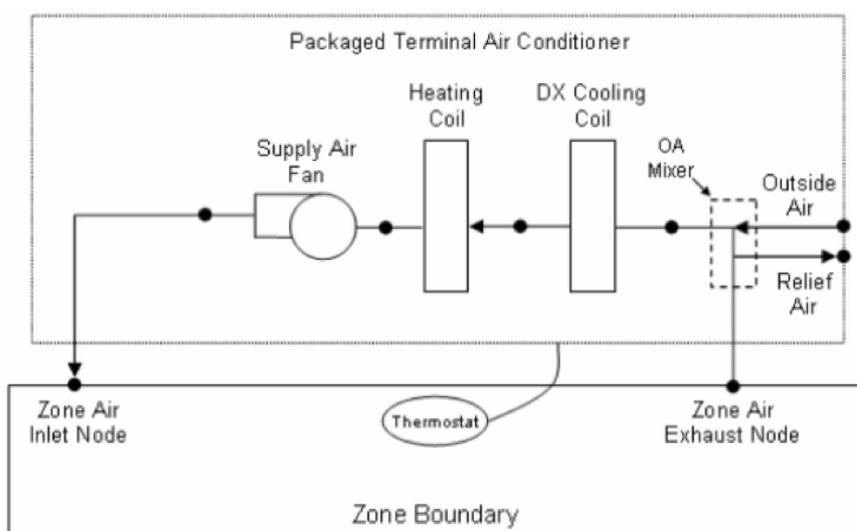


Figura 2-5 – Esquemático de um PTAC utilizado pelo EnergyPlus.
Fonte: EnergyPlus Version 8.5 Documentation -Engineering Reference p.1519.

2.3. SISTEMAS DE CONTROLE

Sistemas de controle atuam como peça fundamental dos mais diversos tipos de processos. Garantem que determinada condição seja mantida, como por exemplo o controle para manter constante a umidade interna de um ambiente. Neste trabalho será realizado o controle da temperatura interna de ambiente prediais. Para isso serão utilizados os controladores apresentados a seguir.

2.3.1. Liga-Desliga

O controlador Liga-Desliga, devido a sua simplicidade e baixo custo é o controlador mais utilizado, tanto para aplicações domésticas quanto para processos industriais (OGATA e LEONARDI, 2013) .

Um controlador Liga-Desliga é feito utilizando valores limite para a variável controlada. Ou seja, quando a variável atinge um valor mínimo o controle liga e quando o valor máximo é atingido desliga. Quanto mais próximos são os valores limites mais precisa será a ação de controle, no entanto caso a diferença entre os limites seja muito pequena o controlador pode ser danificado por excesso de chaveamentos. Por essa razão essa diferença, geralmente, é limitada.

Na prática o controlador Liga-Desliga é utilizado com uma histerese, conforme mostrado Figura 2-6. Quando a diferença entre valor da saída do processo e o ponto de operação atinge o valor máximo de E2 a saída do controlador se mantém na posição U_{max} (Liga), até que o erro diminua e chegue ao valor de E1, quando a saída do controlador passa para o valor de U_{min} (Desliga).

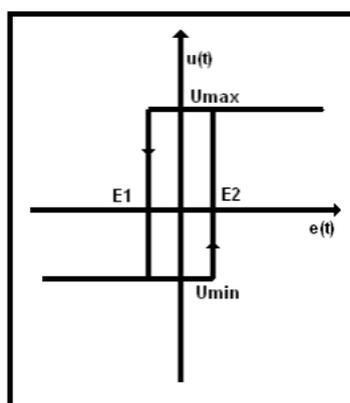
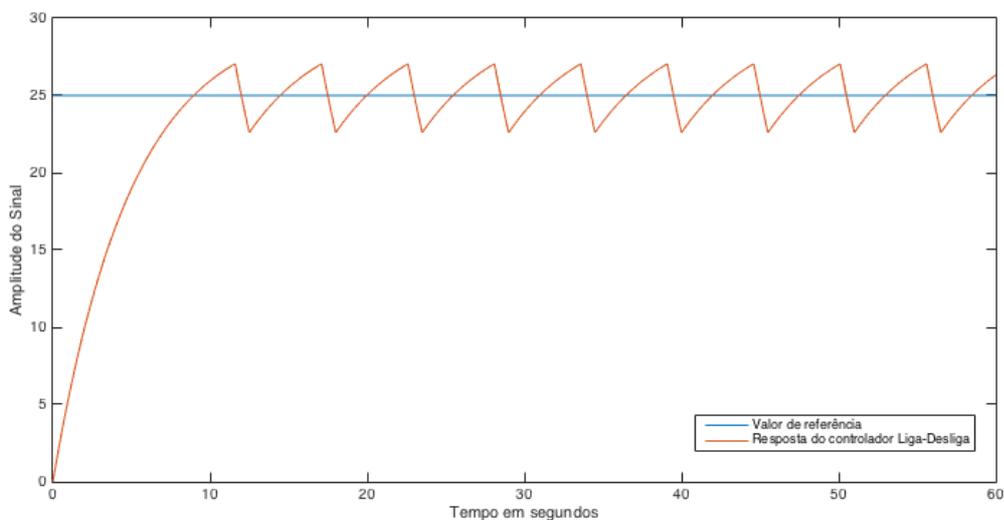


Figura 2-6 – Histerese do controlador Liga-Desliga.

Apesar da simplicidade o controlador apresenta precisão muito limitada, visto que sistema nunca entrará em regime permanente, pois sempre estará oscilando conforme exemplificado no Gráfico 2-1, onde a curva em laranja representa o comportamento do controlador Liga-Desliga que oscila em torno do ponto de operação, representando pela linha azul.

Gráfico 2-1 – Resposta do controlador Liga-Desliga

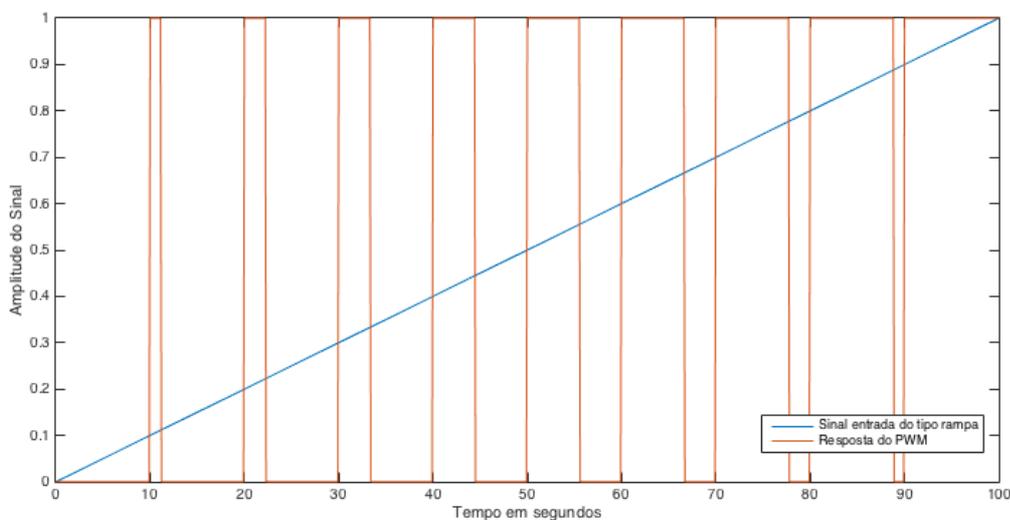


2.3.2. Proporcional com PWM

A ação de controle proporcional tem a principal função de aumentar a sensibilidade do erro utilizando um amplificador de ganho ajustável. Esse tipo de controle é simples, mas se o ganho proporcional for bem ajustado pode apresentar bons resultados. Ao contrário do controlador Liga-Desliga, com a utilização deste controlador entrará em regime permanente. Por outro lado, mesmo em regime permanente, o valor do erro não será zerado. Para melhorar o erro, em regime permanente, é comum a associação desse tipo de controlador a um PWM, sigla para denominação *Pulse Width Modulation* ou Modulação de Largura de Pulso.

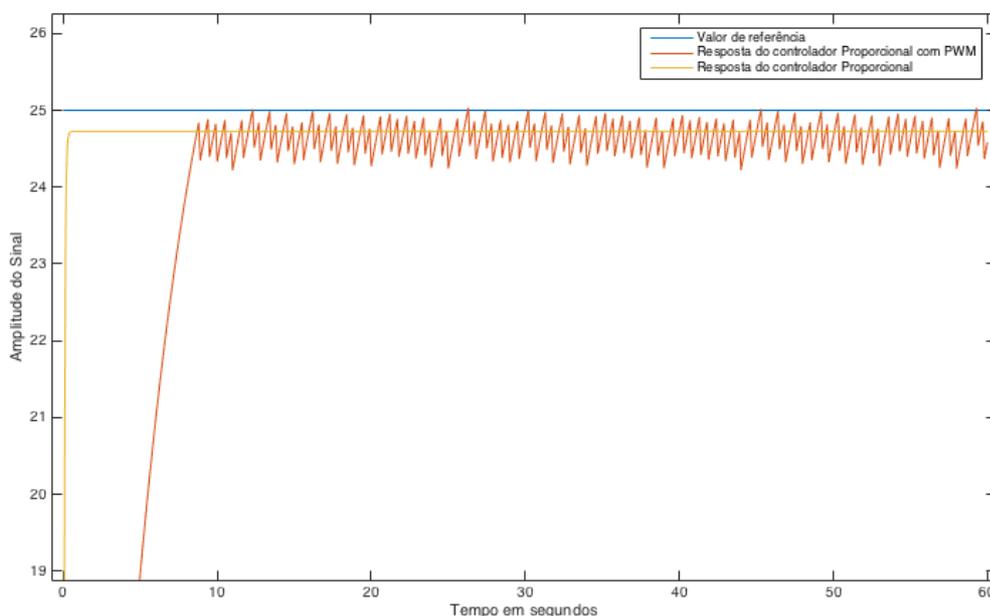
Esse componente atua variando a largura do pulso a cada período, de acordo com um valor de controle externo. Por exemplo, caso chegue a entrada do PWM um valor de erro de 0,3 será observado, em sua saída, um pulso, que ocupa 30% do ciclo do PWM. Esse comportamento pode ser observado Gráfico 2-2. Neste caso, é aplicado, na entrada do dispositivo, um sinal do tipo rampa e o PWM é configurado para ter um período de 10s. Sendo assim, a largura do pulso, em cada ciclo, irá depender do valor do sinal de rampa naquele instante.

Gráfico 2-2 – Modulação de largura de pulso para uma entrada do tipo rampa.



O Gráfico 2-3 traz a resposta de um controlador proporcional puro, representado pela curva amarela e um controlador proporcional com PWM, representado pela linha laranja. Apesar de o sistema com controlador com PWM estar sempre oscilando, a média do erro em regime permanente será igual ao erro do controlador P puro. Utilizar um modulador de largura de pulso será útil quando for preciso fazer o controle de dispositivos que aceitam apenas comando de duas posições, como ligar e desligar. O PWM converte as ações de controle, realizada pelos outros sistemas, em pulsos de valor médio equivalente.

Gráfico 2-3 – Resposta do controlador proporcional com PWM



2.3.3. PI

O controlador Proporcional Integral ou PI atualmente é muito utilizado na indústria, devido a sua simplicidade e resposta eficiente. O canal integral tem como principal objetivo zerar o erro em regime permanente. No entanto, a ação do canal integral pode gerar uma resposta oscilatória e tornar o sistema instável. A ação do controlador PI segue a seguinte equação:

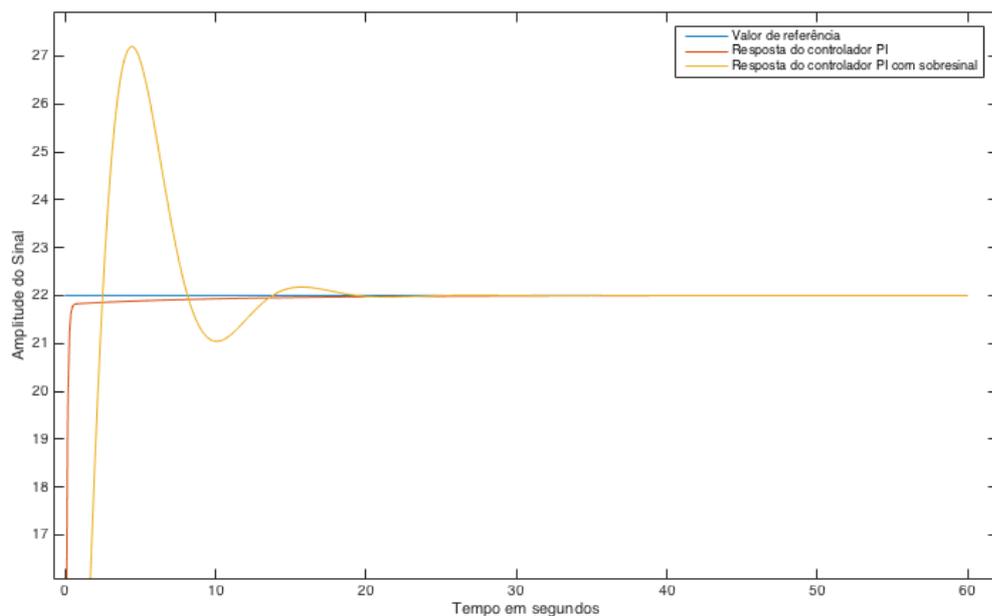
$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2-15)$$

E sua função de transferência dada por:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2-16)$$

Onde K_p representa o ganho proporcional e T_i representa o tempo integral, responsável pela ação integral. Os dois coeficientes são valores ajustáveis que são alterados para atender as especificações de projeto.

Gráfico 2-4 – Resposta do controlador proporcional integral.



O **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o comportamento de um sistema utilizando um controlador PI. A curva em amarelo apresenta a resposta de um

controlador com a ação integral muito grande o que gera um sobressinal alto, mas que entra em regime permanente e zera o erro. Já o controlador representado pela curva laranja foi configurado para não gerar sobressinal e chegar ao erro zero em regime permanente.

2.4. COMUNICAÇÃO ENTRE PROGRAMAS POR MEIO DE SOCKETS

Sockets é o método utilizado pelo BSD (Berkeley Software Distribution) para implementar a comunicação entre processos. Em ciências da computação a comunicação entre processo ou *IPC (Interprocess Communication)* se refere ao mecanismo que um determinado sistema operacional dispõe para permitir o compartilhamento de dados entre processos. Geralmente as aplicações são divididas entre servidor e cliente, em que o cliente pede o acesso a algum dado específico e o servidor responde a esse pedido. Dessa forma, o socket é a ferramenta que permite que um processo se comunique com outro, de maneira similar a um telefone que é a ferramenta que permite que uma pessoa converse com outra (FROST, 1991).

Originados do sistema operacional BSD Unix os chamados Berkeley *sockets* ou BSD *sockets* foram desenvolvidos como uma interface de programação que logo se tornou padronizada para *sockets*. Geralmente para realizar a comunicação entre processos os sockets precisam conter informação relacionado a seu endereço local como um endereço IP ou o número de uma porta e deve se definir um protocolo que definirá como cada um dos programas ou processos irá se comunicar (STEVENS, FENNER e RUDOFF, 2004) .

3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

3.1. ENERGY PLUS

A necessidade de entender e projetar sistemas de climatização HVAC mais eficientes fez com que fossem desenvolvidas ferramentas computacionais capazes de realizar simulações energéticas e de cargas térmicas. Tendo sua origem nos programas BLAST e DOE-2, criados no final dos anos 1970 e início dos anos 1980, o EnergyPlus une as melhores qualidades e funcionalidades de seus predecessores (CRAWLEY, LAWRIE, *et al.*, 2000) e é uma das ferramentas atualmente mais completas no que se diz respeito a simulação energética de edifícios e ambientes.

A partir de definições feitas pelo usuário, a respeito dos aspectos construtivos de edifícios e de seus sistemas mecânicos associados, o programa é capaz de calcular as cargas térmicas necessárias para a manutenção das diferentes temperaturas de cada zona térmica e o consumo energético do sistema projetado. Além disso apresentar detalhes necessários para que o projetista tenha insumos suficientes para projetar um sistema que atenta as condições que o sistema irá enfrentar na realidade.

O EnergyPlus apresenta características que permitem o uso do programa com grande rigor em diferentes situações. Os diferentes sistemas projetados e o edifício funcionam de forma integrada. Sendo assim, é possível verificar em tempo real qual a influência de um sistema sobre o outro. É possível também definir o intervalo de tempo em que serão feitas as interações entre as zonas térmicas, o ambiente externo e os sistemas HVAC. Os dados relacionados ao ambiente externo podem ser obtidos por meio de arquivos climáticos de texto, baseados em ASCII.

Todo o comportamento térmico do edifício, assim como a utilização de modelos térmicos baseados em atividade, humidade e temperatura podem ser simulados. O programa é capaz de calcular, por meio de funções de transferência, a condução transiente de calor através de paredes, tetos, pisos, etc., além de apresentar técnicas que permitem o cálculo simultâneo dos efeitos de convecção e radiação, tanto nos ambientes internos como externos. De forma complementar é previsto a implementação de persianas controláveis, vidros eletrocromicos e balanços de calor camada por camada que permitem a definição de energia solar absorvida pelas janelas.

O controle de elementos que não estão ligados diretamente as questões térmicas também é contemplado. É possível calcular a iluminância nos ambientes internos, simular e controlar ambientes com brilho intenso e prever os efeitos do uso de iluminação artificial nos sistemas de aquecimento e resfriamento. Além disso, as versões mais novas do EnergyPlus incluem formas para simular outros sistemas relevantes nos edifícios como os sistemas hídricos e elétricos (DEPARTMENT OF ENERGY, U.S., 2016).

Apesar dos muitos recursos que a ferramenta oferece é importante apontar algumas limitações que o programa apresenta. O EnergyPlus não possui uma interface gráfica. Seu papel é o de ser um mecanismo de simulação. Neste caso todos os dados de entradas e saídas gerados durante a simulação serão disponibilizados como arquivos de texto (CRAWLEY, PEDERSEN, *et al.*, 2001). Outro ponto é que o EnergyPlus ainda não é uma ferramenta de análise de custo de vida útil do sistema, no entanto, ele pode gerar dados que podem ser utilizados em programas especializados nesse tipo de análise. Além disso, não é oferecido ao usuário a assistência para a correção de ajustes finos ou erros nas variáveis de entrada do programa, como ocorre em programas com interface gráfica. Assim sendo, engenheiros e arquitetos sempre serão elementos fundamentais do processo de desenvolvimento de sistemas de eficiência energética.

Um dos pontos de partida do desenvolvimento do EnergyPlus foi o de criar uma ferramenta com uma estrutura modular, bem organizada e que proporcionasse a inclusão futura de novas funcionalidades e que permitisse a comunicação com outros programas (CRAWLEY, LAWRIE, *et al.*, 2000). A Figura 3-1 mostra a estrutura básica do programa que é dividido em três módulos principais: *Simulation Manager* (Gerenciador de simulação), *Heat and Mass Balance Simulation Module* (Módulo de simulação de balanço de calor e massa) e *Building Systems Simulation* (Simulação dos sistemas prediais).

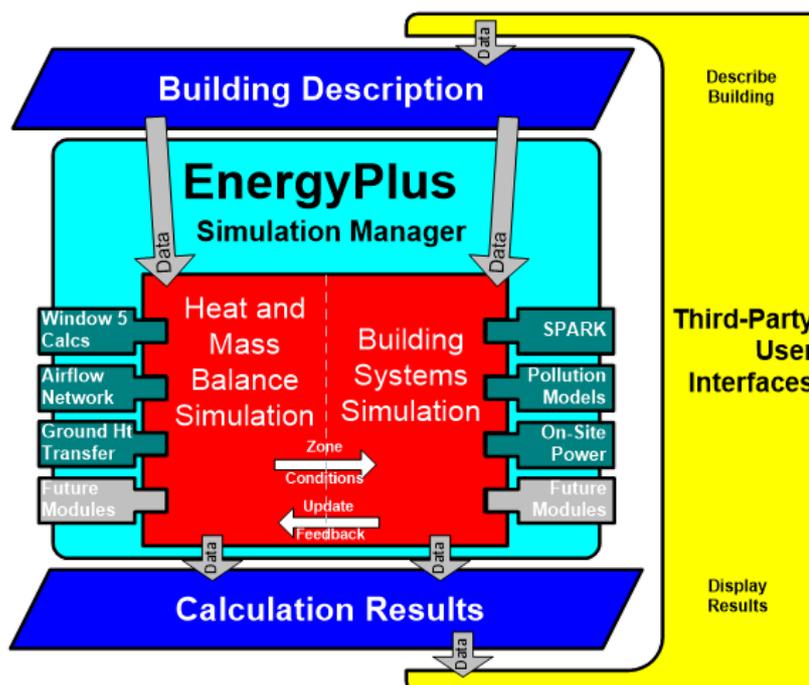


Figura 3-1 – Visão geral da estrutura do EnergyPlus.
 Fonte: EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Getting Started, p.10

A função do módulo de gerenciamento de simulação é controlar as interações realizadas por cada simulação de acordo com o tempo de simulação definida pelo usuário. Cada uma das ações de cada um dos módulos individuais de simulação é gerenciada nesse ambiente sendo assim, ações como iniciar, simular, guardar registro e reportar são dirigidas pelo gerenciador de simulação. Desta forma, são alcançados alguns benefícios como a simplificação da adição de novos módulos, o acesso a dados é controlado, as principais malhas de simulação são contidas em apenas um módulo e os módulos tornam-se autossuficientes e mais direcionados a objetos.

O módulo de Simulação de balanço de calor e massa está inserido em um ambiente que permite o gerenciamento integrado de soluções, exemplificado na Figura 3-2. O módulo é dividido em dois subsistemas o *Surface Heat Balance Manager* (Gerenciador de Balanço de Calor na Superfície) que é responsável por simular os efeitos do balanço de calor em superfícies internas e externas, das interconexões entre os balanços de calor e as condições de contorno, condução, convecção, radiação e a transferência de massa (vapor d'água). O segundo subsistema é o de *Air Mass Balance Manager* (Gerenciador de Balanço de Massa de Ar) responsável por lidar com os vários tipos de corrente de ar, como ventilação exaustão e infiltração.

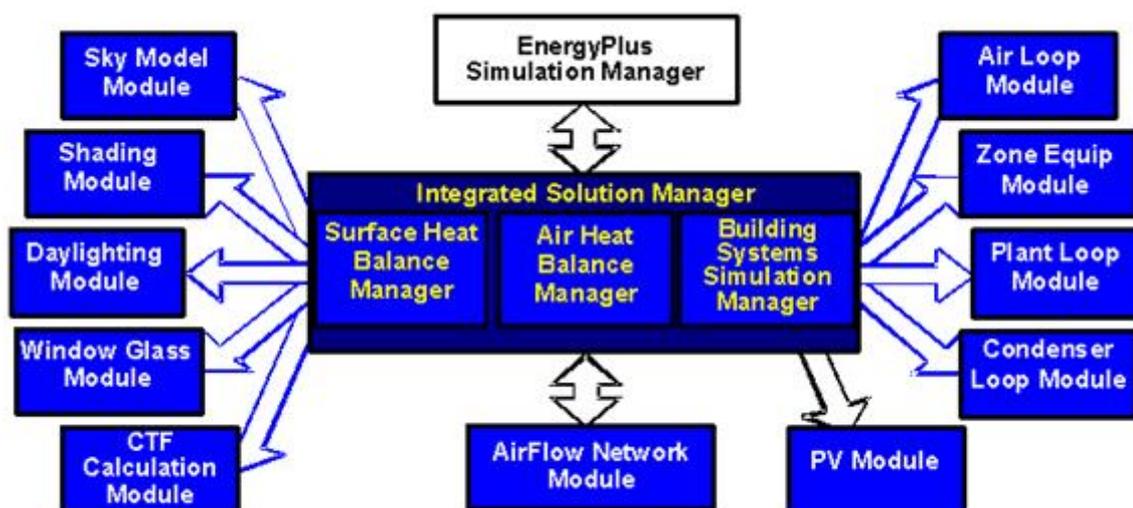


Figura 3-2 – Gerenciador integrado de soluções.
 Fonte: EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Getting Started, p.10

Finalmente, após a simulação para um período de tempo ser completada pelo Simulador de balanço de calor e massa, será acionado o Gerenciador de simulação dos sistemas prediais. Este módulo é responsável por realizar toda a simulação do sistema de climatização e ventilação, bem como os sistemas elétricos, seus equipamentos e componentes e retornar às novas condições de ar e temperatura de cada zona térmica. É importante ressaltar que a simulação não é feita de forma sequencial, permitindo, assim, a integração entre cargas, sistemas e planta. A semelhança dos demais módulos citados anteriormente, o Gerenciador de simulação dos sistemas prediais é construído de forma modular, o que permite a sua expansão com a adição de novos módulos para sistemas mais específicos (DEPARTMENT OF ENERGY, U.S., 2016).

Outro ponto de destaque, no desenvolvimento do EnergyPlus, é a forma como os arquivos que contêm as variáveis de entrada e de saída e os arquivos de dados climáticos são utilizados. Foram desenvolvidos arquivos para os dados de entradas e saídas no sentido que os tornasse mais fácil sua manutenção, expansão e uso por outros programas. Desta forma, por meio da funcionalidade *Energy Management System* (Sistema de Gerenciamento de Energia) é possível utilizar outras ferramentas de simulação com diferentes funções para gerar dados de entrada que reescrevam

algoritmos internos, adicionem novos métodos de cálculo e complementem as simulações realizadas pelo EnergyPlus (ZHOU, HONG e YAN, 2013).

De forma similar aos arquivos de dados de entradas e saídas, os dados climáticos utilizados apresentam um formato baseado em texto. Nesse tipo de formato de arquivo são incluídos nas primeiras linhas informações a respeito do local, da fonte de dados, latitude, longitude, fuso horário, elevação, descrição das condições de pico de aquecimento e resfriamento, feriados, períodos de racionamento de energia durante o dia, períodos típicos e extremos, espaço para comentários e o período coberto pelo dado. Esse tipo de formato é compatível com a maioria dos dados climáticos disponibilizados pelas agências climáticas. Isso torna muito mais simplificado e versátil o uso dos dados, quando comparado a um formato binário, que requer geração em programa distinto.

Parte importante do estudo energético de um edifício é a sua própria geometria e seus elementos. Apesar de disponibilizar avançadas ferramentas de simulação e ser capaz de calcular de forma integrada as relações entre os sistemas e subsistemas projetados e o próprio edifício, o EnergyPlus é limitando quanto a descrição da geometria do ambiente a ser estudado. Por se tratar puramente de um ambiente de simulação e não apresentar interface gráfica própria, a definição de ambientes mais complexos em 3D pode ser uma atividade muito difícil e suscetível a muitos erros (ELLIS, TORCELLINI e CRAWLEY, 2008). Tendo isso em vista, é razoável que sejam utilizados, para realizar tal tarefa, programas de desenho e arquitetura já consolidados no mercado que permitem a criação de modelos com maior precisão e facilidade.

Uma das opções disponíveis é o programa Google SketchUp, que possui uma interface gráfica simples e intuitiva, principalmente para a criação de modelos 3D. A integração entre o modelo criado no SketchUp e o ambiente do EnergyPlus pode ser feita por meio de *plug-ins* desenvolvidos especialmente para esta finalidade. O OpenStudio é um exemplo de programa que permite a utilização do SketchUp para a modelagem e definição de alguns parâmetros da simulação. No próximo capítulo serão apresentados mais detalhes e outras funcionalidades do OpenStudio.

3.2. MATLAB/SIMULINK

O MATLAB começou a ser desenvolvido no final dos anos 1970 pelo professor da Universidade do Novo México, Cleve Moler. Seu desejo era que seus alunos fossem

capazes de utilizar novas bibliotecas desenvolvidas para o resolver problemas de álgebra linear, sem a necessidade de que seus estudantes tivessem que aprender Fortran (MOLER, 2004). Logo o programa começou a ser adotado como ferramenta de ensino em diversas universidade principalmente nos departamentos de matemática aplicada.

A linguagem utilizada pelo MATLAB é baseada em matrizes que é uma das formas mais naturais de representar a matemática computacional. Originalmente o MATLAB foi desenvolvido como uma ferramenta que utiliza métodos numéricos para resolver problemas, no entanto é possível adicionar a funcionalidade de realizar cálculos simbólicos em que é possível manipular expressões algébricas sem a necessidade de atribuir valores as variáveis.

O MATLAB oferece uma grande variedade de algoritmos e aplicativos prontos e agrupados em pacotes chamados *toolboxes*, que podem ser obtidos conforme a necessidade do usuário e utilizados em diversas aplicações. Todas as funções utilizadas no MATLAB são documentadas com uma grande quantidade de informações a respeito dos tipos de entrada e saída de cada função e como ela deve ser acessada, além de trazer exemplos que facilitam o entendimento e o uso de cada função.

O Simulink, é um dos pacotes incluídos no MATLAB e consiste em um ambiente em que são utilizados diagramas de blocos para a simulação em múltiplos domínios. Ele oferece um editor de gráficos, uma biblioteca de blocos que podem ser customizados, e ferramentas para modelar e simular sistemas dinâmicos (THE MATHWORKS, INC., 2016). Por ser integrado ao MATLAB é possível incorporar algoritmos do MATLAB aos modelos do Simulink e exportar os dados das simulações para análise mais detalhadas no MATLAB.

A grande versatilidade do programa e as ferramentas oferecidas para projetar sistemas de controle permite que o usuário tenha acesso a cada uma das etapas do processo de desenvolvimento, conforme mostrado na Figura 3-3.

É possível passar por cada uma das etapas de modelagem do sistema, projeto do controlador, teste e verificação e finalmente os ajustes finais e a implantação do sistema de controle. Para oferecer aos projetistas a liberdade de desenvolver diferentes tipos de sistema de controle o MATLAB e o Simulink oferecem uma grande

variedade de *tollboxes* e *blocksets* como: *Fuzzy Logic Toolbox*, *Robust Control Toolbox*, *Model Predictive Control Toolbox*, *System Identification Toolbox*, *Aerospace Blockset*, entre outras.

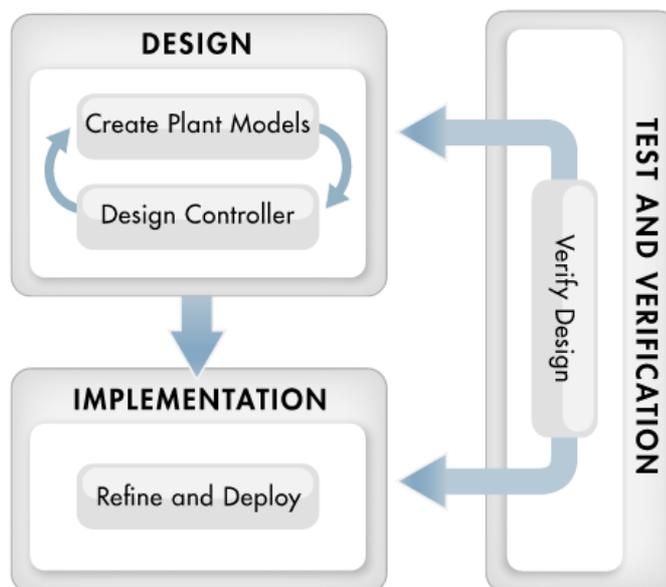


Figura 3-3 – Etapas do processo de projeto de sistemas de controle.

O MATLAB é utilizado mundialmente por diversos engenheiros, estudantes e professores para desenvolver e testar os mais variados tipos de sistemas, incluindo sistemas de segurança em automóveis, dispositivos de monitoramento da saúde, sistemas de telecomunicação (THE MATHWORKS, INC., 2016) e é com certeza uma das ferramentas fundamentais para estudar e criar sistemas que atuem diretamente no desenvolvimento de edifícios eficientes.

3.3. OPENSTUDIO

OpenStudio é uma ferramenta computacional que utiliza o EnergyPlus como mecanismo de simulação e que permite análise energética predial de forma integrada (GUGLIELMETTI, MACUMBER e LONG, 2011). O programa é acompanhado de um *plug-in* para o SketchUp que permite que o usuário crie a geometria e configure diversos parâmetros necessários para a simulação no EnergyPlus. A utilização do *plug-in* oferece ao projetista ferramentas importantes para a construção de seu modelo, permite que arquivos do EnergyPlus (.idf) sejam lidos e modificados, suporta a criação de mapas de iluminação, facilita a verificação do modelo ao disponibilizar opções de renderização das superfícies de acordo com as condições de contorno entre outras funcionalidades que ficam disponíveis em *toolbars* conforme a Figura 3-4.



Figura 3-4 – Visualização das toolbars do plug-in para SketchUp.

O aplicativo OpenStudio oferece uma interface gráfica com o usuário que permite que o esforço feito pelo projetista para desenvolver seu modelo seja drasticamente reduzido, assim como a possibilidade de se cometerem erros (WEAVER, LONG, *et al.*, 2012), principalmente quando se trata da criação e configuração de sistemas HVAC.

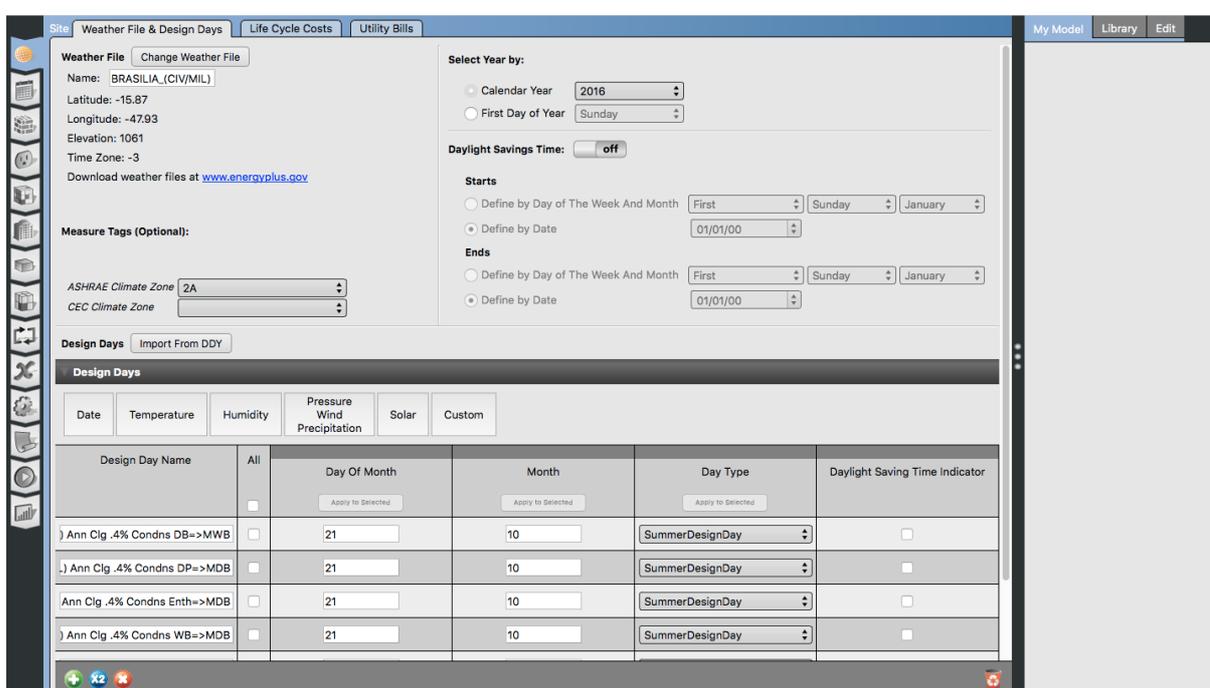


Figura 3-5 – Interface gráfica do OpenStudio.

A Figura 3-5 ilustra como a interface gráfica do programa é organizado em abas que seguem uma sequência lógica de projeto. Iniciando pela aba *Site* (Local) em que são inseridas informações gerais obtidas dos arquivos climáticos como localização e fuso horário, aqui também são incluídos os dados utilizados para realizar o dimensionamento dos sistemas que constituíram o modelo. Essa aba também possui a opção de incluir dados de contas da edificação e de custos do ciclo de vida. A segunda aba é a *Schedules* (Cronograma), aqui o usuário pode definir a rotina do edifício, definindo por exemplo a taxa de ocupação de cada zona de acordo com especificações do projeto. Outra funcionalidade é a possibilidade definir a temperatura de *referência*, em diferentes momentos do dia, dependendo uso que será dado para

cada zona. Apesar do usuário ter total liberdade para criar seus próprios *schedules* o OpenStudio já vem carregado com configurações padrão que facilitam seu uso.

O terceiro item é a aba *Constructions* (Construção), nessa interface são inseridos padrões construtivos para cada tipo de ambiente e superfície. Da mesma forma como a aba anterior, a aba *Constructions* dá liberdade ao usuário para utilizar a configuração que melhor se encaixa em sua realidade, apesar de já existirem padrões pré-definidos baseados na norma ASHRAE 189.1-2009. Utilizando também os padrões estabelecidos por essa norma, a quarta aba *Loads* (Cargas) traz opções pré-definidas para cargas relacionadas a pessoas, iluminação e equipamentos elétricos. Outros tipos de carga também podem ser definidos pelo usuário caso seja necessário.

A próxima aba *Space Types* (Tipos de Espaços) traz a possibilidade do usuário configurar os diferentes tipos de ambientes e podem ser utilizados em seu modelo de acordo com algumas especificações. Nesta aba atribui-se a cada espaço características configuradas nos itens anteriores, como tipo de carga, cronograma e padrões construtivos.

Até agora o OpenStudio demandou do projetista a preparação de seu modelo, definindo e configurando os elementos necessários para a realização da simulação energética. No entanto ainda não foi atribuída nenhuma dessas características ao modelo que será estudado. Iniciando essa etapa a sexta aba, *Facility* (Instalações) definem-se algumas configurações gerais do edifício, como nome, posição em relação ao norte e tipo de padrão construtivo geral. Além disso é possível configurar elementos de sombreamento e iluminação externa. Em seguida a aba *Spaces* (Espaços) permite que sejam atribuídos aos espaços criados no modelo do SketchUp as características previamente configuradas, além de definir em qual zona térmica cada espaço está inserido e abrir a possibilidade ao usuário de customizar alguns aspectos de seus espaços.

Uma vez atribuído a cada espaço a zona térmica corresponde é necessário definir as propriedades de cada zona, para isso é utilizada a aba *Thermal Zones* (Zonas Térmicas). Nela é possível definir os parâmetros que serão utilizados para dimensionar os sistemas aquecimento e de resfriamento. É também nesta aba que o usuário irá indicar quais sistemas HVAC estão presentes em cada zona, o nome do air loop, equipamentos, o cronograma do termostato de aquecimento e resfriamento assim como os cronogramas para umidificação e desumidificação de cada zona.

Configurar corretamente os sistemas HVAC presentes no modelo é fundamental para o sucesso da simulação, para isso utiliza-se a aba *HVAC Systems* (Sistemas HVAC). A Figura 3-6 ilustra como a interface gráfica do OpenStudio e a grande variedades de componentes, em sua biblioteca, podem facilitar a compreensão e configuração dos sistemas.

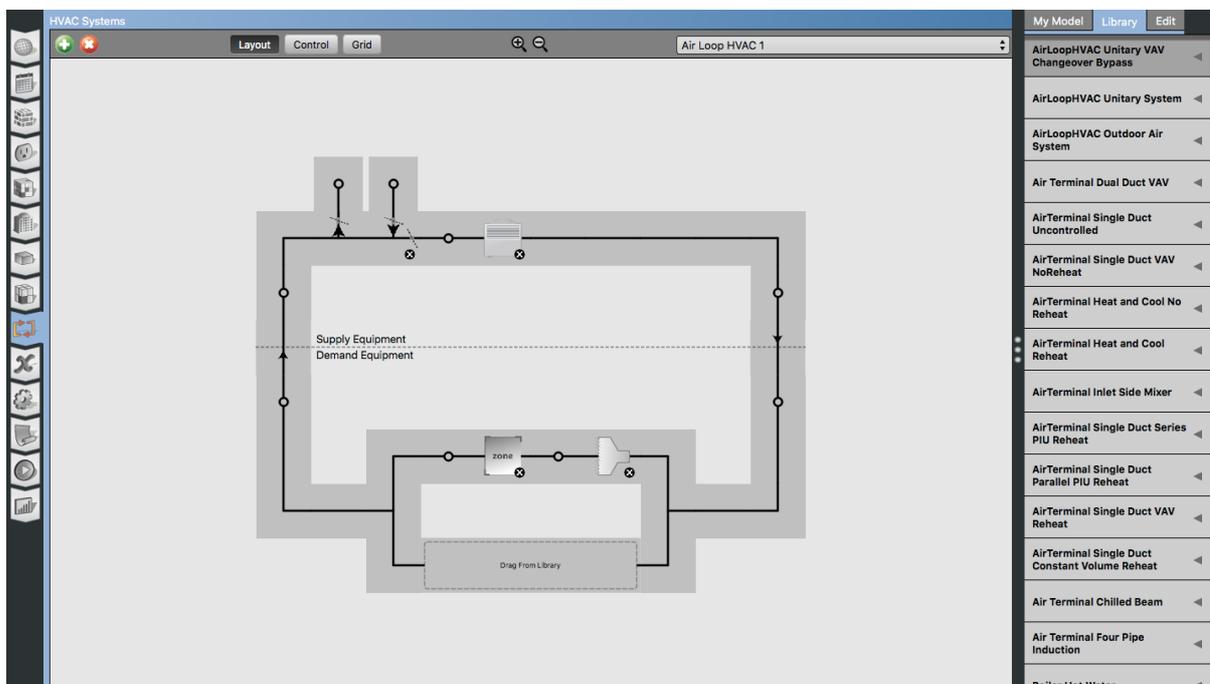


Figura 3-6 – Aba *HVAC Systems*.

As próximas três abas são responsáveis pela configuração dos parâmetros da simulação, uma vez que todo modelo já foi configurado nas etapas anteriores. A primeira delas é a aba *Output Variables* (Variáveis de Saída), onde é possível escolher quais variáveis serão disponibilizadas ao final da simulação, bem como a frequência em que serão reportadas. Na aba seguinte *Simulation Settings* (Configurações da Simulação) o projetista pode definir o período em que será realizada a simulação, os fatores de dimensionamento para os sistemas HVAC, o número de *timesteps* entre outras opções mais avançadas.

Uma das muitas funcionalidades que OpenStudio possui são as chamadas *Measures*, que constituem um conjunto de instruções programadas para alterar o comportamento do modelo de acordo com uma aplicação específica. Elas podem apresentar desde rotinas simples como a de busca e substituição de um parâmetro a rotinas complexas, já que possuem total acesso ao OpenStudio (ROTH, GOLDWASSER e PARKER, 2016). Sua aplicação é muito ampla, permitindo que diversos usuários criem suas

próprias *Measures* para determinadas aplicações e as compartilhem com outros usuários. Sendo assim, o programa disponibiliza a aba *Measures* para a adição de rotinas que possam interessar ao projetista.

Após configurar todo o modelo e os parâmetros da simulação o usuário pode dar início a simulação utilizando a próxima aba, *Run Simulation* (Rodar Simulação). Além de iniciar a simulação o usuário pode ter acesso direto aos arquivos que são gerados pelo EnergyPlus durante o processo, como por exemplo o arquivo de erro (.err), que contem informações sobre os possíveis problemas no modelo que impediram o sucesso da simulação.

Após o término da simulação o OpenStudio disponibiliza os resultados obtidos na última aba, *Results Summary* (Resumo dos Resultados). Aqui o usuário pode optar por visualizar os resultados na forma do OpenStudio ou na forma do EnergyPlus. Em geral, as duas opções trazem as mesmas informações, no entanto os resultados do OpenStudio trazem gráficos e um *layout* mais amigável. Ambos os resultados podem ser visualizados novamente sem a necessidade de abrir o OpenStudio pois eles ficam salvos em arquivos .html que podem ser acessados pelo navegador.

Muitas vezes o projetista necessita avaliar dados mais detalhados dos resultados obtidos, para isso é possível utilizar o programa ResultsViewer que acompanha o OpenStudio. Com ele é possível gerar gráficos para cada uma das variáveis disponíveis. No entanto o ResultsViewer se mostra uma ferramenta limitada, pois é difícil comparar e interpretar seus resultados assim como utiliza-los para a otimização do projeto (ATTIA e HERDE, 2011).

3.4. BUILDING CONTROL VIRTUAL TEST BED (BCVTB)

Projetar edifícios com consumo eficiente de energia requer que o projetista tenha a sua disposição ferramentas capazes tanto de simular o comportamento de um edifício, como um todo, e seu consumo energético, quanto de desenvolver sistemas avançados de controle e otimização. Devido, em parte, a pouca integração entre as equipes de modelagem e simulação de edificações e de sistemas de controle, existe hoje uma lacuna na funcionalidade das ferramentas disponíveis para a pesquisa de soluções energéticas em edifícios.

O EnergyPlus é um dos programas mais completos, quando levados em conta sua capacidade de analisar e simular cargas térmicas de forma integrada com as

estruturas prediais, mas que é capaz apenas de implementar sistemas de controle mais simples. Por outro lado, o MATLAB e o Simulink são ferramentas que possuem grande capacidade de desenvolver e simular sistemas controle com alto grau de complexidade, em parte, devido a grande quantidade de *toolboxes* disponíveis. Fica claro então que a integração entre essas ferramentas pode trazer grande benefícios em projetos de edificações eficientes.

As versões mais recentes de EnergyPlus permitem seu acoplamento com unidades externas para a realização de co-simulação ampliando sua capacidade de integração de sistemas de controle. No entanto, ainda não é possível fazer a interligação direta com o MATLAB, Simulink ou outros programas.

O Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) surge como proposta de proporcionar aos projetistas de edifícios e engenheiros de controle um ambiente que funcione como uma ponte entre diversos programas de simulação. O BCVTB foi desenvolvido utilizando a arquitetura do Ptolomy II, um programa baseado em Java e desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley (WETTER e HAVES, 2008). Diferentemente de outros programas que buscam realizar a conexão direta entre dois simuladores o BCVTB utiliza uma estrutura modular que permite a conexão indireta de um número ilimitado de simuladores, sendo possível realizar simulações localmente em um computador ou remotamente pela internet fazendo o uso até de sistemas operacionais diferentes, isso é feito utilizando BSD sockets (WETTER, 2011). Atualmente os programas que tem conexão com o BCVTB são: EnergyPlus, Dymola, Radiance, MATLAB, Simulink, ESP-r, TRNSYS, Functional Mock-Up Units (FMU), BACnet stack que permite a troca de dados entre sistemas de controle compatíveis com o BACnet e por último é possível fazer a conexão com uma interface analógica/digital conectada via porta USB, caso o usuário sinta a necessidade o BCVTB permite ainda que outros programas sejam configurados funcionar em conjunto com os demais programas já previstos.

Não faz parte do escopo deste trabalho estudar como é feita a conexão do BCVTB com cada um dos programas de simulação. No entanto é preciso destacar quais são os procedimentos necessários para se utilizar o programa para fazer a ponte entre EnergyPlus e Simulink. Os procedimentos a seguir serão descritos baseados no manual do usuário da versão 1.6.0 do BCVTB.

A conexão tanto do EnergyPlus quanto do Simulink com o BCVTB pode ser feita utilizando a interface gráfica disponível no ambiente do Ptolomy. Existe um bloco chamado Simulator que deve ser configurado para, durante a simulação, chamar cada um dos programas utilizando determinados argumentos, entre outros parâmetros. Um exemplo de como configurar esses parâmetros é mostrada na Figura 3-7.

Nesse exemplo o Energy Plus é acionado pela linha de comando, utilizando os argumentos especificados, sendo que os principais são o arquivo climático e o arquivo .idf com o modelo do EnergyPlus. Sem esses argumentos ocorrerá um erro ao tentar rodar o programa. Os demais argumentos são tratados com mais detalhes no Apêndice A. Também é preciso definir em qual diretório está o arquivo idf, e onde será gravado o arquivo *Simulation.log*, que pode ser utilizado para encontrar possíveis erros que levaram a finalizar a simulação sem sucesso. É importante citar que a pasta utilizada para cada programa configurado deve ser única. Por último, é definido o tempo limite para a resposta do *socket*, neste caso configurado para um minuto, Caso esse tempo seja ultrapassado sem nenhuma resposta do programa a simulação é finalizada.

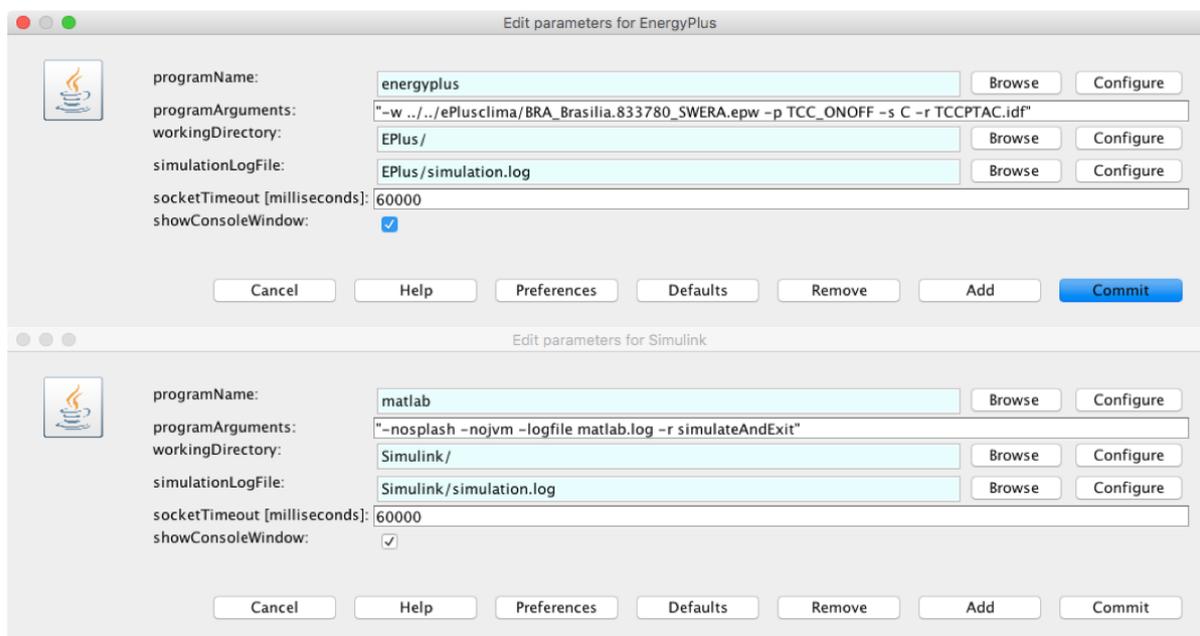
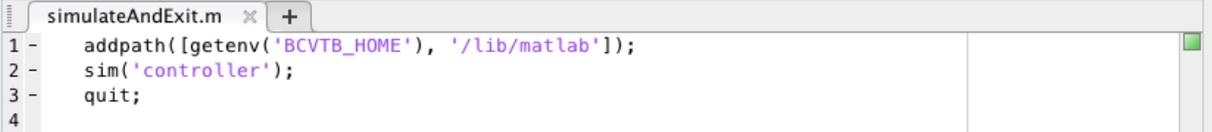


Figura 3-7 – Configuração do bloco Simulator para EnergyPlus e Simulink

O mesmo procedimento deve ser seguido para se utilizar o Simulink. No entanto, nesse caso o bloco Simulator é configurado para chamar o MATLAB que, por sua vez, irá rodar o código *simulateAndExit.m*, representado pela Figura 3-8, que fará o acesso ao modelo criado em Simulink.



```
simulateAndExit.m  x  +  
1 -  addpath([getenv('BCVTB_HOME'), '/lib/matlab']);  
2 -  sim('controller');  
3 -  quit;  
4
```

Figura 3-8 – *script* em MATLAB que chama o modelo criado em Simulink

4. PROPOSTA DE SIMULAÇÃO

4.1. AMBIENTE PREDIAL

O ambiente estudado é uma sala localizada em um edifício comercial localizada em Brasília, Distrito Federal. De acordo com a norma ASHRAE 90.1-2013, Brasília está inserida em uma zona climática classificada como quente e húmida, recebendo a numeração 2A.

A sala possui uma área total de aproximadamente 100m² e está dividida em seis ambientes conforme ilustrado na Figura 4-1 e na Tabela 4-1. Somente a Sala de Reuniões, Sala da Diretoria e a Sala de Desenvolvimento possuem sistema de ar-condicionado. Para cada uma delas será modelado um ar-condicionado do tipo janela. A linha laranja (Figura 4-1) representa a posição da sala em relação a norte-sul geográfico. Foi definido, para esse caso que, a face da janela da Sala de Desenvolvimento terá um ângulo de aproximadamente trezentos e quarenta graus em relação ao norte, contados em sentido horário.

A sala estudada representa apenas um dos ambientes existentes no edifício, portanto foi necessário adotar algumas adaptações no modelo já que, nessa situação, nem todas as suas superfícies eram expostas ao ambiente externo. Foi adicionado então um elemento de sombreamento diretamente acima do teto e, as paredes que fazem divisa com outras salas, a configuração de não exposição ao sol e vento.

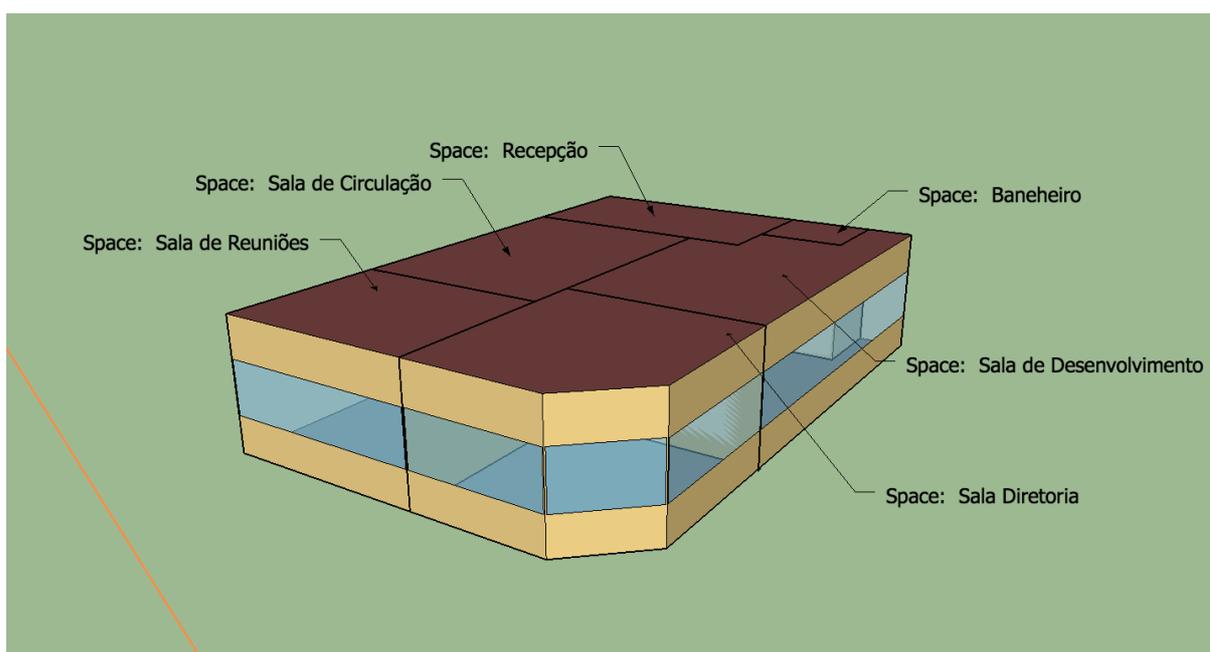


Figura 4-1 – Modelo 3D da Sala.

Tabela 4-1 – Divisão dos ambientes por área.

Ambiente	Área(m ²)
Sala de Desenvolvimento	24,96
Sala da Diretoria	17,61
Sala de Reuniões	14,35
Sala de Circulação	23,78
Recepção	15,9
Banheiro	3,42
Total	100,02

Ainda no SketchUp, foi atribuído a cada uma das salas um padrão de espaço disponível na biblioteca do OpenStudio. As salas de circulação, da Diretoria, de Desenvolvimento e Recepção foram configuradas como *ClosedOffice - CZ1-3*. A Sala de Reunião foi configurada como *Conference - CZ1-3* e o Banheiro como *Restroom - CZ1-3*. Onde *CZ1-3* determina para qual zona climática esse espaço se aplica, os quais são válidos para ambientes localizados entre as zonas 1 e 3. Foi atribuído, também, características gerais a edificação, definindo-o como um espaço do tipo *WholeBuilding - Sm Office - CZ1-3*.

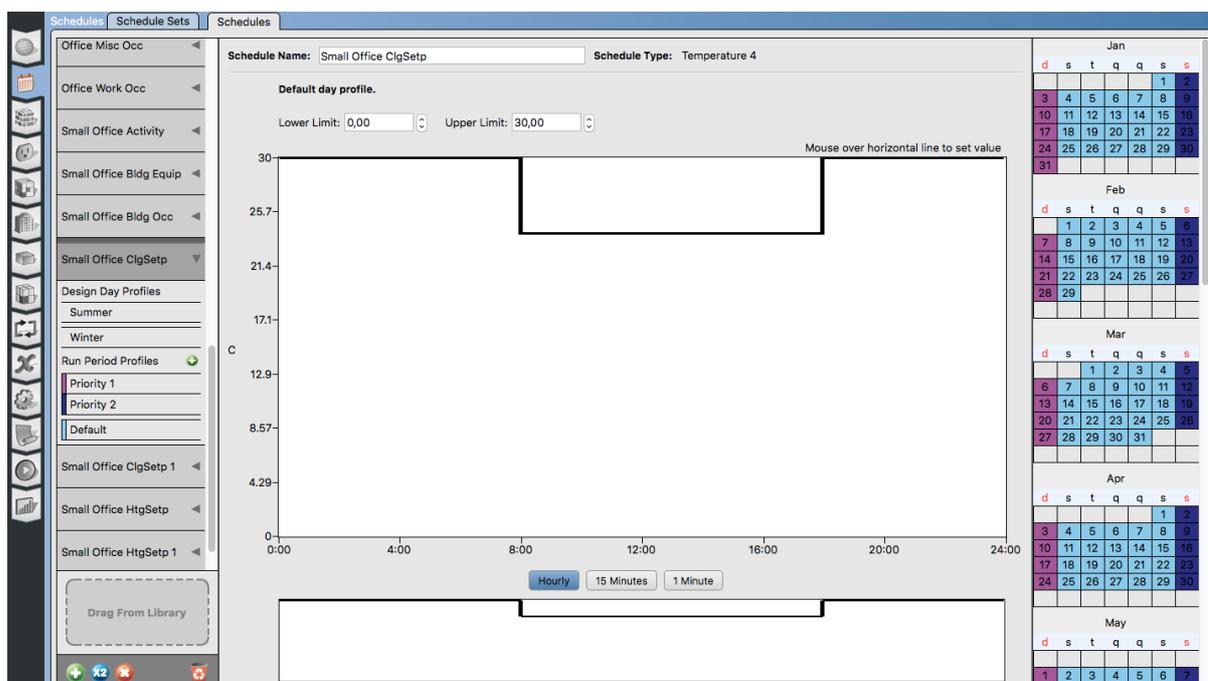
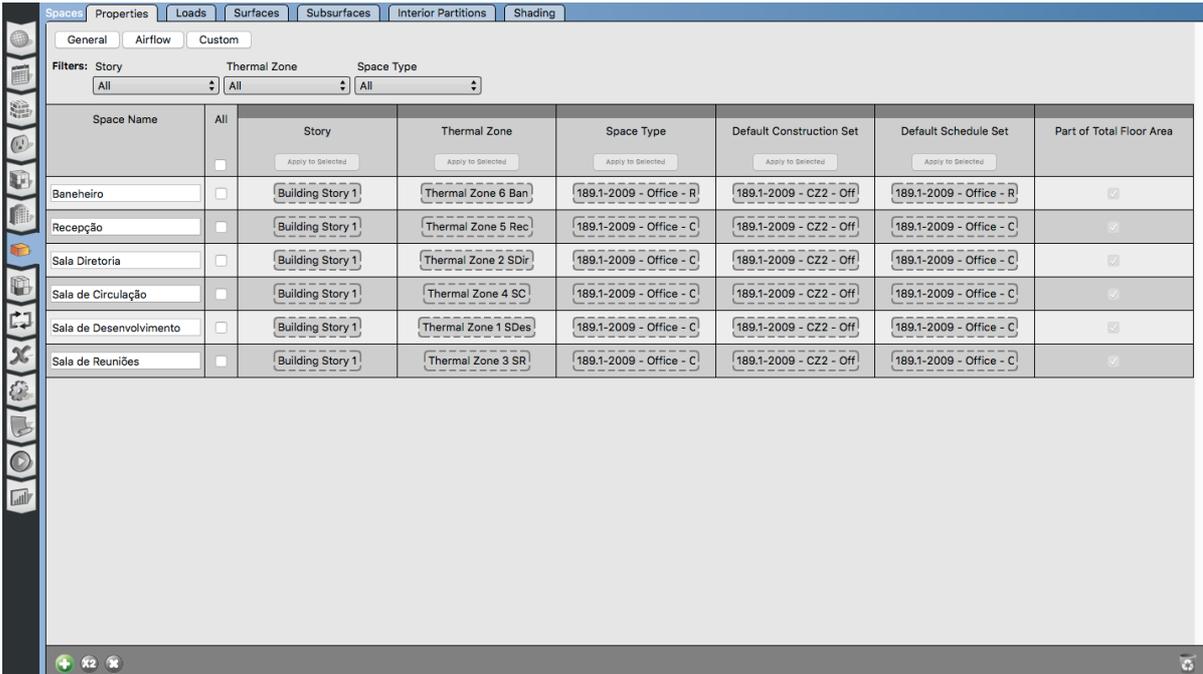


Figura 4-2 – Schedule padrão para temperatura de referência de refrigeração.

Como já citado anteriormente cada tipo de espaço contém informações sobre padrões construtivos típicos, cronograma de ocupação, uso de equipamentos entre outras características. Para o estudo realizado não foi necessário criar novos tipos de espaços, visto que aqueles presentes na biblioteca do programa já são suficientes para atender as necessidades do projeto. Após criada a geometria da sala os demais parâmetros foram configurados de acordo com os passos citados na seção anterior.

Os dados climáticos foram inseridos no modelo conforme mostrado anteriormente pela Figura 3-1. O passo seguinte foi ajustar o *schedule* que determina a temperatura de referência que será utilizado pelo sistema HVAC. O *schedule* foi ajustado como na Figura 4-2 para que, durante os dias de semana e durante o horário comercial, de 8h as 18h, a temperatura de *referência* do sistema de refrigeração permaneça em 24°C. Fora desse período e intervalo horários a *referência* foi alterado para 30°C, fazendo com que o ar-condicionado fique desligado. Foi configurado também um *schedule* para os sábados, mantendo a mesma lógica para as temperaturas de *referência*, e horário de funcionamento foi reduzido, de 9h as 16h. Nos domingos o sistema foi configurado para permanecer desligado. O mesmo procedimento foi utilizado para configurar a temperatura de *referência* de aquecimento, configurando-a em -2°C durante todos os períodos do dia, condicionando o desligamento permanente do sistema, ou seja, sem aquecimento.



Space Name	All	Story	Thermal Zone	Space Type	Default Construction Set	Default Schedule Set	Part of Total Floor Area
Baneheiro	<input type="checkbox"/>	Building Story 1	Thermal Zone 6 Ban	189.1-2009 - Office - R	189.1-2009 - CZ2 - Off	189.1-2009 - Office - R	<input checked="" type="checkbox"/>
Recepção	<input type="checkbox"/>	Building Story 1	Thermal Zone 5 Rec	189.1-2009 - Office - C	189.1-2009 - CZ2 - Off	189.1-2009 - Office - C	<input checked="" type="checkbox"/>
Sala Diretoria	<input type="checkbox"/>	Building Story 1	Thermal Zone 2 SDir	189.1-2009 - Office - C	189.1-2009 - CZ2 - Off	189.1-2009 - Office - C	<input checked="" type="checkbox"/>
Sala de Circulação	<input type="checkbox"/>	Building Story 1	Thermal Zone 4 SC	189.1-2009 - Office - C	189.1-2009 - CZ2 - Off	189.1-2009 - Office - C	<input checked="" type="checkbox"/>
Sala de Desenvolvimento	<input type="checkbox"/>	Building Story 1	Thermal Zone 1 SDes	189.1-2009 - Office - C	189.1-2009 - CZ2 - Off	189.1-2009 - Office - C	<input checked="" type="checkbox"/>
Sala de Reuniões	<input type="checkbox"/>	Building Story 1	Thermal Zone 3 SR	189.1-2009 - Office - C	189.1-2009 - CZ2 - Off	189.1-2009 - Office - C	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4-3 – Configuração dos espaços do modelo.

O próximo passo foi o de alocar cada um dos espaços em suas respectivas zonas térmicas. A Figura 4-3 ilustra como a aba *Spaces* foi utilizada para isso, além de poder ser empregada para definir outros parâmetros relacionadas a cargas, superfícies, sub-superfícies, específicas de cada espaço. No entanto, não foi preciso ajustar esses parâmetros pois o próprio programa se encarrega de preenche-los corretamente.

Uma vez feitas as configurações necessárias na aba *Spaces* foi possível utilizar a aba *Thermal Zones* para configurar cada uma das zonas térmicas de acordo com as peculiaridades de cada uma das salas. O principal objetivo nesta etapa foi definir corretamente qual sistema de ar-condicionado representaria um equipamento do tipo janela.

Uma das opções disponíveis era utilizar a aba *HVAC Systems* para configurar um *air loop* como o da Figura 3-6, adicionando e configurando individualmente cada um dos componentes do sistema da malha. Outra opção era inserir um equipamento na zona que fosse equivalente ao modelo desejado. Dentre as muitas opções que programa traz aquela que se mostrou mais adequada ao projeto foi a utilização de equipamentos do tipo PTAC (Packaged Terminal Air Conditioner). A Figura 4-4 ilustra como cada equipamento foi inserido em sua respectiva zona.

Name	All	Turn On Ideal Air Loads	Air Loop Name	Zone Equipment	Cooling Thermostat Schedule	Heating Thermostat Schedule	Humidifying Setpoint Schedule	Dehumidifying Setpoint Schedule	Multiplier
Thermal Zone 1 SDes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None	Cycling PTAC DX Clg	Small Office ClgSetp	Small Office HtgSetp 1			1
Thermal Zone 2 SDir	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None	Cycling PTAC DX Clg	Small Office ClgSetp	Small Office HtgSetp 1			1
Thermal Zone 3 SR	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None	Cycling PTAC DX Clg	Small Office ClgSetp	Small Office HtgSetp 1			1
Thermal Zone 4 SC	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None		Small Office ClgSetp	Small Office HtgSetp 1			1
Thermal Zone 5 Rec	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None		Small Office ClgSetp	Small Office HtgSetp 1			1
Thermal Zone 6 Ban	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None		Small Office ClgSetp	Small Office HtgSetp 1			1

Figura 4-4 – Configuração das zonas térmicas do modelo.

A configuração de cada um dos equipamentos foi feita de forma simples pois, sempre que possível, utilizou-se a opção *autosize*, que deixa a cargo do próprio programa dimensionar o equipamento de acordo com a carga térmica de cada zona.

Um dos parâmetros configuráveis do PTAC, que merece destaque, é o *schedule* que define a disponibilidade do equipamento. A princípio, esse parâmetro é configurado para que o ar-condicionado esteja sempre disponível ou seja, quando a temperatura da zona chega a temperatura de *referência*, previamente definida, o equipamento é acionado e resfria o ambiente. Esse parâmetro será peça fundamental na implementação do sistema de controle.

Finalizando a preparação do modelo para a simulação, foram definidas, como variáveis de saída, as temperaturas de cada zona e a temperatura externa. Além disso, foi definido que a simulação acontecerá em período de uma semana, com um *timestep* de um minuto. Foi também definido um fator de 0,8 para o dimensionamento do sistema de resfriamento. Esse valor foi utilizado para subdimensionar os equipamentos de ar-condicionado e assim justificar a implementação de um sistema de controle.

Os dados reportados na Tabela 4-2 serão utilizados na seção 4.3 para redimensionar o sistema, após serem realizadas modificações no modelo para adequá-lo a estratégia de controle.

Tabela 4-2 – Dimensionamento inicial dos equipamentos de ar-condicionado

	Carga projetada(W)	Carga projetada pelo usuário (W)	Carga projetada pelo usuário por área(W/m ²)	Fluxo de Ar projetado (m ³ /s)	Fluxo de ar projetado pelo usuário (m ³ /s)
Thermal Zone 1 SDes	806.66	645.33	25.85	0.071	0.056
Thermal Zone 2 SDir	750.34	600.27	34.09	0.069	0.055
Thermal Zone 3 SR	966.64	773.31	53.89	0.089	0.073

4.2. IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE

Equipamentos de ar-condicionado comerciais são equipados com sistemas de controle simples do tipo Liga-Desliga. Quando deseja-se implementar um sistema de controle mais complexo ou que atenda a uma determinada situação é usual desenvolver controladores externos que consigam causar interferências no sistema

de controle original. Isso pode ser alcançado quando se define uma a temperatura de atuação do ar-condicionado para o seu mínimo, por exemplo 17°C, e implementando um sistema que, de acordo com as necessidades do projetista, atue diretamente no relé que liga e desliga do equipamento. Essa estratégia evita que sejam realizadas mudanças internas no ar-condicionado e que possam descaracteriza-lo de alguma maneira.

Para alcançar o objetivo proposto, optou-se por controlar a variável que define a característica de cada equipamento. Para isso foi necessário implementar controladores que, a partir da análise de informações como temperatura ambiente e temperatura de *referência*, definida pelo usuário, sejam capazes determinar o momento em que o equipamento deve estar ligado ou desligado, alterando o valor da variável entre 1 e 0. Foi necessário, também, alterar o *schedule* da temperatura de refrigeração, para que ela se mantivesse constante em 17°C. A alteração desse parâmetro irá influenciar o dimensionamento dos equipamentos. O procedimento utilizado para contornar essa situação será apresentado 4.3.

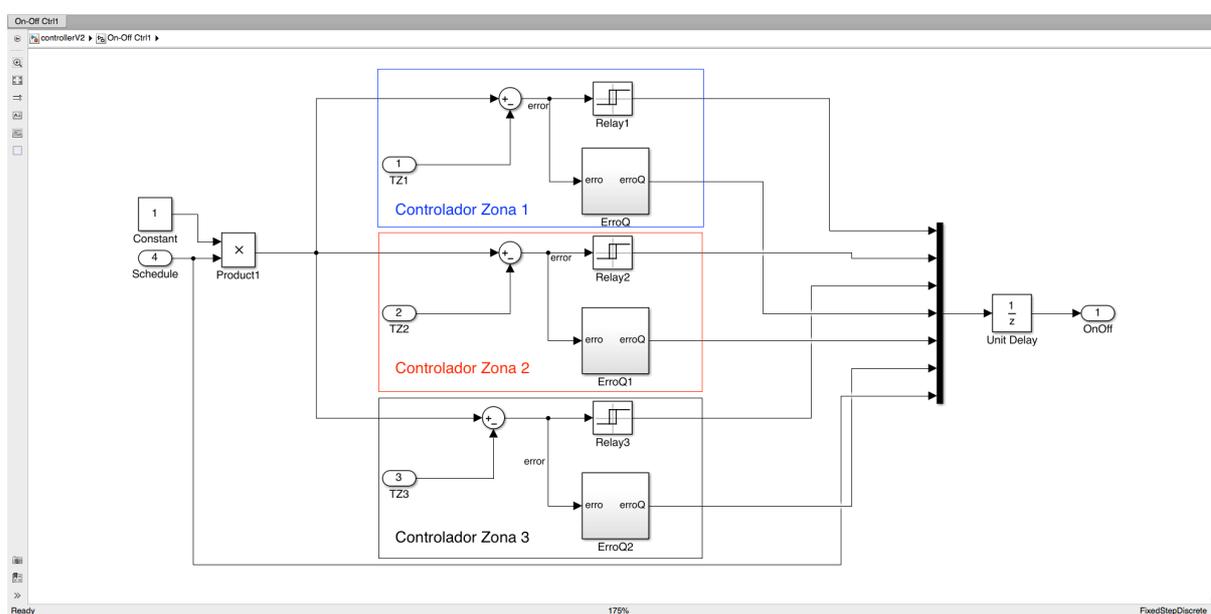


Figura 4-5 – Diagrama de blocos do controlador Liga-Desliga.

Antes de iniciar a implementação dos controladores, foi necessário configurar o ambiente do Simulink, devido a exigências do processo de co-simulação. Foi então configurado que a simulação ocorreria em tempo discreto a intervalos fixos com um *timestep* de 60 segundos.

O primeiro sistema implementado foi um controlador simples Liga-Desliga que será utilizado como base para a comparação dos resultados. No diagrama de blocos da Figura 4-5, criado em Simulink, estão representados os controladores de cada uma das zonas térmicas. Apesar de cada zona possuir um controlador próprio os parâmetros são os mesmos para todos eles.

Este modelo possui quatro variáveis de entrada, todas obtidas diretamente do EnergyPlus. As variáveis TZ1, TZ2 e TZ3 são respectivamente as temperaturas internas das zonas 1, 2 e 3. A variável Schedule estabelece a escala que define as temperaturas de *referência* desejadas, que são as mesmas para todas as zonas.

Os blocos Relay, Relay1 e Relay2 foram configurados de forma que quando a diferença entre a temperatura de *referência* e a temperatura ambiente for maior que 0,2 graus o controlador envia o sinal 1, definindo o acionamento do ar-condicionado. Quando a diferença é menor que -0,2 graus o controlador envia o sinal 0, desligando o equipamento

O segundo dispositivo implementado foi um controlador proporcional com ganho -3 ligado a um PWM mostrado na Figura 4-6. O PWM foi configurado para ter um ciclo com período de 4 minutos e amplitude 1. O valor do ganho proporcional foi escolhido de maneira que o sistema tivesse uma maior sensibilidade a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de *referência* e pudesse atuar de forma mais rápida.

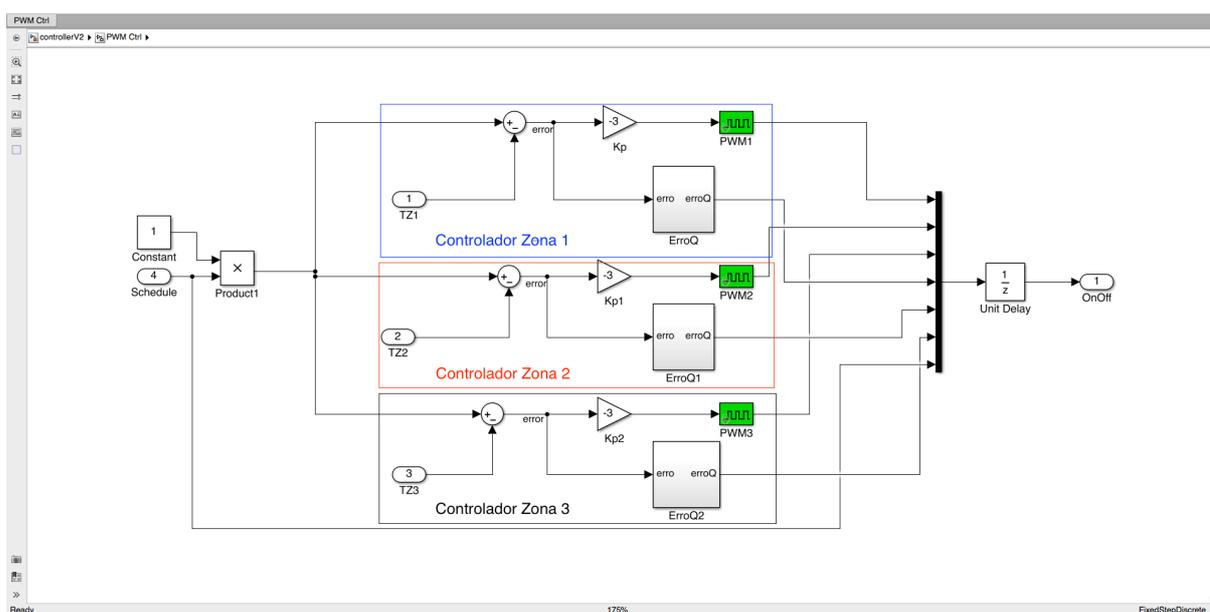


Figura 4-6 – Diagrama de blocos do controlador Proporcional utilizando PWM.

Por último foi implementado um controlador proporcional integral, ilustrado na Figura 4-7. Por se tratar de um bloco já existente na biblioteca do Simulink, o bloco do controlador PI pode ser facilmente configurado, definindo os parâmetros relevantes. Neste projeto foi definido que o controlador teria um ganho proporcional de -3 e o canal integral teria um valor de -0,02. Além disso foi configurado um sistema *anti-windup* para evitar a saturação do controlador fora do período de funcionamento do ar-condicionado.

Para determinar a eficiência de cada controlador, foi implementado um bloco que calculasse o erro quadrático de cada controlador conforme a Equação 3-1 onde a variável e é a diferença entre a temperatura de referência e a temperatura interna de cada zona. Para garantir que o erro seja calculado apenas durante o horário comercial durante todos os dias da semana incluindo sábado, foi implementa o diagrama de blocos da Figura 4-8.

$$erroQ = \int_T e^2 \quad (4-1)$$

É importante ressaltar a utilização de blocos que fazem parte da biblioteca discreta do Simulink, como é o caso do controlador PI discreto e do integrador discreto já que ambas funções têm equivalentes para o caso contínuo e não poderiam ser utilizadas neste projeto.

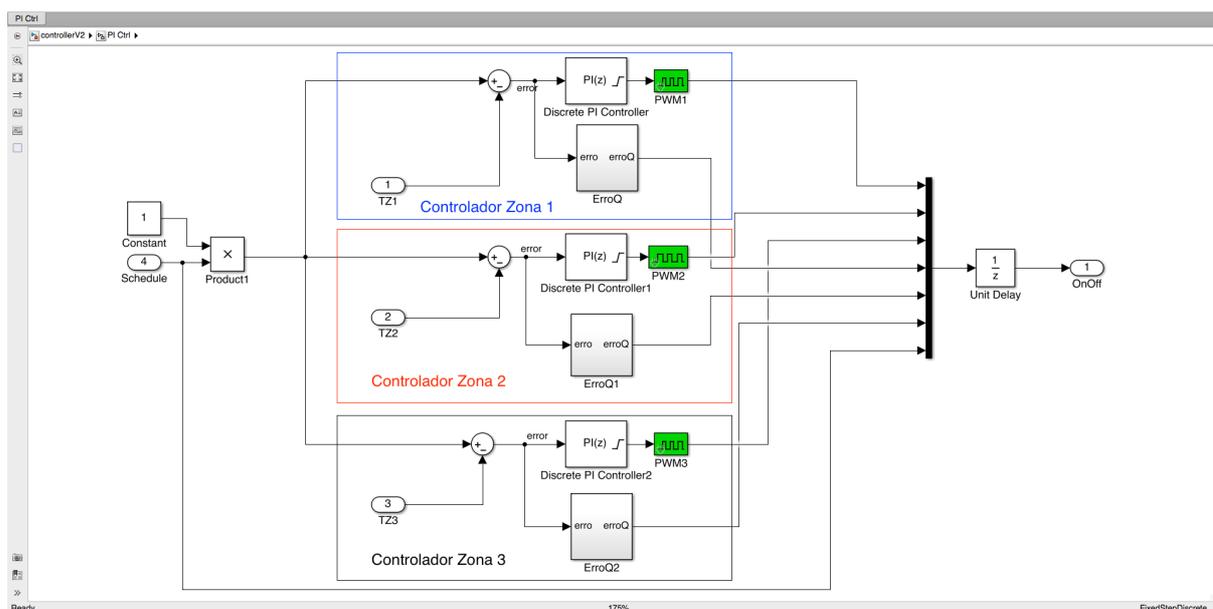


Figura 4-7 – Diagrama de Blocos do Controlador PI

Após a multiplexação de todos os sinais é necessário a utilização de uma função que insira um atraso de um *timestep* no modelo, isso é feito pelo bloco *UnitDelay* que está presente em todos os controladores. Essa é uma peça fundamental para que as decisões de controle sejam implementadas na iteração seguinte do EnergyPlus. Caso esse bloco não esteja presente a simulação não funcionará pois ficará parada na primeira iteração.

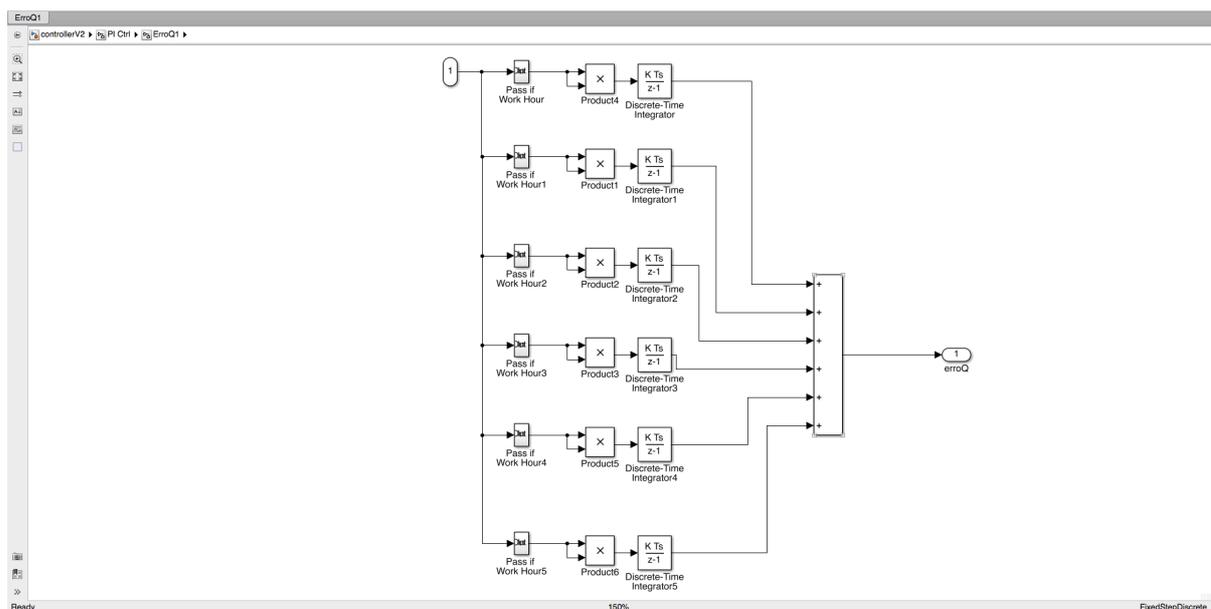


Figura 4-8 – Diagrama de blocos que calcula o erro quadrático.

4.3. COSIMULAÇÃO – ENERGY PLUS/SIMULINK

A configuração do ambiente de simulação foi feita em três etapas. A primeira delas envolveu a preparação do modelo do EnergyPlus, em seguida foi realizada a configuração do modelo do Simulink e por último foi realizada a ligação entre os dois modelos utilizando o ambiente do BCVTB. Os detalhes de cada etapa estão descritos a seguir.

4.3.1. Preparação do modelo no EnergyPlus

Devido a estratégia de controle adotada, optou-se por redefinir a temperatura de referência de refrigeração de todas as zonas mantendo um valor constante de 20°C. Como já mencionado anteriormente isso aumentará a carga térmica projetada e consequentemente os aparelhos de ar-condicionado serão superdimensionados. Para evitar que isso aconteça foram utilizados os valores da Tabela 4-2 para adequar o fator de dimensionamento que foi alterado para 0,54. Com base nesses dados também foi

atribuído aos ventiladores de cada um dos equipamentos um valor máximo para o fluxo de ar. A Tabela 4-3 mostra os novos valores dimensionados.

Tabela 4-3 – Dimensionamento final dos equipamentos de ar-condicionado.

	Carga projetada(W)	Carga projetada pelo usuário (W)	Carga projetada pelo usuário por área(W/m ²)	Fluxo de Ar projetado (m ³ /s)	Fluxo de ar projetado pelo usuário (m ³ /s)
Thermal Zone 1 SDes	1159.33	626.04	25.08	0.179	0.056
Thermal Zone 2 SDir	1115.46	602.35	34.21	0.172	0.055
Thermal Zone 3 SR	1381.13	745.81	51.97	0.213	0.073

Seguindo o processo descrito na seção 3.4 foram criados os objetos necessários para ativar a interface externa do EnergyPlus e os *schedules* nos quais serão gravadas as informações obtidas do ambiente externo. A Figura 4-9 apresenta a parte do código do arquivo de entrada do EnergyPlus que representa a criação desses objetos.

Uma vez criados os objetos que farão a comunicação com a interface externa, foi necessário definir em quais equipamentos eles irão atuar. Os objetos ControlZ1, ControlZ2 e ControlZ3 foram definidos como *schedules* dos equipamentos das Zonas 1, 2 e 3, respectivamente. Esses objetos receberão diretamente os valores das saídas dos controladores implementados no Simulink e serão responsáveis por ligar e desligar os equipamentos.

Os outros três objetos criados irão apenas receber os valores dos erros quadráticos calculados pelo Simulink e serão disponibilizados para visualização ao final da simulação como variáveis de saída.

Além de configurar os objetos do EnergyPlus, que receberão informação da interface externa, é preciso disponibilizar aqueles que enviarão informação para a interface externa. Isso é feito utilizando os objetos definidos como variáveis de saída. O código que define todas as variáveis de saída disponíveis está disponível no Apêndice A.

Após configurar todos os parâmetros necessário do EnergyPlus, foi necessário definir quais objetos enviarão informação do EnergyPlus e quais receberão informação da interface externa e em que ordem. Para isso, foi configurado o arquivo *Variables.cfg* conforme a Figura 4-10.

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: EXTERNALINTERFACE =====
ExternalInterface,
  PtolemyServer;      !- Name of External Interface

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: EXTERNALINTERFACE:SCHEDULE =====
! Schedule de disponibilidade para PTAC da Zona1. Este objeto é definido diretamente pela interface externa.
! Define quando o ar-condicionado está ligado ou desligado
! Durante warm-up e system-sizing, seu valor é fixado em 0.
ExternalInterface:Schedule,
  ControlZ1,          !- Name
  OnOff,              !- Schedule Type Limits Name
  0;                  !- Initial Value

! Schedule de disponibilidade para PTAC da Zona2. Este objeto é definido diretamente pela interface externa.
! Define quando o ar-condicionado está ligado ou desligado
! Durante warm-up e system-sizing, seu valor é fixado em 0.
ExternalInterface:Schedule,
  ControlZ2,          !- Name
  OnOff,              !- Schedule Type Limits Name
  0;                  !- Initial Value

! Schedule de disponibilidade para PTAC da Zona3. Este objeto é definido diretamente pela interface externa.
! Define quando o ar-condicionado está ligado ou desligado
! Durante warm-up e system-sizing, seu valor é fixado em 0.
ExternalInterface:Schedule,
  ControlZ3,          !- Name
  OnOff,              !- Schedule Type Limits Name
  0;                  !- Initial Value

! Define o erro quadrático do sistema de controle da Zona1. Este objeto é definido diretamente pela interface externa.
! Durante warm-up e system-sizing, seu valor é fixado em 0.
ExternalInterface:Schedule,
  ErroQ1,             !- Name
  Any Number,         !- Schedule Type Limits Name
  0;                  !- Initial Value

! Define o erro quadrático do sistema de controle da Zona2. Este objeto é definido diretamente pela interface externa.
! Durante warm-up e system-sizing, seu valor é fixado em 0.
ExternalInterface:Schedule,
  ErroQ2,             !- Name
  Any Number,         !- Schedule Type Limits Name
  0;                  !- Initial Value

! Define o erro quadrático do sistema de controle da Zona3. Este objeto é definido diretamente pela interface externa.
! Durante warm-up e system-sizing, seu valor é fixado em 0.
ExternalInterface:Schedule,
  ErroQ3,             !- Name
  Any Number,         !- Schedule Type Limits Name
  0;                  !- Initial Value

```

Figura 4-9 – Código que cria os objetos necessários para a comunicação do EnergyPlus com a interface externa.

O código implementado define que um vetor de saída, com cinco elementos, será enviado do EnergyPlus para o PtolomyII e que um vetor de entrada, com seis elementos, será enviado do PtolomyII para o EnergyPlus, com as informações dos controladores. Cada uma das variáveis será acessada de acordo com a ordem que aparecem no código.

```

1 <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
2 <!DOCTYPE BCVTB-variables SYSTEM "variables.dtd">
3 <BCVTB-variables>
4   <variable source="EnergyPlus">
5     <EnergyPlus name="THERMAL_ZONE 1 SDES" type="Zone Air Temperature"/>
6   </variable>
7   <variable source="EnergyPlus">
8     <EnergyPlus name="THERMAL_ZONE 2 SDIR" type="Zone Air Temperature"/>
9   </variable>
10  <variable source="EnergyPlus">
11    <EnergyPlus name="THERMAL_ZONE 3 SR" type="Zone Air Temperature"/>
12  </variable>
13  <variable source="EnergyPlus">
14    <EnergyPlus name="TSETP" type="Schedule Value"/>
15  </variable>
16  <variable source="EnergyPlus">
17    <EnergyPlus name="ENVIRONMENT" type="Site Outdoor Air Drybulb Temperature"/>
18  </variable>
19  <variable source="PtoLemy">
20    <EnergyPlus schedule="CONTROLZ1"/>
21  </variable>
22  <variable source="PtoLemy">
23    <EnergyPlus schedule="CONTROLZ2"/>
24  </variable>
25  <variable source="PtoLemy">
26    <EnergyPlus schedule="CONTROLZ3"/>
27  </variable>
28  <variable source="PtoLemy">
29    <EnergyPlus schedule="ErroQ1"/>
30  </variable>
31  <variable source="PtoLemy">
32    <EnergyPlus schedule="ErroQ2"/>
33  </variable>
34  <variable source="PtoLemy">
35    <EnergyPlus schedule="ErroQ3"/>
36  </variable>
37 </BCVTB-variables>

```

Figura 4-10 – Código utilizado no arquivo *Variables.cfg*.

4.3.2. Preparação do diagrama de blocos do Simulink

O único elemento que precisa ser configurado no Simulink é o bloco do BCVTB que pode ser incluído a biblioteca do programa conforme citado anteriormente. A configuração do modelo do bloco do BCVTB é mostrado na Figura 4-11.

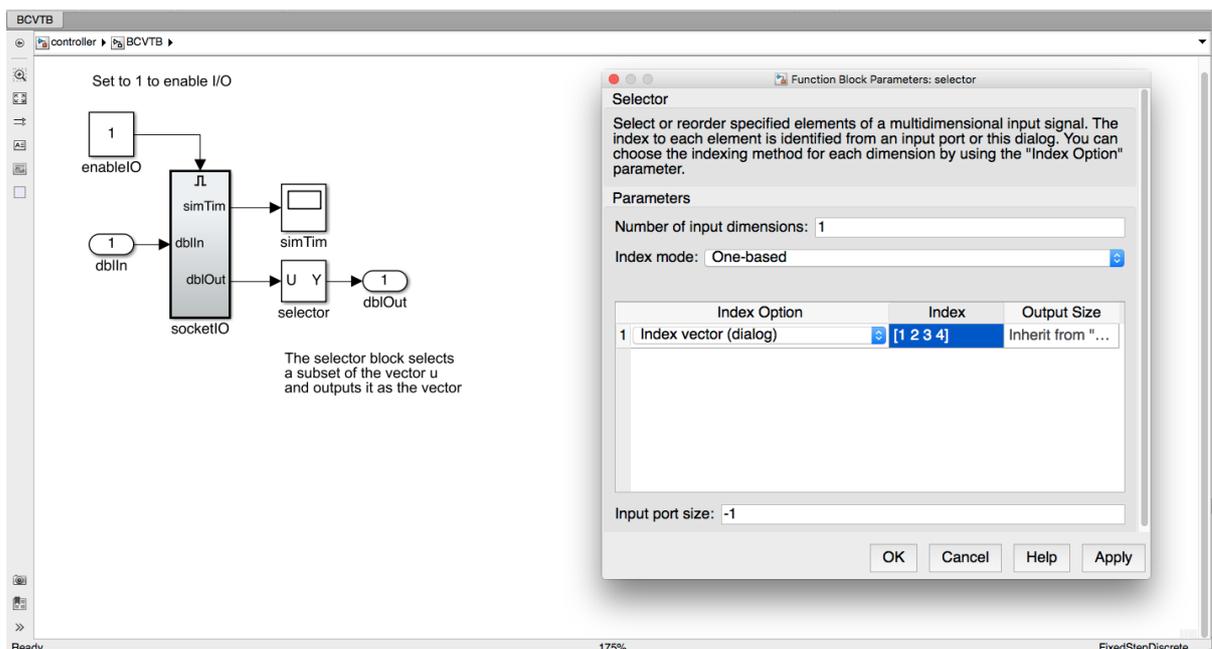


Figura 4-11 – Configuração do bloco BCVTB no Simulink.

O bloco *Selector* é responsável pela definição de quais elementos do vetor de entrada serão utilizados pelos controladores. Este vetor de entrada é composto pelos quatro primeiros elementos do vetor que é enviado do EnergyPlus para o PtolomyII. São lidas pelo bloco dos controladores as informações respectivas a temperatura de cada uma das zonas e a temperatura de referência que de fato será utilizada para o controle dos ares-condicionados. A saída do bloco dos controladores foi conectada a entrada “dblIn” do bloco do BCVTB e possui um vetor com sete elementos.

4.3.3. Utilização do BCVTB

O ambiente do BCVTB oferece recursos que facilitam a conexão final entre o EnergyPlus e o Simulink.

A Figura 4-12 mostra como a conexão entre os dois programas foi feita. As cinco variáveis obtidas do EnergyPlus são encaminhada para o Simulink que envia um vetor com sete elementos, dos quais apenas os seis são recebidos pelas variáveis do EnergyPlus. Após configurar o período de simulação, o *timestep* adequado e verificar que todas as conexões estão ligadas corretamente basta utilizar a seta verde na barra de menu para iniciar o processo de co-simulação. O processo pode ser acompanhado utilizando os blocos Plotter para plotar os gráficos em tempo real da temperatura interna de cada zona, a temperatura externa e a temperatura de *referência*. O Plotter2 irá disponibilizar a temperatura interna da zona 1, a temperatura externa, a temperatura de *referência* e o valor da saída do controlador da zona 1 e, finalmente, a Plotter3 trará o gráfico com os valores do erro quadrático para cada uma das zonas. Esse são elementos de grande utilidade que facilitam a análise inicial da simulação e permitem encontrar possíveis problemas.

Além de avaliar a viabilidade do uso integrado das ferramentas de simulação é preciso avaliar se o uso integrado do EnergyPlus e do Simulink consome muitos recursos da máquina em que a simulação é rodada. Para isso, serão comparados os tempos de execução da simulação para os períodos de um ano, um mês e uma semana, apenas utilizando o EnergyPlus. Em seguida, o mesmo teste será feito utilizando o ambiente criado pelo BCVTB. O dado será coletado diretamente do EnergyPlus, que indica qual o tempo decorrido entre o início e o final do processo de simulação. As simulações aconteceram em uma máquina com sistema Windows 10, configurado com um

processador Intel core i7-4510U com frequência de 2 GHz expansível até 2,6 GHz e 8 Gb de memória RAM.

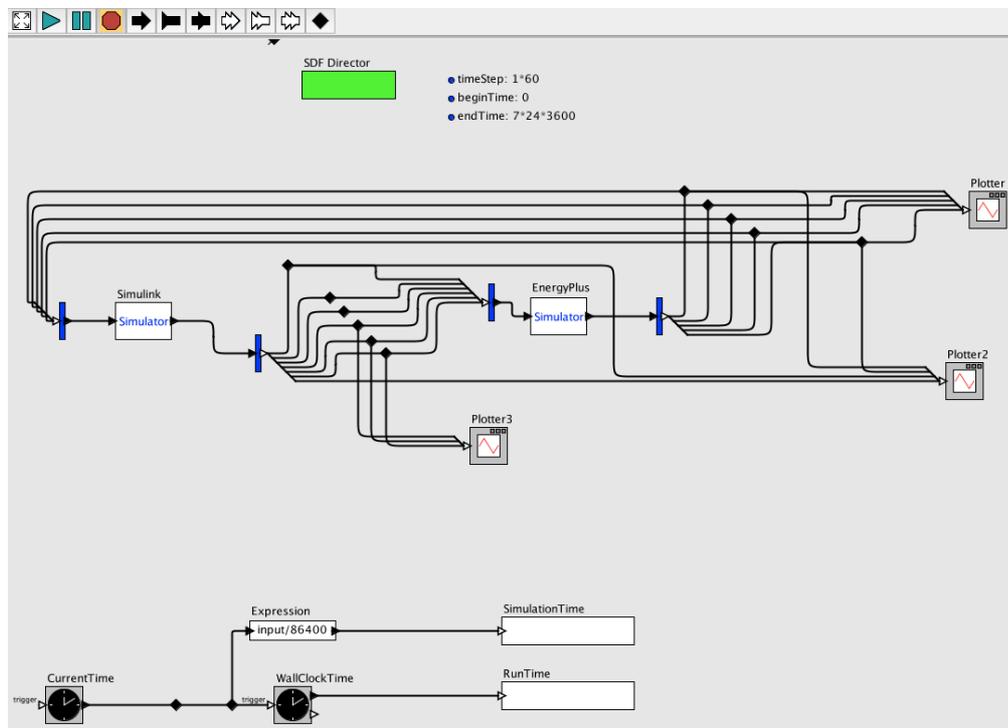


Figura 4-12 – Ligação entre EnergyPlus e Simulink no ambiente do BCVTB.

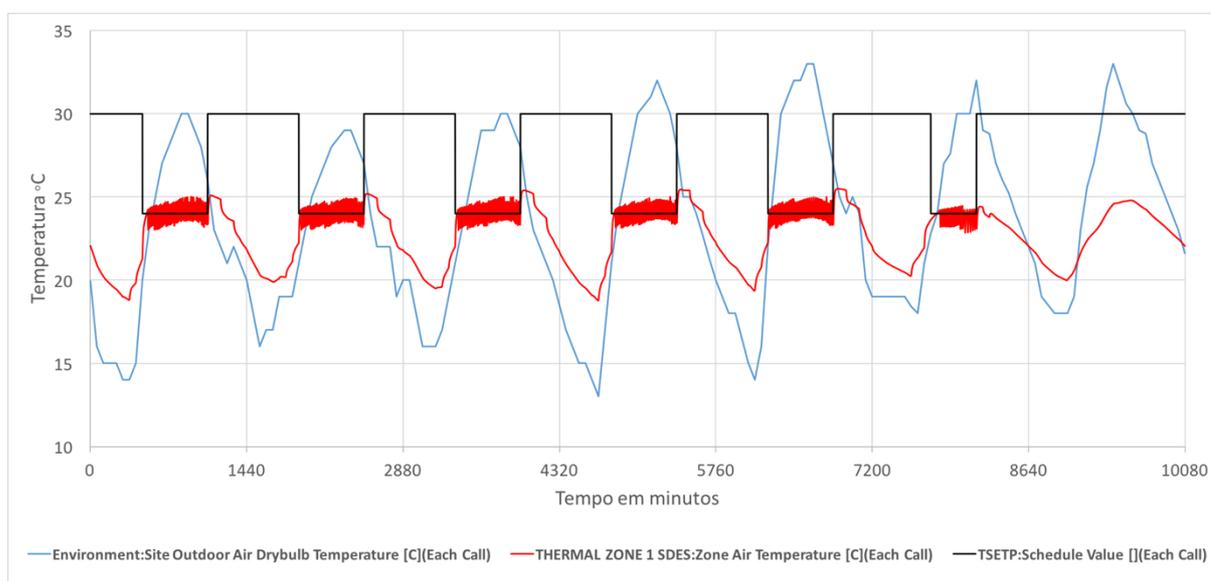
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos após a realização da simulação, para cada um dos casos, conforme descrito no capítulo anterior. Em seguida será feita a análise comparando os resultados entre si e entre os resultados teóricos esperados. Finalmente, será feita a avaliação da performance do uso integrado do Energy Plus e Simulink.

5.1. AMBIENTE UTILIZANDO CONTROLADOR LIGA-DESLIGA

Os gráficos apresentados a seguir foram obtidos a partir dos resultados relacionados a zona térmica definida para Sala de Desenvolvimento. Para a análise do comportamento do sistema foi adotada a representação gráfica de apenas uma das zonas, uma vez que os resultados, em função da utilização de controladores iguais, geraram o mesmo comportamento nos demais ambientes. Os registros gráficos que representam o comportamento das outras duas zonas térmicas estudadas estão incluídos no APÊNDICE B. O mesmo procedimento também foi adotado no caso dos outros dois modelos, com controlador P e PI.

Gráfico 5-1 – Liga-Desliga – Temperatura interna da zona uma no decorrer de uma semana.



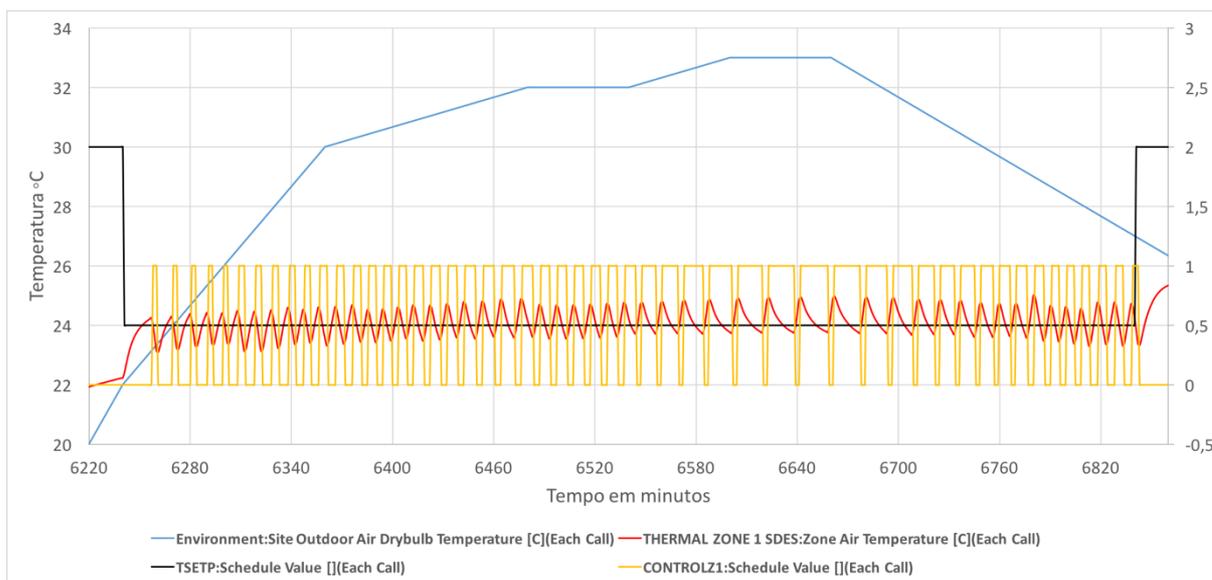
A análise do Os gráficos apresentados a seguir foram obtidos a partir dos resultados relacionados a zona térmica definida para Sala de Desenvolvimento. Para a análise do comportamento do sistema foi adotada a representação gráfica de apenas uma das zonas, uma vez que os resultados, em função da utilização de controladores

iguais, geraram o mesmo comportamento nos demais ambientes. Os registros gráficos que representam o comportamento das outras duas zonas térmicas estudadas estão incluídos no APÊNDICE B. O mesmo procedimento também foi adotado no caso dos outros dois modelos, com controlador P e PI.

Gráfico 5-1 permite a visualização do comportamento geral da temperatura interna, representada pela curva em vermelho. É possível observar variações na temperatura média no decorrer do dia, conforme a temperatura do ambiente externo, representado pela curva azul. Essa atinge valores superiores a dos 30°C em alguns dias. É notório, que no período da tarde a temperatura interna assume valores mais elevados, superando o valor de *referência*, representado no gráfico pela curva preta.

O Gráfico 5-2 permite inferências, com mais detalhes, sobre o comportamento da temperatura interna gerada pelo ar-condicionado em funcionamento na Sala de Desenvolvimento. Adotou-se o quinto dia por permitir melhor visualização do comportamento térmico. A curva em amarelo representa o momento em que o ar-condicionado é ligado e desligado, sendo atribuídos os valores 1 e 0, respectivamente. O gráfico mais detalhado permite visualizar, conforme o esperado, que durante o período mais quente do dia o equipamento de ar-condicionado precisa ficar ligado durante um período maior para manter a temperatura dentro da faixa determinada. Além disso, fica comprovado o funcionamento, conforme o esperado do controlador, que liga o aparelho quando um valor máximo de temperatura é atingido e o desliga quando é atingida o limite inferior de temperatura. Essa característica fica mais evidente quando as curvas amarela e vermelha, temperatura interna, são analisadas em conjunto.

Gráfico 5-2 – Liga-Desliga – Temperatura interna detalhada da Zona 1 para quinto dia de simulação.



Os resultados também indicam os dados relativos ao consumo de energia elétrica de cada zona térmica, durante todo o período da simulação. Conforme esperado o consumo elétrico foi maior nas salas em que o aparelho foi dimensionado com uma potência maior. Também foi obtido o erro quadrático total para cada uma das salas conforme mostrado na Tabela 5-1.

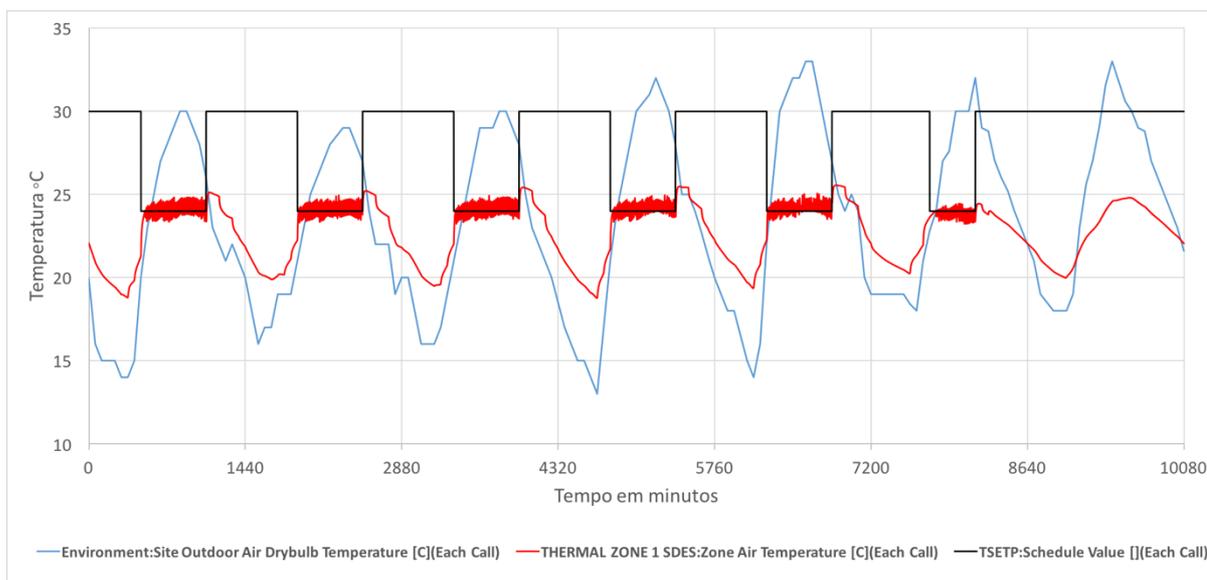
Tabela 5-1 – Liga-Desliga – Consumo elétrico e erro quadrático por ambiente.

Ambiente	Consumo(MJ)	Consumo(kWh)	Erro quadrático
Sala de Desenvolvimento	49,04	13,62	66060,69
Sala da Diretoria	45,49	12,64	103943,63
Sala de Reuniões	58,07	16,13	105408,95
Total	152,60	42,39	-

5.2. AMBIENTE UTILIZANDO CONTROLADOR PROPORCIONAL COM PWM

Conforme o descrito no item anterior o comportamento térmico da Sala de Desenvolvimento segue o mesmo padrão, tanto para o modelo utilizando um controlador Liga-Desliga quanto para o modelo com um controlador P seguido de um PWM. A temperatura interna continua sofrendo grande influência das condições externas conforme e ilustrado no Gráfico 5-3.

Gráfico 5-3 – Proporcional – Temperatura interna da zona uma no decorrer de uma semana.



De forma equivalente ao que foi apresentado no Gráfico 5-2, o Gráfico 5-4 traz de forma detalhada a o comportamento do ar-condicionado para um período de um dia. A curva em amarelo traz os instantes em que o ar-condicionado está em funcionamento consequentemente, é possível visualizar, com o auxílio da curva temperatura interna, representada pela linha vermelha comportamento do controlador. Diferentemente do controlador Liga-Desliga o controlador proporcional, com PWM, atua independente de valores limites para ligar e desligar o equipamento. Esse comportamento pode ser observado quando, durante o período mais que do dia, em que alguns momentos o ar-condicionado desligou, mesmo estando a temperatura a cima do valor de *referência*. Isso acontece graças ao PWM que utiliza o valor da diferença entre a temperatura interna e a temperatura de *referência* para determinar durante quanto tempo o equipamento ficará ligado durante cada um dos ciclos. Caso essa diferença seja pequena, no instante em que se inicia um novo período do PWM o ar-condicionado ficará ligada durante um curto período de tempo que pode não ser, devido as condições externas, suficiente para reduzir a temperatura interna abaixo da temperatura de referência.

O consumo elétrico de cada ambiente segue o comportamento já descrito anteriormente e é apresentado juntamente com o erro quadrático total na Tabela 5-2.

Gráfico 5-4 – Proporcional – Temperatura interna detalhada da Zona 1 para quinto dia de simulação.

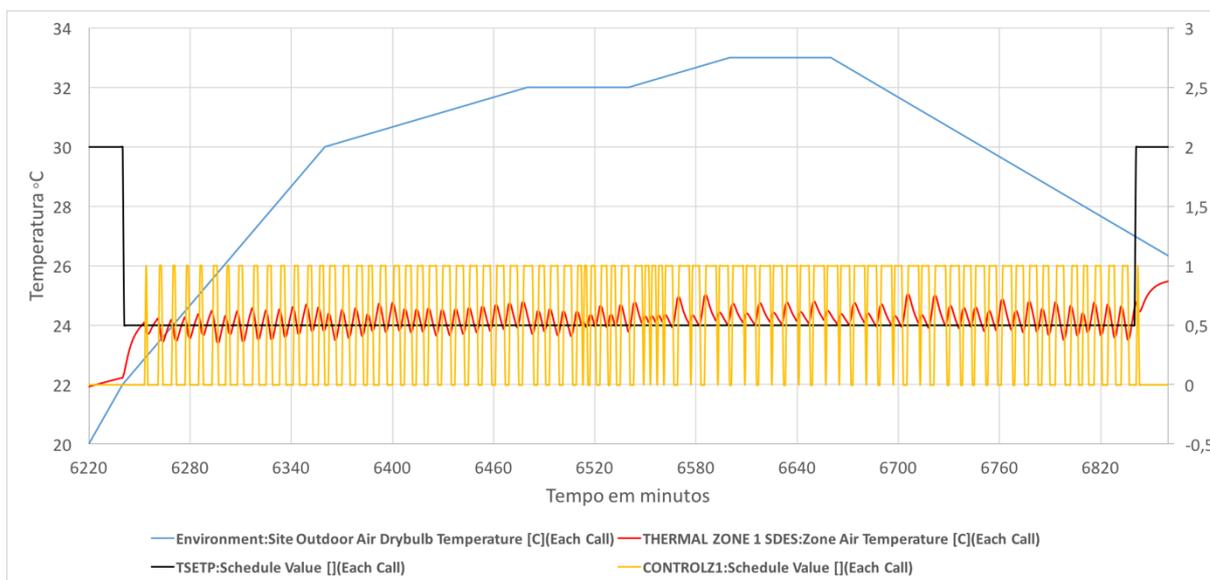


Tabela 5-2 – Proporcional – Consumo elétrico e erro quadrático por ambiente.

	Consumo(MJ)	Consumo(kWh)	Erro quadrático
Sala de Desenvolvimento	47,61	13,22	53578,81
Sala da Diretoria	44,12	12,25	80827,76
Sala de Reuniões	55,90	15,53	86643,04
Total	147,63	41,01	-

5.3. AMBIENTE UTILIZANDO CONTROLADOR PI

O comportamento do sistema quando utilizado um controlador PI se assemelha de modo geral ao comportamento já apresentado nos itens 0 e 5.2. Em todos os casos existe uma variação na média da temperatura interna durante o dia o que pode ser confirmado pelas curvas do Gráfico 5-5. Espera-se que o controlador PI seja capaz de manter a temperatura do ambiente mais próximo do ponto de operação que os demais controladores implementados. Devido as constantes alterações nas condições do sistema, sejam elas devido a variação natural da temperatura externa ou variação nas cargas térmicas internas, fica, muitas vezes, difícil visualizar o comportamento esperado. Apesar disso, por meio do Gráfico 5-6 é possível perceber que, para o momento mais quente do dia em que a temperatura externa é constante, a curva da temperatura interna oscila muito pouco, em torno da *referência*, apresentando assim o comportamento que é esperado nesse tipo de controlador.

Gráfico 5-5 – PI – Temperatura interna da zona uma no decorrer de uma semana.

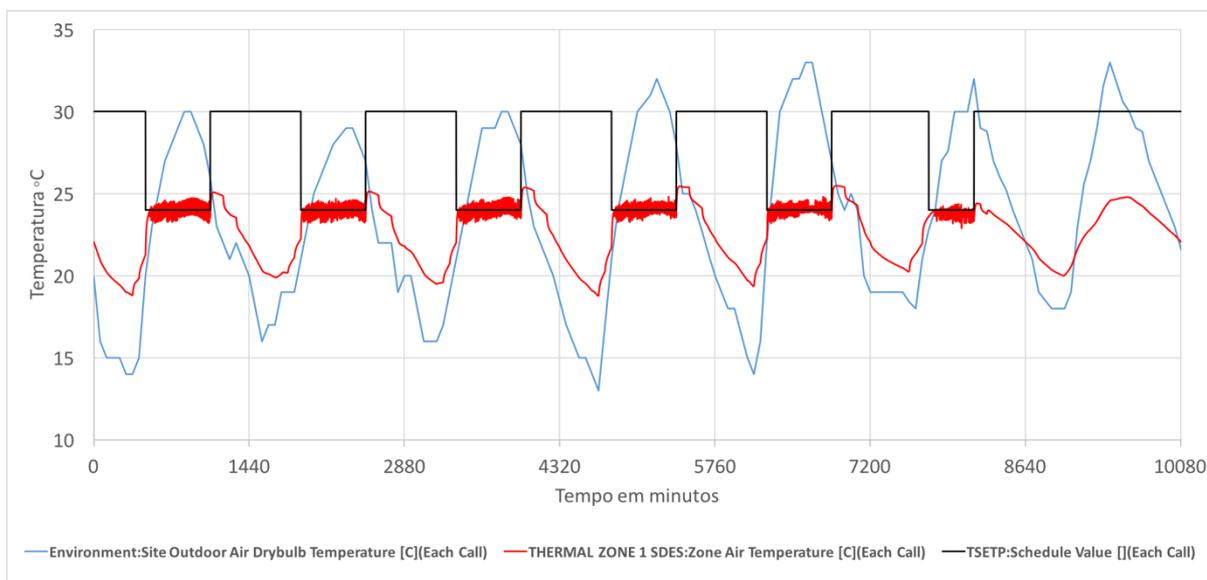
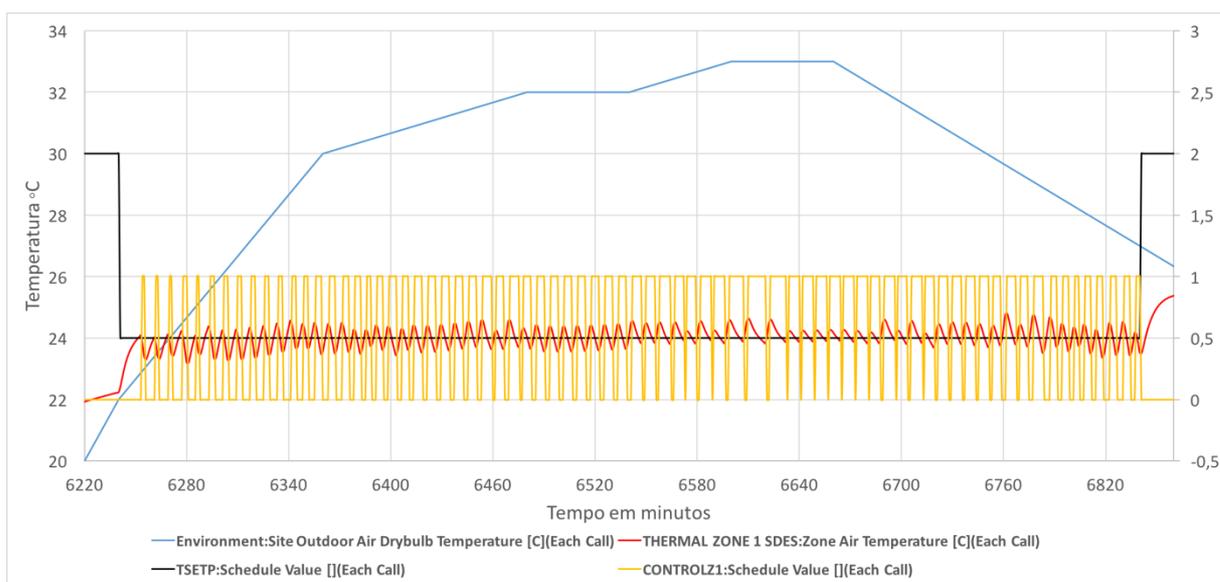


Gráfico 5-6 – PI – Temperatura interna detalhada da Zona 1 para quinto dia de simulação.



Conforme procedimentos descritos anteriormente foram obtidos os dados de consumo de energia elétrica dos equipamentos de ar condicionado para cada um dos ambientes, bem como os respectivos erros quadráticos apresentados no Gráfico 5-3. Esses dados são fundamentais para a avaliação e comparação que se será feita na próxima seção a respeito da performance dos controladores. Para tanto, é preciso utilizar as informações obtidas para todas as zonas térmicas.

Tabela 5-3 – PI – Consumo elétrico e erro quadrático por ambiente.

	Consumo(MJ)	Consumo(kWh)	Erro quadrático
Sala de Desenvolvimento	49,76	13,82	51013,36
Sala da Diretoria	45,46	12,63	84501,92

Sala de Reuniões	58,24	16,18	87206,28
Total	153,46	42,63	-

5.4. DISCUSSÃO

Durante a realização deste trabalho foram observados alguns aspectos relevantes que devem ser comentados. O primeiro deles é a existência de um atraso constante de dois *timesteps* entre o processo implementado no EnergyPlus e o processo do Simulink. Foi observado que sempre que a temperatura interna atingia um valor em que o controlador deveria atuar, para mudar o *status* do ar-condicionado, esse comando demorava sempre dois minutos para ser implementado. Essa condição acontece devido a própria natureza da co-simulação em que primeiro é realizado um ciclo de cálculos no EnergyPlus. Depois os dados são enviados, já com atraso, para o Simulink que, ao terminar o seu processo, precisa incorporar um atraso de mais um *timestep* ao processo. Essa característica pode incorporar erros significativos a simulação, dependendo do modelo que será utilizado, principalmente quando se necessita de uma precisão no tempo muito grande. Apesar disso, neste projeto essa questão não tem grande relevância, já que é desejado avaliar o comportamento do sistema durante um dia inteiro.

Outro ponto de destaque é a limitação da simulação conjunta que só poder acontecer em tempo discreto, com *timestep* maior ou igual a um minuto. Isso pode limitar o uso de sistemas de controle, que são simulados apenas em tempo contínuo, bem como aplicações que utilizem frações de minuto para realizar seus processos. Uma das consequências observadas, devido ao atraso e a limitação de realizar o controle em tempo discreto, com um *timestep* limitado, é que quando o sistema apresenta oscilações a taxas muito grandes ocorrem erros maiores e geram instabilidade. Nesta situação o controlador demora a agir e os limites impostos são geralmente ultrapassados, o que pode gerar perda de eficiência. Um exemplo disso foi observado quando analisados o modelo utilizando o controlador Liga-Desliga. O controlador foi configurado para ter uma sensibilidade de 0,2 graus *Celsius*, no entanto, por diversas vezes, foram observadas temperaturas um grau fora do ponto de operação.

A conexão do MATLAB/Simulink utilizando o BCTVB se mostra satisfatória, no entanto, nem todas as suas funcionalidades estão disponíveis, como por exemplo a possibilidade de execução interativa e a facilidade de encontrar erros no código ou

modelo do Simulink. isso se dá pelo fato de que o BCVTB aciona o MATLAB como um cliente (NGHIEM, 2010).

A avaliação dos três controladores foi feita comparando os dados da Tabela 5-1, Tabela 5-2 e Tabela 5-3. Primeiramente foram avaliados os consumos para cada um dos casos. Foi encontrado que o sistema com o controlador PI apresentou um consumo total maior em relação aos demais sistemas, consumindo cerca de 0,56% mais do que o sistema com controlador Liga-Desliga e 3,95% maior que o sistema com controlador proporcional. A comparação de cada ambiente, individualmente também trouxe resultados semelhantes e seguiu o mesmo padrão com diferenças inferiores a 5%.

A comparação entre os valores encontrados para o consumo de energia não é, sozinha, suficiente para concluir se um controlador é mais eficiente do que outro, visto que ainda não foi analisado qual dos controladores manteve a temperatura interna mais próxima do ponto de operação. Uma forma de quantificar esse aspecto é analisar o erro quadrático que vai indicar numericamente o quão próximo a temperatura do ambiente ficou da *referência*. Sendo assim, o controlador mais eficiente será aquele que apresenta a melhor relação entre consumo e erro quadrático.

Tabela 5-4 – Comparação entre o erro quadrático dos controladores P e PI

	Erro quadrático P	Erro quadrático PI	Razão P/PI (%)
Sala de Desenvolvimento	53578,81368	51013,36008	1,0503
Sala da Diretoria	80827,75895	84501,92172	0,9565
Sala de Reuniões	86643,03578	87206,27521	0,9935

Comparando o erro quadrático individual para cada ambiente, foram encontradas diferenças próximas a 30%, em certos casos, sendo que, como o esperado, em todos os ambientes o controlador que obteve o maior erro foi o Liga-Desliga. A comparação mais relevante se dá entre o controlador P e PI, conforme é mostrado na Tabela 5-4.

Observa-se na Tabela 5-4 que em apenas um caso o controlador PI apresentou um erro menor que o P. Esse resultado, aliado consumo de energia para cada sistema, leva a conclusão de que o desempenho do controlador PI não foi o esperado, uma vez que esse controlador deveria ser mais eficiente do que o controlador P.

O baixo desempenho do controlador PI, pode estar relacionada ao fato que ele não foi projetado para atender às necessidades individuais de cada uma das salas. A ação do canal integral não teria respondido rápido o suficiente nem conseguiu diminuir o erro do processo. Uma das opções para comprovar o desempenho do controlador seria fazer o projeto de um novo controlador, no entanto, isso não faz parte do escopo do trabalho.

Avaliando o desempenho do controlador PI é possível notar que seu desempenho melhora, consideravelmente, quando ele é utilizado em um ambiente que tem uma relação mais baixa entre potência e área. Este é o caso da Sala de Desenvolvimento, que possui a menor relação W/m^2 , dentre todas as salas e foi o único caso em que se obteve um bom desempenho. Sendo assim, a outra opção disponível é redimensionar os aparelhos de ar-condicionado para que tenham uma potência menor e, conseqüentemente, a variação da temperatura interna será mais lenta e permitirá que o canal integral atue de forma satisfatória.

Para testar essa hipótese e verificar se o controlador PI implementado de fato funcionaria como esperado, foi alterado o fator dimensionamento dos sistemas de refrigeração para 0,3. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

Tabela 5-5 – Dimensionamento dos equipamentos de ar-condicionado para novo fator de dimensionamento.

	Carga projetada(W)	Carga projetada pelo usuário (W)	Carga projetada pelo usuário por área(W/m^2)	Fluxo de Ar projetado (m^3/s)	Fluxo de ar projetado pelo usuário (m^3/s)
Thermal Zone 1 SDes	1159.33	347.80	13.93	0.179	0.056
Thermal Zone 2 SDir	1115.46	334.64	19.01	0.172	0.055
Thermal Zone 3 SR	1381.13	414.34	28.87	0.213	0.073

A Observa-se na Tabela 5-4 que em apenas um caso o controlador PI apresentou um erro menor que o P. Esse resultado, aliado consumo de energia para cada sistema, leva a conclusão de que o desempenho do controlador PI não foi o esperado, uma vez que esse controlador deveria ser mais eficiente do que o controlador P.

O baixo desempenho do controlador PI, pode estar relacionada ao fato que ele não foi projetado para atender às necessidades individuais de cada uma das salas. A ação do canal integral não teria respondido rápido o suficiente nem conseguiu diminuir o

erro do processo. Uma das opções para comprovar o desempenho do controlador seria fazer o projeto de um novo controlador, no entanto, isso não faz parte do escopo do trabalho.

Avaliando o desempenho do controlador PI é possível notar que seu desempenho melhora, consideravelmente, quando ele é utilizado em um ambiente que tem uma relação mais baixa entre potência e área. Este é o caso da Sala de Desenvolvimento, que possui a menor relação W/m^2 , dentre todas as salas e foi o único caso em que se obteve um bom desempenho. Sendo assim, a outra opção disponível é redimensionar os aparelhos de ar-condicionado para que tenham uma potência menor e, conseqüentemente, a variação da temperatura interna será mais lenta e permitirá que o canal integral atue de forma satisfatória.

Para testar essa hipótese e verificar se o controlador PI implementado de fato funcionaria como esperado, foi alterado o fator dimensionamento dos sistemas de refrigeração para 0,3. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

Tabela 5-5 traz as novas informações relacionadas ao dimensionamento dos sistemas de refrigeração. Foram utilizados equipamentos com uma relação significativamente menor da potência sobre área, o que causou impactos significativos no sistema de controle.

Para a nova situação o controlador PI finalmente apresentou um erro quadrático menor do que o controlador P. Os dados contidos na Tabela 5-6 traz a informação de que a diferença chega a 14%, para o caso da Sala de Desenvolvimento, confirmando a capacidade do controlador PI em manter a temperatura mais próxima do ponto de operação. Conforme esperado a razão entre o controlado P e o PI diminuiu, quando a razão potência sobre área é aumentada, chegando a ser praticamente irrelevante, como no caso da Sala de Reuniões que apresenta uma diferença de apenas 1%.

Tabela 5-6 – Comparação entre o erro quadrático dos controladores P e PI para novo dimensionamento do sistema de refrigeração.

	Erro quadrático P	Erro quadrático PI	Razão P/PI (%)
Sala de Desenvolvimento	43917,55	43917,55	1,14
Sala da Diretoria	61040,03	61040,03	1,11
Sala de Reuniões	87913,77	87913,77	1,01

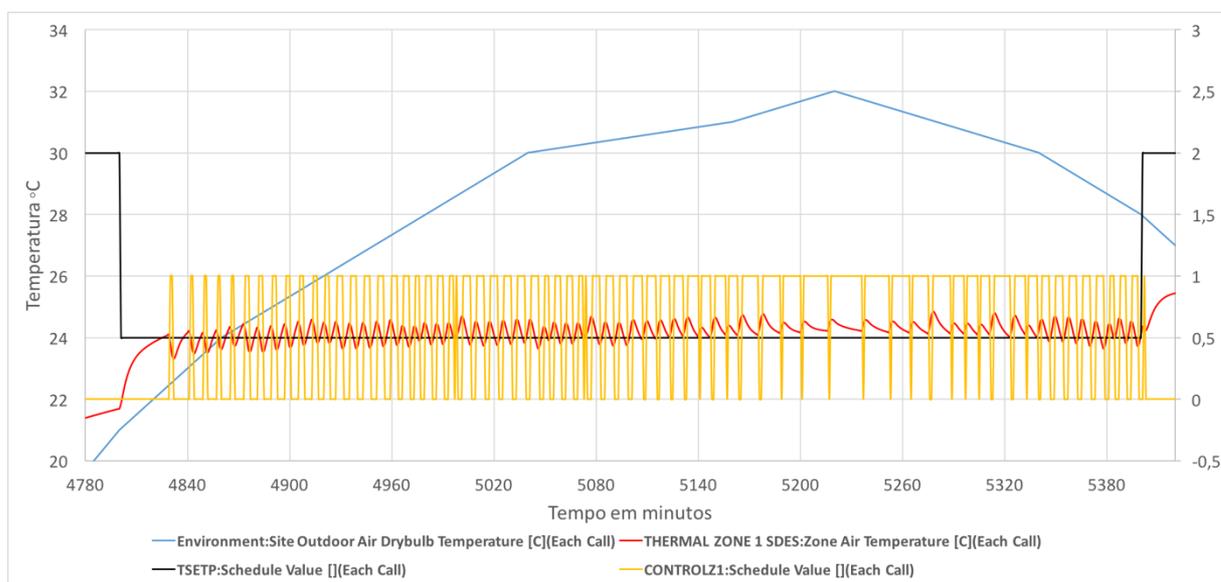
Já o consumo elétrico foi um pouco maior para o sistema com o controlador PI. No geral o consumo foi, aproximadamente, 5% maior do que no sistema com controlador P, conforme verificado na Tabela 5-7. Apesar desse resultado sugerir um desempenho pior do controlado PI é preciso analisar os dados de erro e consumo de forma conjunta. Sendo assim, apesar de um consumo maior, o controlador PI apresenta um erro significativamente menor e o ganho de desempenho, no final da análise é maior quando se utiliza o controlador PI.

Tabela 5-7 – Comparação entre o consumo elétrico dos controladores P e PI para novo dimensionamento do sistema de refrigeração.

	Consumo controlador P (kWh)	Consumo controlador PI (kWh)	Razão P/PI (%)
Sala de Desenvolvimento	8,88	9,38	0,95
Sala da Diretoria	8,39	8,73	0,96
Sala de Reuniões	11,44	11,99	0,95
Total	28,71	30,10	0,95

Na sequência foi feita a análise qualitativa do desempenho dos sistemas. Serão comparadas as informações dos gráficos referentes ao quarto dia de simulação, tanto para o controlador P com PWM quanto para o PI.

Gráfico 5-7 – Proporcional para novo fator de dimensionamento do sistema de refrigeração – Temperatura interna detalhada da Zona 1 para quarto dia de simulação.



O Gráfico 5-7 ilustra o comportamento do sistema com o controlador P. Quando comparado com o comportamento do sistema com controlador PI é possível notar a diferença clara que existe entre a temperatura interna média dos dois sistemas. Conforme o esperado o controlador PI conseguiu reduzir a diferença entre a

temperatura interna e a temperatura de referência chegando a quase zerar o erro em alguns instantes especialmente no período da tarde. Fica então mais uma vez evidente que os resultados obtidos representam o comportamento esperado.

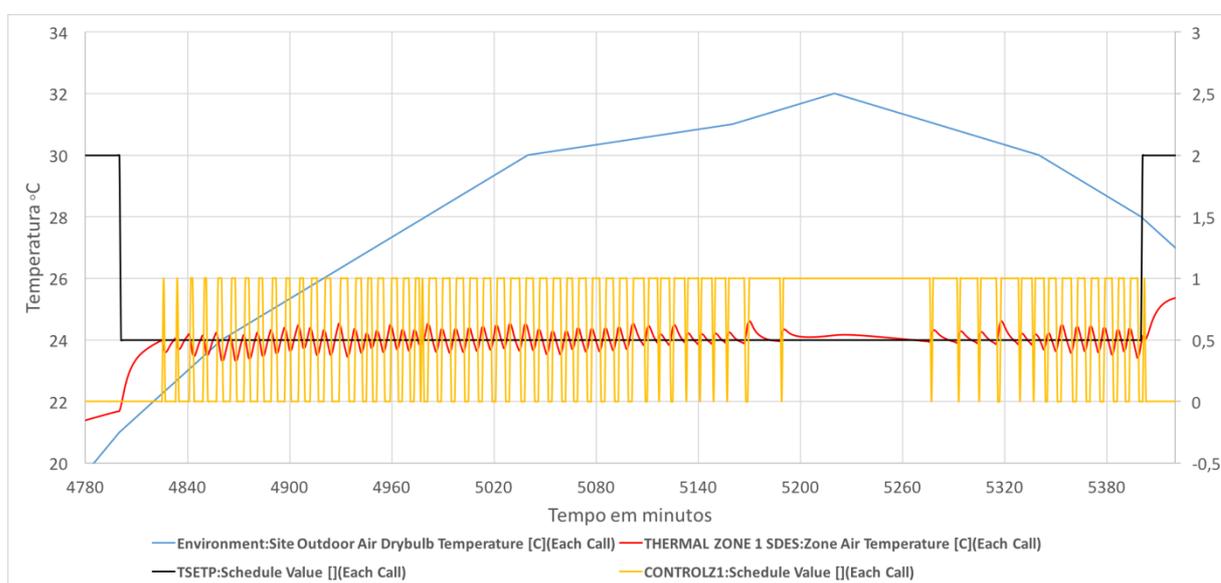
É esperado maior tempo de processamento ao se utilizar dois programas para realizar processos diferentes, mas que dependem um do outro. Sendo assim, foi avaliado qual o impacto da utilização do EnergyPlus em conjunto com o Simulink no tempo em que a simulação é realizada. A Quanto maior o período da simulação, maior foi a diferença entre o tempo gasto para realizar a simulação apenas no EnergyPlus e o ambiente de co-simulação. O BCVTB mostrou desempenho limitado quando foi realizada a simulação para um ano inteiro, não sendo possível concluí-la. Por outro lado, seu desempenho é satisfatório quando utilizado para períodos menores, realizando a simulação em questão de segundos ou até de poucos minutos.

apresenta os tempos necessários para realizar a simulação do mesmo modelo em ambientes diferentes.

Tabela 5-8 – Tempo de execução da simulação para diferentes períodos de simulação

	1 ano (s)	1 mês (s)	1 semana (s)
EnergyPlus	177,47	41,44	37,52
Co-simulação	-	109,90	47,93

Gráfico 5-8 – PI para novo fator de dimensionamento do sistema de refrigeração – Temperatura interna detalhada da Zona 1 para quarto dia de simulação.



Quanto maior o período da simulação, maior foi a diferença entre o tempo gasto para realizar a simulação apenas no EnergyPlus e o ambiente de co-simulação. O BCVTB mostrou desempenho limitado quando foi realizada a simulação para um ano inteiro, não sendo possível concluí-la. Por outro lado, seu desempenho é satisfatório quando utilizado para períodos menores, realizando a simulação em questão de segundos ou até de poucos minutos.

6. CONCLUSÃO

Modelar e simular o comportamento de sistemas dinâmicos pode ser uma tarefa simples, dependendo da abordagem e das ferramentas utilizadas. O EnergyPlus é um dos programas que realiza a simulação de edifícios com grande precisão e grau de liberdade para o projetista modelar o sistema. No entanto o projeto e implementação de sistemas de controle é complexa e muitas vezes limitada. Contrário a essa assertiva o MATLAB/Simulink possibilita ao engenheiro de controle liberdade para projetar seu sistema de controle. No entanto a simulação energética de edifícios se torna uma tarefa complexa e muitas vezes o projetista precisa fazer simplificações para modelar o seu sistema.

Integrar essas duas ferramentas computacionais, amplamente utilizadas por profissionais da área de eficiência energética e automação predial, se mostrou uma estratégia viável e eficiente para avaliar e aperfeiçoar o modelo do sistema estudado. Essa união permitiu utilizar a capacidade do EnergyPlus de modelar e simular edificações com facilidade e precisão, com a capacidade do MATLAB/Simulink de modelar e implementar sistemas de controle.

O ambiente de co-simulação criado pelo BCVTB permitiu a análise e o levantamento de hipóteses para melhorar o desempenho do sistema. Após realizar as simulações foi observado que a utilização de controladores do tipo PI ou P com PWM pode influenciar no projeto de sistemas de ar-condicionado. Quando os equipamentos foram redimensionados o uso desses controladores proporcionou uma redução de cerca 30% do no consumo de energia e erro quadrático ainda menor, quando comparado ao sistema com equipamentos com maior potência.

Naturalmente o uso integrado das duas ferramentas apresenta limitações mas, de modo geral, elas podem ser contornadas utilizando diferentes estratégia para modelar o sistema. Apesar de não ter sido possível realizar a simulação para o período de um ano completo isso não invalida o uso do da ferramenta de co-simulação para a análise energética predial, visto que simulações, para um mês, rodam com facilidade e computadores de uso comum.

O estudo realizado neste trabalho foi feito utilizando um modelo de ambiente predial simples em conjunto com uma estratégia de controle básica, muitos dos recursos disponíveis para modelagem e projeto não foram utilizados. Para próximos trabalhos

poderia ser proposto o estudo de ambientes mais complexos, utilizando outros recursos oferecidos pelos programas e a implementação de sistemas de controle responsáveis não apenas pelo sistema de ar-condicionado, mas também de controlar e gerenciar recursos hídricos, iluminação, o uso de fontes renováveis de energia, entre outros. O BCVTB oferece a conexão com outros programas de simulação que ainda não foram estudados e podem agregar o valor a simulação predial. É fundamental que o ambiente de co-simulação seja testado durante o projeto de edifícios eficientes, principalmente aqueles que buscam o consumo quase zero de energia como é o caso dos NZEB (Nearly Zero-Energy Buildings).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATTIA, S. G. M.; HERDE, A. D. Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings A comparison of ten tools. **International Building Performance Simulation Association**, v. 1, Novembro 2011.

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: Energy Simulation Program. **Ashrae Journal Online**, p. 56-59, Abril 2000.

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: A new-generation building energy simulation program. **Energy & Buildings**, 2001.

DEPARTMENT OF ENERGY, U. S. EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Engineering Reference. **University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 31 Março 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY, U.S. EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Getting Started. **University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 16 Março 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY, U.S. EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Getting Started. **University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY, U.S. EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Getting Started. **University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 16 Março 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY, U.S. EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Input Output Reference. **University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 16 Março 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY, U.S. EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Input Output Reference. **University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY, U.S. EnergyPlus Version 8.5 Documentation - Input Output Reference. **University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 16 Março 2016.

ELLIS, P. G.; TORCELLINI, P. A.; CRAWLEY, D. B. Energy Design Plugin: An EnergyPlus Plugin for SketchUp. **IBPSA-USA SimBuild 2008 Conference**, Berkeley, California, 2008. 238-245.

FELGNER, F.; MERZ, R.; LITZ, L. Modular modelling of thermal building behaviour using Modelica. **Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems**, 2006.

FROST, J. BSD Sockets: A Quick And Dirty Primer, 8 Junho 1991.

GUGLIELMETTI, R.; MACUMBER, D.; LONG, N. OpenStudio: An Open Source Integrated Analysis Platform. **Building Simulation 2011 Conference**, Sydney, Australia, 2011.

HANDBOOK, ASHRAE. HVAC Systems and Equipment - SI Edition, 2008.

HITTLE, D. C.; BISHOP., R. An Improved Root-Finding Procedure for Use in Calculating Transient Heat Flow Through Multilayered Slabs. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 26, n. 11, p. 1685-1693, 1983.

MOLER, C. The Origins of MATLAB, 2004. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-of-MATLAB.html>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

NGHIEM, T. X. MLE+: a MATLAB-EnergyPlus co-simulation interface., 2010.

OGATA, K.; LEONARDI, F. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Prentice Hall, 2013.

OUYANG, K.; HAGHIGHAT., F. A Procedure for Calculating Thermal Response Factors of Multi-layered Walls—State Space Method. **Building and Environment**, v. 26, n. 2, p. 172-177, 1991.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and buildings**, v. 40, n. 3, 2008.

ROTH, A.; GOLDWASSER, D.; PARKER, A. There's a measure for that! **Energy and Buildings**, v. 117, p. 321-331, 2016.

STANDARD, ASHRAE. Standard 189.1-2009. **Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential**, 2009.

STANDARD, ASHRAE. Standard 90.1-2013. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**, 2013.

STEVENS, W. R.; FENNER, B.; RUDOFF, A. M. UNIX Network Programming: The Sockets Networking API, v. 1, n. 3, 2004.

THE MATHWORKS, INC. MATLAB - Primer. [S.l.]: [s.n.], 2016.

THE MATHWORKS, INC. Simulink - Getting Started Guide. [S.l.]: [s.n.], 2016.

WEAVER, E. et al. Rapid Application Development with OpenStudio. **ACEEE Summer Study Conference**, Pacific Grove, California, 2012.

WETTER, M. Co-simulation of Building Energy and Control Systems with the Building Controls Virtual Test Bed. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 4, n. 3, p. 185-203, 2011.

WETTER, M.; HAVES, P. A modular building controls a virtual test bed for the integration of heterogeneous systems. **Third national conference of IBPSA USA**, 2008.

WETTER, M.; NOUIDUI, T. S. Building Controls Virtual Test Bed User Manual Version 1.6.0. **Lawrence Berkeley National Laboratory**, Berkeley, California, 20 April 2016.

ZHOU, X.; HONG, T.; YAN, D. Comparison of Building Energy Modeling Programs: HVAC Systems. **Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2013.

APÊNDICE A – CÓDIGOS ENERGYPLUS

A.1 CÓDIGO QUE DEFINE AS VARIÁVEIS DE SAÍDA E A FREQUÊNCIA EM QUE SERÃO REPORTADAS

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLE =====

Output:Variable,
  *,                               !- Key Value
  Zone Air Temperature,           !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  TSetP,                           !- Key Value
  Schedule Value,                 !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  *,                               !- Key Value
  Site Outdoor Air Drybulb Temperature, !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  *,                               !- Key Value
  Zone Thermostat Air Temperature, !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  *,                               !- Key Value
  Zone Packaged Terminal Air Conditioner Electric Energy, !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  ControlZ1,                       !- Key Value
  Schedule Value,                 !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  ControlZ2,                       !- Key Value
  Schedule Value,                 !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  ControlZ3,                       !- Key Value
  Schedule Value,                 !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  ErroQ1,                          !- Key Value
  Schedule Value,                 !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  ErroQ2,                          !- Key Value
  Schedule Value,                 !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

Output:Variable,
  ErroQ3,                          !- Key Value
  Schedule Value,                 !- Variable Name
  Detailed;                        !- Reporting Frequency

```

A.2 CÓDIGO QUE APRESENTA OPÇÕES DE ARGUMENTO PARA RODAR O ENERGYPLUS.

OPTIONS

- a, --annual**
Force annual simulation
- d, --output-directory ARG**
Output directory path (default: current directory)
- D, --design-day**
Force design-day-only simulation
- h, --help**
Display help information
- i, --idd ARG**
Input data dictionary path (default: Energy+.idd in executable directory)
- m, --epmacro**
Run EPMacro prior to simulation
- p, --output-prefix ARG**
Prefix for output file names (default: eplus)
- r, --readvars**
Run ReadVarsES0 after simulation
- s, --output-suffix ARG**
Suffix style for output file names (default: L)
L: Legacy (e.g., eplustbl.csv)
C: Capital (e.g., eplusTable.csv)
D: Dash (e.g., eplus-table.csv)
- v, --version**
Display version information
- w, --weather ARG**
Weather file path (default: in.epw in current directory)
- x, --expandobjects**
Run ExpandObjects prior to simulation

EXAMPLES

Using a custom IDD file:

```
energyplus -i custom.idd -w weather.epw input.idf
```

Pre-processing using EPMacro and ExpandObjects:

```
energyplus -w weather.epw -m -x input.imf
```

Forcing design-day only simulations:

```
energyplus -D input.idf
```

APÊNCIDE B – GRÁFICOS E RESULTADOS COMPLEMENTARES