

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**



Trabalho de Conclusão de Curso

**Arquitetura Computacional para Controle Bioclimático: Uma Abordagem Baseada em Sistemas Inteligentes**

**Muriel Figueredo Franco**

Pelotas, 2014

**Muriel Figueredo Franco**

**Arquitetura Computacional para Controle Bioclimático: Uma Abordagem Baseada em Sistemas Inteligentes**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação

Orientador: Prof. Ms. Anderson Priebe Ferrugem  
Coorientador: Prof. Dr. Antônio César Silveira Baptista da Silva

Pelotas, 2014

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

F826a Franco, Muriel Figueredo

Arquitetura computacional para controle bioclimático :  
uma abordagem baseada em sistemas inteligentes / Muriel  
Figueredo Franco ; Anderson Priebe Ferrugem, orientador ;  
Antônio César Silveira Baptista da Silva, coorientador. —  
Pelotas, 2014.

65 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência  
da Computação) — Centro de Desenvolvimento  
Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2014.

1. Inteligência artificial. 2. Eficiência energética. 3.  
Sistemas inteligentes. 4. Automação predial. 5. Arquitetura  
bioclimática. I. Ferrugem, Anderson Priebe, orient. II. Silva,  
Antônio César Silveira Baptista da, coorient. III. Título.

CDD : 006.3


Muriel Figueredo Franco

**Arquitetura Computacional Para Controle Bioclimático: Uma Abordagem Baseada Em Sistemas Inteligentes**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.


Data da Defesa: 09 de Dezembro de 2014

Banca Examinadora:



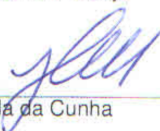
---

Prof. Anderson Priebe Ferrugem – Orientador



---

Prof. Ricardo Matsumura Araujo



---

Prof. Eduardo Graia da Cunha

**Dedico este trabalho a todos brasileiros que diariamente tem seus sonhos, e de seus filhos, interrompidos por uma sociedade dominada pela injustiça, opressão e preconceito.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente, acima de tudo, a minha família. A meu pai, uma grande referência, que venceu uma infância difícil e proporcionou inúmeras oportunidades em minha vida, além de ser meu maior motivador. A minha mãe, que abdicou de muitas coisas na vida para a dedicação integral na criação e proteção de seus filhos, uma mão amiga e uma fonte inesgotável de amor e apoio. A meu irmão, um melhor amigo que a vida me garantiu, uma pessoa sempre presente em todos momentos importantes de minha formação e uma referência para a vida. Estas pessoas, representam minha base e minha maior fonte de incentivo para seguir em frente com meus sonhos e anseios.

Meus sinceros agradecimentos ao meu mestre Anderson Priebe Ferrugem, que me orientou durante toda a graduação e se tornou um grande amigo. Uma pessoa que realmente fez a diferença no meu processo de amadurecimento durante a graduação.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Conforto e Eficiência Energética (LABCEE) pelos ótimos anos de convivência. Em especial ao Antônio César Silveira Baptista da Silva, que me proporcionou a oportunidade de integrar esta equipe e foi algo além de um co-orientador, exercendo um papel muito importante na minha trajetória dentro da universidade. Enfatizo também meu agradecimento ao David Martins, por toda sua disposição em me auxiliar nos diferentes desafios para o desenvolvimento deste trabalho.

Durante a longa, e muitas vezes estressante, caminhada universitária, tive ao meu lado pessoas especiais. Minha namorada, uma parceira e amiga, que sempre me apoiou e contribuiu para que os momentos felizes prevalecessem em minha vida. Meus amigos, que tornaram esta trajetória muito mais interessante, e contribuíram muito para minha formação científica e humana. A felicidade se compartilha, ou se perde. Com certeza, sou muito feliz em ter tantas pessoas com as quais posso compartilhar momentos intensos de minha vida.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos professores que fazem do Bacharelado em Ciência da Computação da UFPEL uma referência nacional. Também agradeço ao Governo Federal e todos contribuintes, que me proporcionaram um ensino básico totalmente gratuito e agora, graças ao REUNI, uma sólida formação universitária.

Não acredito em destino, mas sim no poder de nossas escolhas. Olhando para o passado, sou muito grato a todas pessoas que desempenharam alguma influência em minha trajetória de vida, sem eles, o presente não seria possível.

**“A longo prazo os homens acertam apenas para aquilo que apontam. Por isso, embora falhem imediatamente, seria melhor que apontassem para algo mais alto.”**

**— Henry Thoreau**

## RESUMO

FRANCO, Muriel Figueredo. **Arquitetura Computacional para Controle Bioclimático: Uma Abordagem Baseada em Sistemas Inteligentes**. 2014. ?? f. Trabalho de Conclusão de Curso () – , Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

A utilização racional de energia tem sido tema de discussão em diversos setores do cenário mundial, tendo a eficiência energética como principal pilar para as políticas de energia sustentável. As soluções apontadas por especialistas para reduzir o consumo e conter o desperdício de energia, seria através da aplicação de técnicas e ou tecnologias que utilizem de maneira mais eficiente os recursos providos pela natureza.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um sistema computacional capaz de tomar decisões para gerenciar a eficiência energética de uma edificação, preservando as condições de conforto térmico e as preferências particulares do usuário, tendo em vista o máximo aproveitamento dos meios passivos de condicionamento oferecidos pelo projeto arquitetônico. Para esta finalidade, propomos quatro diferentes técnicas de controle: Sistema Especialista, Redes Neurais, Proporcional-Integral-Derivativo e Lógica Difusa.

Para a realização deste trabalho, é necessário a utilização de técnicas mais avançadas de simulação energética, que proporcionam uma maior liberdade para análise, testes e implementação de controles. Com isso, o Build Control Virtual Test Bed é tido como um alicerce para a construção deste trabalho e de uma metodologia para a solução de outros problemas da área de simulação energética.

Através da utilização do BCVTB, é possível criar conexões, em tempo de simulação, entre diversos softwares. Utilizamos esta abordagem para realizar a comunicação entre o EnergyPlus, um software para simulação da carga térmica de uma construção, e o MATLAB, onde são implementados os algoritmos e realizado o processo de decisão de abertura e fechamento das janelas do edifício.

Os resultados obtidos, asseguram que, os controles utilizando Redes Neurais e Lógica Difusa, obtiveram maiores ganhos energéticos, quando comparados a outras abordagens. A Rede Neural obteve os melhores resultados para um mês típico de verão, já a Lógica Difusa, um comportamento mais promissor para o inverno. Estes resultados, mostram que, os controles implementados garantem vantagens em termos de conforto e eficiência energética.

**Keywords:** Inteligência Artificial, Sistemas Inteligentes, Eficiência Energética, Automação Predial, Arquitetura Bioclimática.

## ABSTRACT

FRANCO, Muriel Figueredo. **Computational Architecture to bioclimatic control: A intelligent systems approach**. 2014. ?? f. Trabalho de Conclusão de Curso () – , Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

The rational use of energy has been the subject of discussion in various sectors of the world scene , with the energy efficiency as the main pillar for sustainable energy policies. The solutions suggested by experts to reduce consumption and reduce energy waste, would be through the application of techniques and technologies or that use more efficiently the resources provided by nature.

The main objective of this work is to develop a software able to make decisions to manage the efficiency energy of a building , maintaining the conditions of thermal comfort and the particular preferences of the user, in order to take full advantage of media conditioning liabilities offered by architectural design. For this purpose , we propose four different control techniques : Expert System , Neural Networks, Proportional - Integral- Derivative and Fuzzy Logic .

For this work , the use of more advanced techniques of energy simulation is necessary, providing greater freedom for analysis , testing and implementation of controls. Thus, the Control Virtual Test Bed Build is taken as a foundation for the construction of this work and a methodology for the solution of other problems of energy simulation area.

By using BCVTB , you can create connections in simulation time between various software . We used this approach to perform communication between the EnergyPlus software for simulating the thermal load of a building, and MATLAB , where algorithms are implemented and carried out the process opening and closing decision from the building windows .

The results , ensure that the controls using Neural Networks and Fuzzy Logic , had higher energy savings when compared to other approaches . The Neural Network obtained the best results for a typical summer month , JAA Fuzzy Logic , a more promising performance for the winter. These results show that the implemented controls ensure advantages in terms of comfort and energy efficiency.

**Keywords:** Artificial Inteligence, Intelligent Systems, Energetic Efficiency, Bioclimatic Architecture.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Áreas de apoio para IA . . . . .	21
Figura 2	Estrutura PID . . . . .	23
Figura 3	Diagrama simplificado de uma rede neural artificial . . . . .	24
Figura 4	Representação de conjuntos difuso e clássico . . . . .	26
Figura 5	Interface de modelagem do DesignBuilder . . . . .	30
Figura 6	Residência modelada no DesignBuilder . . . . .	31
Figura 7	Trecho retirado de um IDF . . . . .	33
Figura 8	Comunicação com interfaces externas . . . . .	34
Figura 9	Interface do BCVTB . . . . .	35
Figura 10	Diagrama do fluxo de dados . . . . .	36
Figura 11	Fluxograma de representação do Sistema Especialista . . . . .	37
Figura 12	Representação da variável PMV . . . . .	40
Figura 13	Representação da variável Diff . . . . .	41
Figura 14	Representação da variável de saída . . . . .	41
Figura 15	Percentual de horas em conforto do SE . . . . .	45
Figura 16	Percentual de horas em conforto do controle baseado em RN . . . . .	46
Figura 17	Percentual de horas em conforto do controle PID . . . . .	47
Figura 18	Percentual de horas em conforto do controle com Lógica Difusa . . . . .	48
Figura 19	Percentual de horas em conforto dos controles no Verão . . . . .	49
Figura 20	Percentual de horas em conforto dos controles no Inverno . . . . .	51
Figura 21	Consumo devido ao acionamento do HVAC durante a aplicação de cada controle . . . . .	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Escala de Sensação Térmica . . . . .	20
Tabela 2	Aplicações de IA . . . . .	21
Tabela 3	Exemplo de entradas para o treinamento . . . . .	39
Tabela 4	Exemplo de saídas para o treinamento . . . . .	39
Tabela 5	Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto . . . . .	45
Tabela 6	Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto . . . . .	46
Tabela 7	Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto . . . . .	48
Tabela 8	Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto . . . . .	49
Tabela 9	Comparação Soma das Diferenças e horas em desconforto . . . . .	50
Tabela 10	Comparação Soma das Diferenças e horas em desconforto . . . . .	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BCVTB	Building Control Virtual Test Bed
EPlus	Energy Plus
HVAC	Heating, Ventilating and Air conditioning
IA	Inteligência artificial
IDF	Input Data File
Jan	Janela
kWh	Kilowatt hora
LABCEE	Laboratório de Conforto e Eficiência Energética
LD	Lógica Difusa
MATLAB	Matrix Laboratory
PMV	Predicted Mean Vote
PID	Proporcional Integral Derivativo
PROCEL	Programa Nacional de Eficiência Energética
RN	Rede neural
TExt	Temperatura Externa
TInt	Temperatura Interna
UFPEL	Universidade Federal de Pelotas
SE	Sistema especialista

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1.1	Motivação e Justificativa	16
1.2	Objetivos e Contribuições	17
1.3	Organização do trabalho	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	19
2.1	Arquitetura Bioclimática	19
2.2	Voto Médio Estimado	20
2.3	Inteligência Artificial aplicada	20
2.3.1	Sistemas especialistas	22
2.3.2	Proporcional Integral Derivativo	22
2.3.3	Redes Neurais	24
2.3.4	Lógica Difusa	25
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	27
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b>	29
4.1	DesignBuilder	30
4.2	EnergyPlus	31
4.2.1	Input Data File	32
4.2.2	Arquivo Climático	33
4.3	MATLAB	33
4.4	BCVTB	34
<b>5</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE</b>	36
5.1	Sistema especialista baseado em regras	37
5.2	Controle PID	38
5.3	Controle com Redes Neurais	38
5.3.1	Base de treinamento	39
5.4	Controle baseado em Lógica Difusa	40
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	43
6.1	Critérios de Análise	43
6.2	Resultados Sistema Especialista	44
6.3	Resultados Redes Neurais	46
6.4	Resultados PID	47
6.5	Resultados Lógica Difusa	48
6.6	Avaliação e Discussão	49
6.6.1	Cenário 1	49

6.6.2	Cenário 2	50
<b>6.7</b>	<b>Consumo</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>53</b>
<b>7.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXO A</b>	
	Modelagem da simulação na interface do BCVTB58 -1ex plus	
	<b>SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM REGRAS</b>	<b>59 -1ex plus</b>
	<b>ANEXO B</b>	
	<b>PRÁTICAS DURANTE A GRADUAÇÃO</b>	<b>64</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A arquitetura exerce duas funções essenciais para a humanidade: abrigo e proteção. É uma condição inerente a uma boa arquitetura o provimento de conforto ao usuário, tornando o abrigo adequado às suas necessidades, independente da construção ou local. Durante décadas, ocorreu o desenvolvimento de materiais e tecnologias, com o objetivo de minimizar o desconforto térmico e visual dos ambientes construídos. Os novos recursos disponíveis, deram aos projetistas uma posição bastante favorável perante os problemas de adequação da construção ao clima, porém, iniciou um processo de gasto energético excessivo.

A utilização racional de energia tem sido tema de discussão em diversos setores do cenário mundial, tendo a eficiência energética como o principal pilar para as políticas de energia sustentável. No Brasil, foi estabelecido em 2003, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA), onde as ações foram ampliadas e organizadas com o objetivo de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente.

O uso constante de equipamentos para ventilação artificial em prédios comerciais e residenciais, tem se tornado uma tarefa comum ao longo dos anos. Essa prática, em conjunto com outros equipamentos dependentes de recursos energéticos não renováveis, tem contribuído para a emissão de gases nocivos ao planeta, provocando assim consequências desastrosas, como chuvas ácidas e redução da camada de ozônio. O desperdício energético também é um fator agravante, no Brasil, por exemplo, os consumidores desperdiçam cerca de 22 milhões de kW de energia por ano, devido a má utilização de equipamentos HVAC.

A solução apontadas por especialistas, seria conter esse déficit por meio de técnicas e ou tecnologias que utilizem de maneira mais eficiente os recursos providos pela natureza. Mediante isso, surge a necessidade de retomada da arquitetura a seus princípios básicos, ou seja, a busca natural de projetistas para adaptar a edificação ao seu ambiente climático, de modo a otimizar o desempenho energético, mantendo as condições de conforto aos usuários.

Uma arquitetura bioclimática, conhecida desde os tempos antigos, consiste em planejar um edifício, levando em consideração as condições climáticas e utilizando os recursos disponíveis na natureza para minimizar os impactos ambientais.

A elaboração de um controle computacional para explorar esse tipo de arquitetura, possibilita planejar e controlar o uso de um edifício através do gerenciamento dos recursos arquitetônicos disponíveis no ambiente, como por exemplo, janelas e brises, e com isso, permitir, que a construção realize interações de maneira inteligente com o ambiente, a fim de obter um maior aproveitamento dos recursos arquitetônicos disponíveis e, consecutivamente, gerar um menor gasto energético e uma melhor experiência para o usuário.

## 1.1 Motivação e Justificativa

É observado ao longo dos anos, principalmente em países desenvolvidos, que a computação é uma ferramenta imprescindível para a construção civil. Além de agilizar as obras, através da solução de cálculos complexos e gerenciamento de recursos, ajuda na qualidade do projeto e garante maior confiabilidade nas decisões. Este cenário promissor garante a motivação para buscar os benefícios de técnicas computacionais, não somente durante a construção, mas também no uso do edifício.

Um edifício baseado em uma Arquitetura Bioclimática, garante desde o seu planejamento, os requisitos fundamentais de eficiência energética. Porém, para uma adequada utilização de todos recursos arquitetônicos disponíveis, necessita-se intervenção de um operador especialista, dificultando assim, que o usuário comum possa usufruir de toda sua capacidade. Buscamos na Ciência da Computação, o conceito de Inteligência Artificial, que segundo (RUSSELL; NORVIG, 2013), permite estudar e projetar agentes inteligentes, onde um agente inteligente é um sistema que percebe seu ambiente e toma atitudes que maximizam suas chances de sucesso. Com isso, executamos um projeto para desenvolver uma solução computacional para automação dos meios passivos de ventilação presentes na edificação, onde, sistemas inteligentes tomam as decisões de abertura e fechamento dos componentes, de modo que, se mantenha o conforto térmico para o usuário, evitando a utilização constante de equipamentos artificiais para ventilação.

O foco deste trabalho situa-se nos meios passivos de ventilação, visto que alguns autores, como (MARTINS, 2009), verificaram uma enorme influência da operação de janelas por usuários no balanço de energia em prédios comerciais e residenciais.

Devido a complexidade intrínseca no processo de utilização ótima de uma edificação, necessita-se interação entre áreas distintas, com a finalidade de buscar por soluções para os problemas encontrados. A grande quantidade de informações e variáveis passíveis de verificação para a tomada de decisões, podem ser utilizadas

por técnicas de inteligência artificial para a implementação de um sistema completo que provê um controle otimizado de abertura e fechamento de janelas.

## **1.2 Objetivos e Contribuições**

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema computacional capaz de tomar decisões para gerenciar a eficiência energética de uma edificação, preservando as condições de conforto térmico e as preferências particulares do usuário, tendo em vista o aproveitamento máximo dos meios passivos de condicionamento oferecidos pelo projeto arquitetônico. Buscamos ao final do processo de implementação e avaliação, estabelecer um controle inteligente que se adapte ao problema da abertura e fechamento de janelas, de modo que a edificação se comporte como um organismo que interage com o seu meio.

A elaboração de controles avançados requer características não disponíveis nas ferramentas de simulação tradicionais. Entre algumas características interessantes para usuários avançados, incluem-se flexibilidade para manipulação de entrada e saída, manipulação de parâmetros de controle, operação com vetores e chamada externa de funções. Uma das linhas de pesquisa deste trabalho, consiste em elaborar uma interface de trabalho que contenha os recursos citados, impactando assim, na liberdade de controle durante uma simulação.

Espera-se que a metodologia de trabalho proposta, forneça recursos para que usuários avançados busquem soluções para outros problemas da área, deixando assim, um legado de trabalho para futuros pesquisadores.

Pretende-se que os controles implementados e avaliados durante esse trabalho sejam transportados para o mundo real. O projeto que busca recursos junto a Universidade Federal de Pelotas, propõe a construção do edifício projetado em (POUEY, 2011), e possivelmente a utilização dos controles propostos neste trabalho para automação e maior aproveitamento do projeto arquitetônico do edifício.

## **1.3 Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção dois serão abordados os principais conceitos e definições para um melhor entedimento do trabalho. Na terceira seção, é apresentada uma relação de trabalhos relacionados e alguns pontos em discussão no estado da arte. Na seção quatro, são apresentados os softwares fundamentais para a simulação computacional realizada durante este trabalho. Na quinta seção, são descritos os controles desenvolvidos e as particularidades presentes em cada implementação. Na sexta sessão, é apresentado os resultados obtidos com a aplicação de cada controle, onde também é realizada uma avaliação e discussão dos

resultados atingidos. Por fim, a seção sete contém as conclusões e considerações finais do trabalho.

## **2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Neste capítulo, são apresentados conceitos e definições necessários para o entendimento deste trabalho. Primeiramente, apresentamos fundamentos básicos da Arquitetura e Urbanismo, de modo que o leitor adquira um conhecimento adequado para o entendimento da correlação entre as áreas estudadas. Este capítulo também introduz conceitos de Inteligência Artificial e suas aplicações, que são fundamentais para a compreensão deste trabalho.

### **2.1 Arquitetura Bioclimática**

Segundo (OLIVEIRA MONTEIRO, 2012), uma Arquitetura Bioclimática consiste em projetar um edifício de acordo com as especificidades do clima e as características ambientais do local onde se insere, de forma a atingir a eficiência energética e o conforto ambiental interno, utilizando para isso, a energia que pode ser obtida diretamente das condições ambientais. A definição de construção sustentável é frequentemente associada a esse tipo de arquitetura.

Embora seja um conceito que ganhou espaço somente nos últimos anos, foi tradicionalmente utilizado desde a antiguidade, como por exemplo, no desenho das cidades romanas baseado em sua orientação solar e nos pátios interiores de origem árabe. Nos dias atuais, nem todos projetos levam em conta a Arquitetura Bioclimática, e isso é consequência do elevado custo de construção e também ao pouco cuidado com o meio ambiente, por parte de governos e de empresas da construção civil.

Em (ARAUJO, 1996), apresentam-se nove características essenciais para uma construção sustentável:

- Planejamento sustentável da obra
- Aproveitamento passivo dos recursos naturais
- Eficiência energética
- Gestão e economia de água

- Gestão de resíduos na edificação
- Qualidade do ar e do ambiente interior
- Conforto termo-acústico
- Uso racional de materiais
- Uso de produtos e tecnologias ambientalmente amigáveis

Define-se então, que projeto bioclimático é uma abordagem que tira vantagem do clima através da aplicação correta de elementos de projeto e de tecnologia para controle dos processos de transferência de calor, mantendo as condições de conforto dos usuários na edificação e contribuindo para a economia de energia (PITTA, 1994).

## 2.2 Voto Médio Estimado

Para avaliação do conforto térmico em ambientes, foi estabelecido em (FANGER, 1970), o Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote, PMV*), o qual é definido por uma equação que representa os processos de troca de calor entre o corpo e o ambiente.

O PMV consiste em um valor numérico que traduz a sensibilidade humana ao frio e ao calor. Quando em conforto térmico, o PMV é 0 (zero). Para o frio é negativo e para o calor é positivo (R. LAMBERTS, 2001).

A Tabela 1 representa o nível de conforto caracterizado pela Escala de Sensação Térmica de ASHRAE, tendo como referência o valor do PMV.

Tabela 1: Escala de Sensação Térmica

Valor	Sensação
+3	<i>Quente</i>
+2	<i>Morno</i>
+1	<i>Levemente morno</i>
0	<i>Neutro</i>
-1	<i>Levemente fresco</i>
-2	<i>Fresco</i>
-3	<i>Frio</i>

## 2.3 Inteligência Artificial aplicada

Inteligência Artificial é a ciência e engenharia de produzir máquinas inteligentes, especialmente programas de computadores inteligentes (MCCARTHY, 2000). Seu

conceito está relacionado com a tarefa de usar computadores para entender a inteligência humana.

Desde suas origens, na década de 50, a área de Inteligência Artificial vem se desenvolvendo em várias linhas de pesquisa, com o objetivo de fornecer ao computador as habilidades para efetuar funções antes desempenhadas apenas através da inteligência humana. IA é um ramo da Ciência da Computação, porém, por ser um tópico muito amplo, também está relacionada com diversas outras áreas do conhecimento humano. A Figura 1 apresenta algumas áreas de estudo e apoio da Inteligência Artificial.

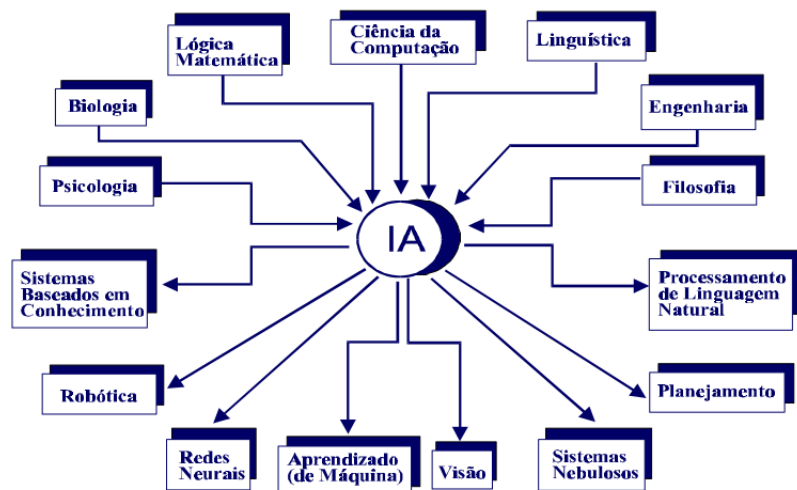


Figura 1: Áreas de apoio para IA

Os pesquisadores de IA são livres para usar métodos que são obtidos através da observação de pessoas ou que envolvam maior de computação do que uma pessoa é capaz. As possíveis aplicações de Inteligência Artificial são enormes. As utilizações mais comuns estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2: Aplicações de IA

Aplicações
Robótica
Automação industrial
Verificação de Software
Otimização e controle de processos
Processadores de linguagem natural
Mineração de dados
Escalonamento de tarefas
Reconhecimento de padrões

Para a realização deste trabalho, direcionamos nossa atenção para o estudo e aplicação de algumas subáreas do campo da Inteligência Artificial. Estas técnicas são apresentadas no decorrer deste capítulo e foram escolhidas por apresentarem recursos interessantes para as diferentes necessidades deste trabalho.

### **2.3.1 Sistemas especialistas**

Um Sistema Especialista (FLORES, 2003) é uma forma de sistema baseado no conhecimento projetado para emular a especialização humana de algum domínio específico. São sistemas que solucionam problemas que são resolvidos apenas por pessoas especialistas, que acumularam conhecimento exigido, na resolução destes problemas. Um SE deve possuir uma base de conhecimento formada por fatos, regras e heurísticas sobre um domínio, tal como um especialista humano faria. Este tipo de sistema deve ser capaz de oferecer sugestões e conselhos aos usuários, e também, de adquirir novos conhecimentos com essa interação.

O domínio de trabalho de um SE é altamente restrito, visto que seu objetivo é reproduzir o comportamento de especialistas humanos na resolução de problemas específicos, e não possui a capacidade de raciocínio humano para inferir erros de análise e aplicação.

O primeiro Sistema Especialista, denominado DENDRAL, foi descrito em (FEIGENBAUM E.; BUCHANAN, 1971), e consiste de um projeto desenvolvido desde 1965 na Universidade de Stanford. O objetivo do projeto é desenvolver sistemas capazes de determinar automaticamente o conjunto de estruturas moleculares, constituídas de átomos conhecidos, capazes de explicar dados provenientes da análise espectrográfica de uma molécula desconhecida.

Desde então, a abordagem de Sistemas Especialistas vem sendo utilizada para resolver problemas em diversos domínios, como por exemplo: agricultura, química, sistemas de computadores, eletrônica, engenharia, geologia, gerenciamento de informações, direito, matemática, medicina, aplicações militares, física, controle de processos e tecnologia espacial.

### **2.3.2 Proporcional Integral Derivativo**

O Proporcional Integral Derivativo (PID) é o algoritmo de controle mais utilizado na indústria, principalmente para sistemas de controle industrial. Sua popularidade é atribuída ao seu desempenho robusto e a sua simplicidade funcional. O PID, como o nome sugere, é composto por três coeficientes que são variados até a obtenção de uma resposta ideal do sistema:

- Proporcional
- Integral

- Derivativo

A fórmula do PID é dado por:

$$u(t) = MV(t) = K_p(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d$$

onde:

- $u(t)$  é a saída em relação ao tempo
- $e(t)$  é a entrada menos o erro em relação ao tempo
- $K_p$  é a constante proporcional
- $K_i$  é a constante integral
- $K_d$  é a constante derivativa

O componente Proporcional depende da diferença entre o ponto de ajuste e a variável de processo. Esta diferença pode ser referida como o termo de erro. O ganho proporcional ( $K_c$ ) determina a taxa de saída para o sinal de erro. A resposta Integral soma o termo de erro durante o processo. O resultado garante que um pequeno erro cause um impacto e aumento no componente Integral. A componente Derivada faz com que a saída diminua quando a variável de processo aumenta rapidamente. Esta derivada de resposta é proporcional a taxa de variação da variável de processo. A Fig. 2 apresenta o diagrama estrutural do controlador PID.

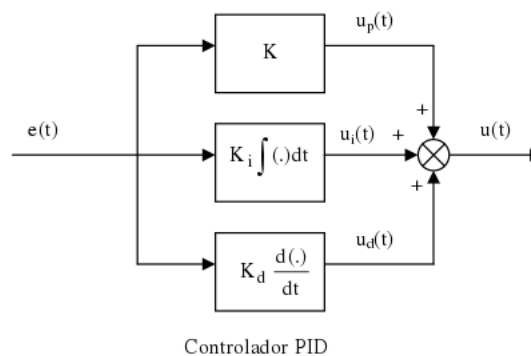


Figura 2: Estrutura PID

O algoritmo de controle PID possui flexibilidade suficiente para produzir resultados satisfatórios em uma ampla variedade de aplicações, o que tem sido uma das principais razões de seu uso contínuo ao decorrer dos anos.

### 2.3.3 Redes Neurais

Rede Neural (HAYKIN, 2001) é um processador paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Ela se assemelha ao cérebro humano em dois aspectos:

- O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem.
- Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.

Os modelos de redes neurais mais conhecidos possuem algoritmos de aprendizagem, cuja função é modificar os pesos de suas conexões de acordo com os padrões apresentados. Ou seja, elas aprendem através de exemplos predefinidos.

As arquiteturas neurais são tipicamente organizadas em camadas e seu diagrama simplificado é apresentado na Figura 3

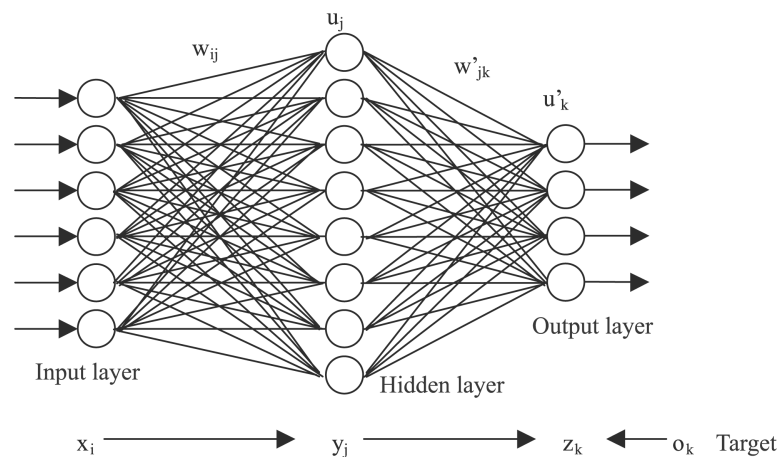


Figura 3: Diagrama simplificado de uma rede neural artificial

Usualmente, as camadas são organizadas de acordo com suas funções, na camada de entrada (*input layer*) os padrões são apresentados para a rede. As camadas escondidas (*hidden layer*) executam operações intermediárias e através das conexões ponderadas, são responsáveis pela maior parte do processamento. O resultado final é concluído e apresentado na camada de saída (*output layer*).

Uma rede neural é especificada principalmente pela sua topologia, pelas características dos nós e pelos algoritmos de treinamento. A propriedade mais interessante nas Redes Neurais é a habilidade de aprender do próprio ambiente e com isso melhorar seu desempenho. Este processo é realizado através de ajustes aplicado a seus pesos, e considera o aprendizado concluído quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas.

A generalização citada, se refere ao fato de a RN produzir saídas adequadas para entradas que não estavam presentes durante o treinamento (aprendizagem). Estas capacidades de processamento de informação tornam possível para as redes neurais resolver problemas complexos que são atualmente intratáveis.

### 2.3.4 Lógica Difusa

Em nossa comunicação cotidiana empregamos palavras e sentenças com significados não precisos ou vagos. Isto acontece porque, o emissor e o receptor não necessitam de informações mais precisas, pois estão acostumados a lidar com tais tipos de imprecisão. Por exemplo, quando alguém, em um restaurante, solicita uma bebida bem quente, está pouco preocupado com a real temperatura do líquido. O que importa para o cliente é que a temperatura da bebida esteja bastante acima do que ele considera como morno. Certamente, é pouco provável que alguém seja capaz de determinar o ponto em que a bebida passa de morno para quente. Para lidar com os tipos de informações apresentadas no exemplo, recorre-se às definições da Lógica Difusa (RABUSKE, 1995) (em inglês "fuzzy logic"). Dentro desta perspectiva, a bebida pode ser mais ou menos quente, dependendo de sua temperatura.

O termo *fuzzy* foi introduzido por (ZADEH, 1965) para descrever conjuntos cujo critérios de pertinência são imprecisos. Segundo este modo de considerar algo, uma informação não tem apenas dois estados possíveis, mas sim um grau de pertinência a determinado estado.

Um modelo difuso simples (PEDRYCZ; GOMIDE, 2007) é construído associando um valor  $\mu(p)$  a uma proposição  $p$ , de modo a indicar o grau de veracidade desta proposição, sendo  $\mu(x)$  uma função arbitrária, cujo conjunto imagem está entre 0 (0%) e 1 (100%). Caso  $p$  seja verdadeiro, deve estar associado ao valor 100%, e caso  $p$  seja falso deverá ser associado ao valor 0%. Deste modo, a lógica difusa estende a lógica booleana, visto que permite uma gama infinita de valores no intervalo.

Geralmente, a utilização da Lógica Fuzzy está associada ao uso de conjuntos difusos. Um conjunto difuso (PEDRYCZ; GOMIDE, 2000) estende o conceito de conjunto, permitindo que um elemento possa ter um grau de pertinência variando entre 0 e 1, diferente da teoria de conjuntos tradicional, onde um elemento pertence ou não ao conjunto. A Figura 4 permite uma visualização do comportamento do conjunto difuso comparado ao clássico.

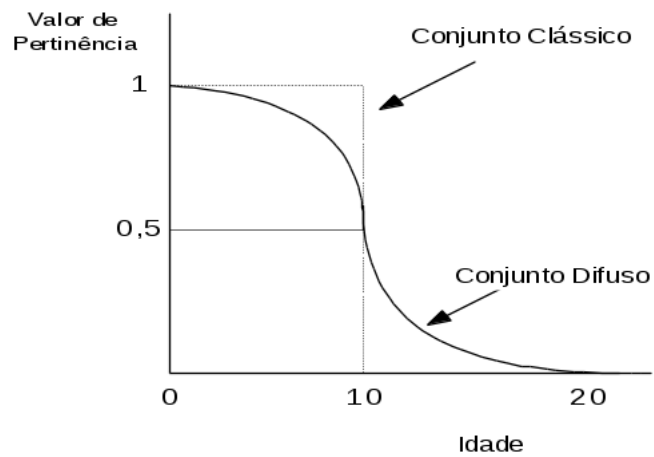


Figura 4: Representação de conjuntos difuso e clássico

As diversas implementações de lógica difusa permitem que estados indeterminados possam ser tratados por dispositivos de controle. Desse modo, é possível avaliar elementos não-quantificáveis, como por exemplo, avaliar entre quente, morno, mais ou menos morno.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nos parágrafos seguintes, são apresentados alguns projetos que possuem aplicações e técnicas relacionadas ao desenvolvimento deste trabalho.

A construção e análise de sistemas avançados de controle de edifícios, em sua fase de concepção, é um tema emergente. Em (Pieter-Jan Hoes and Roel Loonen, 2013) é apresentado um novo método de simulação que garante a capacidade de analisar o impacto de estratégias de controle avançadas durante a fase de projeto.

Em 2014, a Google, grande fornecedora de serviços online, divulgou a utilização de técnicas de IA para o aumento da eficiência energética em seus *Data Centers* (GAO, 2014). O projeto consiste em utilizar a aprendizagem de máquina para prever o impacto de variáveis, como por exemplo, a temperatura do ar exterior, e, com isso, ajustar a configuração para minimizar o uso de energia. Esta implementação se deu em razão do grande número de configurações possíveis de funcionamento e interdependências não-lineares, as quais, tornam de difícil compreensão os assuntos relacionados a eficiência energética. O modelo desenvolvido tem sido extensivamente testado e validado no Google DC. Os resultados demonstram que a aprendizagem da máquina é uma maneira eficaz de alavancar dados de sensores existentes para modelar o desempenho e melhorar a eficiência energética.

O trabalho apresentado em (SGARBI, 2007), tem como objetivo apresentar um sistema de automação residencial baseado em um sistema ABC (Automação Baseada em Comportamento), o qual busca observar e aprender o comportamento de um habitante. O trabalho se sustenta no conceito de Domótica, o que está relacionado a instalação de tecnologia em residências, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida, aumentar a segurança e viabilizar o uso racional dos recursos para seus habitantes. Os resultados demonstram ser possível ter um sistema inteligente que aprende regras de controle com os próprios habitantes.

O trabalho desenvolvido por (MEDEVEDOVSKI, 2010) busca aplicar técnicas de Inteligência Artificial na automação de um dispositivo de aquecimento, denominado termo-acumulador. O sistema tem como objetivo o aquecimento de ambientes por intermédio do aproveitamento da radiação solar direta em períodos de inverno. Os re-

sultados apresentados mostraram que técnicas como Redes Neurais e Lógica Difusa podem ser utilizadas para o controle de equipamentos que possuem a interferência de agentes externos, como por exemplo, o clima ao qual está exposto.

Em (TORRES; MARTIN, 2013) foi descrito um controle adaptativo que busca estabelecer o conforto térmico através da utilização de Redes Neurais. Os resultados divulgados demonstram que o uso de técnicas de IA resultam em um melhor conforto térmico, quando comparado aos controles de temperatura convencionais.

A validação da aplicação de Lógica Difusa em espaços de convivências para regular o conforto também tem sido executada no decorrer dos anos. Em (DOUNIS, 2000), foram apresentadas as primeiras possibilidades de utilização deste tipo de técnica e exemplos de conjuntos de estratégias *fuzzy*.

## 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação envolve o uso de um computador para imitar a operação de um inteiro processo ou sistema. Segundo (FREITAS FILHO, 2008), pode ser definida como um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo, com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

Os programas para simulação termoenergética de edificações passaram a ser mais difundidos a partir da década de 70, após a crise do petróleo e a proliferação dos computadores pessoais. As novas ferramentas computacionais permitem aos profissionais analisar fenômenos complexos, como a transferência de calor em edificações. Geralmente, problemas deste tipo envolvem cálculos matriciais e iterações que dificultam a resolução manual.

As ferramentas atuais para avaliar o desempenho energético de construções são desenvolvidas e otimizadas para fins específicos, tendo como objetivo principal a simulação energética e o relatório de performance de edifícios. Com isso, acabam por oferecer um suporte rudimentar em termos de controle da construção, permitindo apenas operações básicas de controle, como por exemplo, a definição de um *setpoint*. Em (CRAWLEY, 2005) foi elaborado um resumo das capacidades e limitações das ferramentas do estado da arte.

Na demonstração realizada em (PANG, 2011) é possível verificar recursos disponíveis para criar ambientes de simulação em tempo real, de modo que seja possível a integração entre ferramentas distintas, e com isso, proporcionar maior potencial para análise, testes e efetivação de controles. A utilização deste tipo de método de simulação é fundamental para este trabalho, visto que nos permite a implementação dos controles propostos e sua avaliação em um ambiente controlado.

No decorrer deste capítulo será apresentado as principais ferramentas utilizadas para a realização deste trabalho.

## 4.1 DesignBuilder

O software *DesignBuilder* (OTECWEB, 2014) é uma poderosa ferramenta para a modelagem de edifícios, baseada no *EnergyPlus*, de excelente custo-benefício e de fácil aprendizado. Suas principais funcionalidades incluem a modelagem de edifícios complexos e a elaboração de análises de consumo de energia e do desempenho do projeto, incluindo informações detalhadas do desempenho ambiental da construção, além de imagens e animações, em qualquer estágio de desenvolvimento de projeto.

A modelagem *OpenGL*, presente no *DesignBuilder*, permite a modelagem dos edifícios, através da sobreposição de blocos 3D. Os blocos podem ser cortados e esticados, permitindo o trabalho em geometrias irregulares, além de gerar imagens renderizadas. A Figura 5 exibe uma edificação modelada no *DesignBuilder* e apresenta a interface de trabalho presente no software.

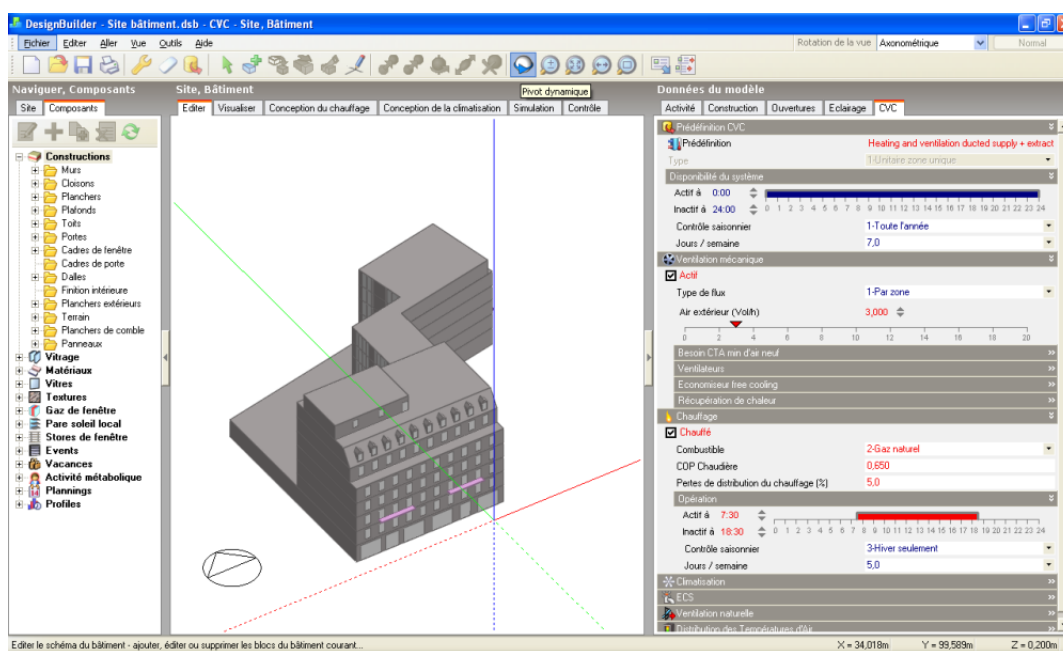


Figura 5: Interface de modelagem do DesignBuilder

A ferramenta possibilita checar os efeitos das alternativas de projeto no desempenho do edifício, permitindo a avaliação de parâmetros como: consumo anual de energia, horas de aquecimento e emissão de CO<sub>2</sub>. Inclui-se também em suas características, a capacidade de geração de arquivos IDF para possibilitar o trabalho fora do *DesignBuilder*, de modo a acessar funções não fornecidas no programa.

A principal necessidade do *DesignBuilder* foi durante a fase de concepção de uma residência sustentável para a aplicação dos sistemas inteligentes propostos. A Figura 6 revela o protótipo da residência desenvolvida, pela equipe do LABCEE, para prover maior aproveitamento dos recursos naturais e oferecer menores danos ao ambiente construído. Após a modelagem, a construção é convertida em um arquivo do tipo

IDF, o qual é a base de entrada para as simulações e implementações contidas neste trabalho.



Figura 6: Residência modelada no DesignBuilder

## 4.2 EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um programa computacional, criado e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, tendo como principal objetivo a simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas.

Em (CUNHA, 2014), o *EnergyPlus* é definido como uma ferramenta para a modelagem de energia para a avaliação do desempenho do edifício, que permite simular os sistemas de aquecimento, iluminação e ventilação, de forma a quantificar seu consumo de energia.

Algumas características, listadas em (MELO; SIMON, 2009), que diferenciam o *EnergyPlus* de outros softwares termoenergéticos, incluem:

- Intervalo de tempo (*timestep*) definido pelo usuário, com fração de hora, para interação entre as zonas térmicas e o ambiente.
- Cálculo de índices de conforto térmico, como por exemplo, o PMV.
- Elevada quantidade de variáveis disponíveis para gerar relatórios, tais como: clima, consumo, ventilação.
- Técnica de solução baseada no balanço de energia para as cargas térmicas prediais, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiante e convectivo na superfície interior e exterior, durante cada intervalo de tempo;
- Sistemas de condicionamento de ar configuráveis, que permitem ao usuário simular sistemas típicos comuns e sistemas poucos modificados, sem ter que recompilar o código fonte do programa.

Por se tratar de uma simulação bastante completa do edifício e seus sistemas de energia, o *EnergyPlus* acaba fornecendo uma grande quantia de dados para gerar relatórios e avaliação. Após sua execução, é garantido o acesso a temperaturas, radiação absorvida, ventilação, consumo energético e variáveis para avaliar o conforto térmico, como o *PMV*.

O uso do *EnergyPlus* neste trabalho consiste em simular a residência modelada, em cenários predefinidos. A execução da simulação depende de dois arquivos de entrada, os quais contém a especificação detalhada do prédio, como materiais utilizados e disposição solar, e também informações suficientes para criar um ambiente climático baseado em dados reais, como por exemplo, imitar as condições climáticas de uma cidade e expor a residência simulada neste clima. Os arquivos de entrada citados, estão detalhados abaixo.

#### **4.2.1 Input Data File**

O *Input Data File (IDF)* é a representação completa em texto puro de uma modelagem. Neste arquivo, todas as especificações e atributos vinculados a uma edificação estão presentes, desde a definição de paredes e janelas, até os sistemas HVAC e seu acionamento. A criação deste arquivo se dá diretamente no software utilizado para a modelagem, como por exemplo, através da função exportar do *DesignBuilder*. Dependendo da necessidade, a desvantagem deste tipo de arquivo é a ausência de interface gráfica para visualização do modelo, embora, neste trabalho seja fundamental para abstração de informações não necessárias e possibilitar alterações diretamente no arquivo.

A Figura 7 mostra uma parte extraída de um IDF, a qual representa a definição de alguns detalhes de uma parede. O IDF principal que utilizamos contém mais de 30.000 (trinta mil) linhas.

```

BuildingSurface:Detailed,
  Block6:Zone1_Wall_2_0_5,      ! Name
  Wall,                        ! Surface Type
  Paredes externas 29 brancas, ! Construction Name
  Block6:Zone1,                ! Zone Name
  Outdoors,                    ! Outside Boundary Condition
  ,                            ! Outside Boundary Condition Object
  SunExposed,                  ! Sun Exposure
  WindExposed,                 ! Wind Exposure
  .5,                          ! View Factor to Ground
  4,                           ! Number of Vertices
  -27.41214687,                ! Vertex 1 X-coordinate (m)
  2.2400000001,                ! Vertex 1 Y-coordinate (m)
  6.1804825199,                ! Vertex 1 Z-coordinate (m)
  -27.90603598,                ! Vertex 2 X-coordinate (m)
  2.2400000001,                ! Vertex 2 Y-coordinate (m)
  6.1804825199,                ! Vertex 2 Z-coordinate (m)
  -27.90603598,                ! Vertex 3 X-coordinate (m)
  2.2400000002,                ! Vertex 3 Y-coordinate (m)
  7.5940388099,                ! Vertex 3 Z-coordinate (m)
  -27.41214687,                ! Vertex 4 X-coordinate (m)
  2.2400000002,                ! Vertex 4 Y-coordinate (m)
  7.5940388099;               ! Vertex 4 Z-coordinate (m)

```

Figura 7: Trecho retirado de um IDF

#### 4.2.2 Arquivo Climático

Um arquivo climático (*WeatherFile*) contém um ano típico de uma região climática. Este arquivo é gerado através de cálculos e comparações entre dados climáticos providos por estações meteorológicas ou avaliações manuais na região desejada. A simulação recebe como parâmetro o arquivo escolhido e utiliza os dados contidos para criar um cenário idêntico, permitindo que o modelo seja exposto a este clima.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos oferece atualmente mais de 2.100 arquivos climáticos, de diferentes localizações. Durante a execução deste trabalho, realizamos testes e implementações baseados em arquivos climáticos da região de Santa Maria/RS, em razão desta cidade se situar na mesma zona bioclimática que a cidade de Pelotas (Zona Bioclimática 2).

### 4.3 MATLAB

O MatLab (do inglês, "Matrix Laboratory") (MATHWORKS, 2014) é uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo para computação numérica, visualização e programação. Seu uso permite analisar dados e desenvolver algoritmos, além de possuir uma grande quantidade de ferramentas (*toolbox*) para diversas aplicações, incluindo recursos para inteligência artificial, como o *Neural Network Toolbox* e o *Fuzzy Toolbox*.

A utilização do *MatLab* é interessante devido a sua baixa curva de aprendizagem, quantidade de *toolbox*, geração de gráficos e facilidade de integração com outras ferramentas da área de simulação, visto que alguns softwares já possuem protocolos de comunicação com ele, tornando assim, mais atrativa sua utilização.

## 4.4 BCVTB

O *Building Controls Virtual Test Bed* (WETTER, 2011) é uma ferramenta com a função de realizar uma conexão entre diferentes programas de simulação, e com isso, possibilitar a troca de informações e ações durante uma simulação. O BCVTB expande a capacidade individual dos programas tradicionais, criando canais de comunicação entre eles e permitindo a usuários avançados inúmeras possibilidades de trabalho. A lista de alguns programas suportados pela interface de comunicação do BCVTB são:

- EnergyPlus
- Modelica
- MatLab
- Simulink
- Radiance

O BCVTB é baseado em um software orientado a atores chamado *Ptolemy II*. Programas orientados a atores são construídos através da organização de blocos de forma que cada um atue como uma função, como por exemplo, uma operação matemática. O *Ptolemy II* já fornece uma série de atores que permitem desde cálculos simples até funções matemáticas complexas, além de possibilitar a construção de gráficos em tempo de simulação.

Durante a utilização do BCVTB também é possível definir o *timestep* da simulação. O *timestep* representa um relógio simulado para representar um tempo real, de modo que a troca de informações ocorra em um tempo simulado predefinido.

A Figura 8 apresenta a utilização do BCVTB para se comunicar com interfaces externas do *EnergyPlus* através de atores.

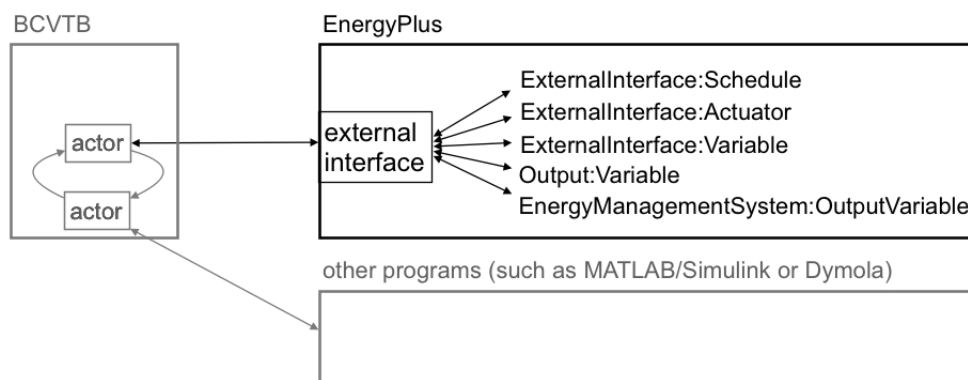


Figura 8: Comunicação com interfaces externas  
Fonte: BCVTB Manual

Na representação da Figura 8, podemos definir o EPlus como um ator do tipo *Simulator* e ter acesso as interfaces externas definidas no IDF utilizado, as quais podem ser utilizadas por algoritmos de controle. Através dos atores, é possível alterar os estados de interfaces presentes no *EnergyPlus*. Além de obter informações detalhadas em tempo de simulação, essas informações são transferidas pelo canal de comunicação através dos atores *VectorAssembler* e *VectorDisassembler*, responsáveis respectivamente, por construir e destruir vetores.

As informações trocadas entre atores *Simulator* seguem um padrão interno de comunicação definido pelo BCVTB. Normalmente, as informações são recebidas e enviadas em formas de vetores, e manipuladas diretamente no algoritmo. A quantidade de atores é ilimitada e seu funcionamento depende da correta conexão entre eles. A Figura 9 nos mostra a interface do BCVTB com dois atores *Simulator* e sua conexão.

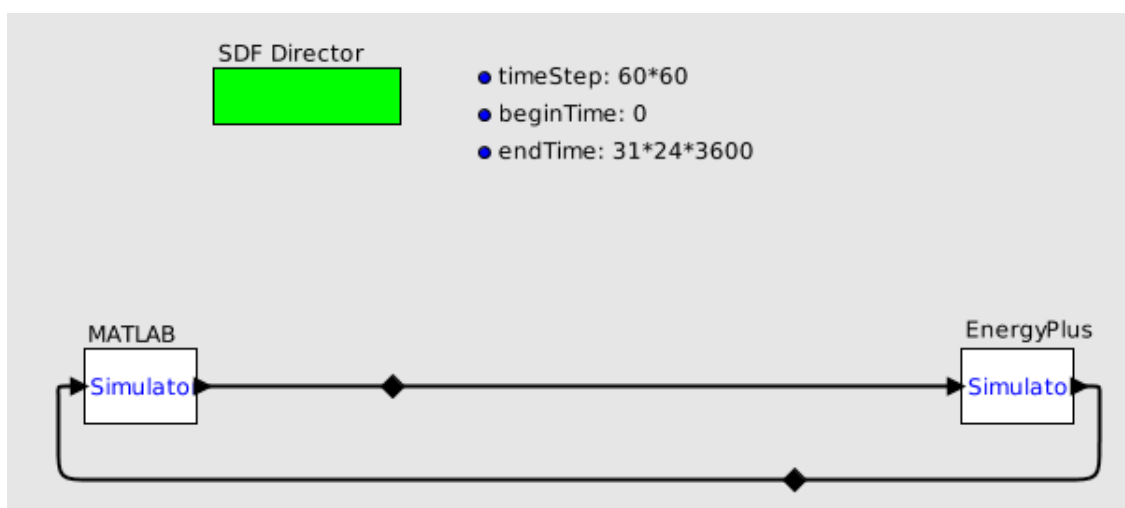


Figura 9: Interface do BCVTB

As aplicações típicas do BCVTB incluem a avaliação do desempenho de sistemas de energia e controles integrados ao edifício, desenvolvimento de novos algoritmos de controle e verificação formal de algoritmos para aplicar em construções reais. Em (FRANCO, 2012) são descritas algumas possibilidades de aplicação da conexão entre os softwares EnergyPlus e o MatLab.

A utilização do BCVTB neste trabalho se tem como crucial, visto que possibilitou a criação de um cenário propício para a análise de nossos algoritmos, antes de implementar um protótipo para o mundo real.

## 5 IMPLEMENTAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

O processo de implementação dos controles requer três recursos essenciais:

- Modelo
- Algoritmo de controle
- Comunicação para troca de dados

Os recursos necessários são providos pelos softwares descritos no capítulo 3. O modelo é simulado pelo EnergyPlus e o algoritmo é implementado no MATLAB, tendo como entrada os vetores de dados ( $v$ ) e ( $u$ ), que representam respectivamente, os estados das janelas e as variáveis do ambiente. O BCVTB é responsável por criar um canal para transferência de dados entre o EnergyPlus e o MATLAB, e com isso preencher os vetores de dados com informações e decisões sempre atualizadas da simulação. Na Figura 10 é demonstrado um diagrama com as conexões necessárias e seu fluxo de dados.

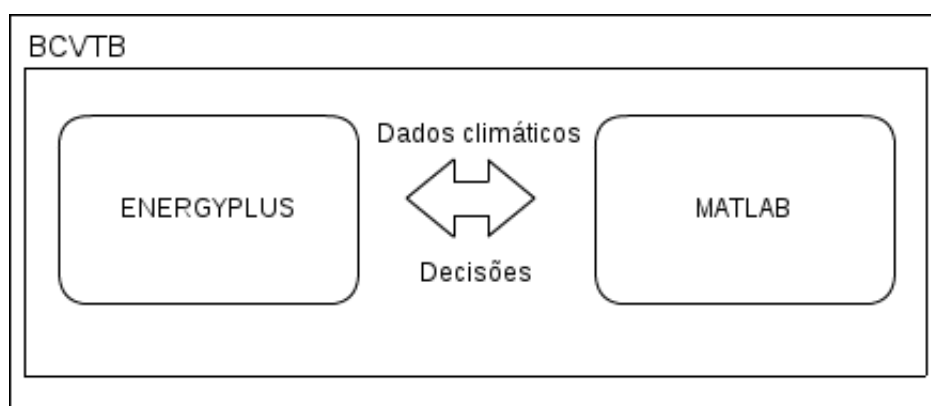


Figura 10: Diagrama do fluxo de dados

No decorrer deste capítulo, será apresentada a implementação dos algoritmos de controle, junto com suas particularidades e ferramentas utilizadas.

## 5.1 Sistema especialista baseado em regras

O algoritmo desenvolvido recebe como entrada em um vetor  $u$ , os seguintes dados:

- Temperatura interna do ambiente
- PMV do ambiente
- Temperatura externa
- Direção do vento
- Velocidade do vento

As variáveis armazenadas são utilizadas no processo de tomada de decisão das regras. A elaboração das regras ocorreu de modo interativo, através de reuniões constantes com especialistas em eficiência energética, de modo a otimizar, a cada ciclo de debates, o desempenho do sistema especialista final.

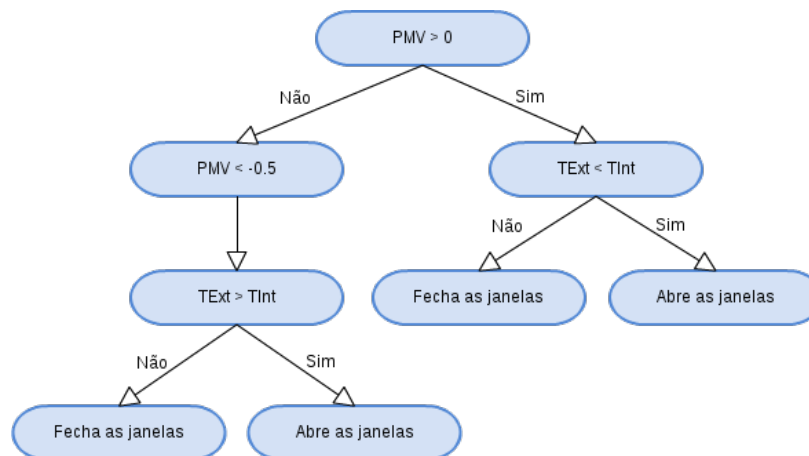


Figura 11: Fluxograma de representação do Sistema Especialista

O fluxograma, demonstrado na Figura 11, apresenta o modo de operação das regras. Em cada cômodo se aplica um fluxo de controle similar para o controle das janelas, alterando apenas seus dados internos (PMV e Temperatura) durante a tomada de decisão.

Os estados das janelas são armazenados em um vetor  $v$ , o qual representa o controle das janelas e é utilizado como saída pelo algoritmo. Os valores do vetor de controle são enviados para aplicação no software de simulação através de uma conexão *socket*. O algoritmo é carregado e executado a cada passo de simulação. O código da implementação encontra-se no Anexo B.

## 5.2 Controle PID

Existe uma quantidade considerável de variações para a fórmula de um controlador PID, entre as quais variam quanto a utilização de diferentes pesos para cada termo. A fórmula utilizada no controle deste trabalho, foi proposta em (FRANKLIN, 1991), e consiste na seguinte expressão:  $V(t) = K_p(1 + 1/(K_i * t) + K_d * t) * E(t) + bias$

Onde,  $V$  representa a variável manipulada,  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  os pesos utilizados,  $t$  o tempo e  $E(t)$  o erro da função tempo. Já o bias consiste apenas em uma variável de correção.

A aplicação da fórmula no controle, acontece da seguinte forma:

- $t$  é o tempo da simulação
- Quando  $V > 0$ , então as janelas são abertas. Caso contrário, são fechadas.
- $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  foram definidos através do método da tentativa e erro, visando uma menor oscilação.
- $E(t)$  é representado pela diferença entre um *setpoint* predefinido e a TInt, no tempo  $t$ . O *setpoint* utilizado nesta implementação é 24.

Por fim, pode-se afirmar que a implementação deste controle é fundamentada, basicamente, por uma boa escolha dos valores das variáveis Proporcional-Integral-Derivativo e de uma escolha admissível para o cálculo do erro.

## 5.3 Controle com Redes Neurais

Para implementação deste controle escolhemos um modelo de rede neural *multilayer perceptron* com algoritmo de aprendizado *backpropagation*, amplamente conhecido na literatura e adequado para a abordagem adotada.

O *multilayer perceptron*, de acordo com o teorema de aproximação universal, descrito em (CYBENKO, 1989), se comporta como um aproximador de funções, o que o qualifica para a construção do controle, visto que, dado um conjunto de entradas ambientais e de estados das aberturas, se deseja mapear um comportamento das aberturas próximo ao ideal em relação ao conforto climático interno.

O algoritmo proposto lê os arquivos contendo a base de treinamento, e realiza o treinamento através da função *newff* disponível no Matlab através da biblioteca *Neural Network Toolbox*. A topologia escolhida consiste em uma camada de entrada com 4 neurônios, 4 camadas ocultas do tipo *tansig*, contendo 30 neurônios cada, e uma camada de saída com 6 neurônios. As entradas são alimentadas com dados climáticos e após a propagação, os novos estados de abertura das janelas são apresentados na camada de saída.

Após o aprendizado ser adquirido, a RN toma uma decisão em relação aos dados contidos no vetor  $u$ , de modo a acionar a abertura ou fechamento das janelas.

### 5.3.1 Base de treinamento

A seleção de dados para o treinamento da rede neural é uma tarefa que requer atenção, pois o sucesso do controle depende, em grande parte, deste processo.

Os dados que formam a base de treinamento foram avaliados por dois grupos de trabalho: especialistas em Eficiência Energética e especialistas em Inteligência Artificial, de modo que foi possível a análise de quais dados climáticos são importantes para a criação do conjunto de treinamento. Durante o processo de seleção devem ser descartadas as variáveis que possam induzir ao erro, como por exemplo, a radiação solar, que durante a noite se fixa no valor 0 (zero) e prejudica o aprendizado da rede neural.

Portanto, após a avaliação climática decidiu-se pela utilização de apenas quatro variáveis climáticas como base de entrada: temperatura externa e interna, velocidade e direção do vento. Estes dados foram escolhidos por estarem diretamente relacionados com a tomada de decisão sobre abrir ou fechar janelas.

O conjunto de treinamento contém, inicialmente, 150 dados extraídos da atuação do Sistema Especialista Baseado em Regras. A Tabela 3 e Tabela 4 mostram, respectivamente, exemplos de entradas e saída da base de treinamento. Os dados ambientais são obtidos durante uma simulação mensal e as saídas são boas decisões para o estado atual. Após o treinamento inicial, a Rede Neural passa a realizar um treinamento online a cada três passos de simulação, ou seja, novos dados de treinamento são adquiridos durante a aplicação da própria Rede Neural.

Tabela 3: Exemplo de entradas para o treinamento

-	TExt	TInt	Direção Vento	Velocidade Vento
Entrada1	29	30	140	3.4
Entrada2	21	16	90	5.1

Tabela 4: Exemplo de saídas para o treinamento

-	JanA	JanB	JanC	JanD	JanE	JanF
Saida1	0	0	1	0	1	1
Saida2	0	0	0	0	0	0

## 5.4 Controle baseado em Lógica Difusa

A definição de conforto térmico envolve diversos fatores que muitas vezes não podem ser analisados e geram um considerável grau de incerteza em uma tomada de decisão. Para isso, recorreremos a Lógica Difusa, que possibilita a modelagem de um sistema que trate de estados indeterminados para o processo de controle dos meios de ventilação.

Para a construção do sistema difuso, foi utilizado o *Fuzzy Logic Toolbox*, disponível no Matlab. Esta ferramenta fornece uma interface amigável para a criação dos conjuntos de entrada e saída, e também fornece recursos para a formulação de regras de inferência.

Para compor a base de dados, foram utilizados o PMV e a variável Diff, a qual consiste na diferença entre TExt (Temperatura externa) e TInt (Temperatura interna). Dessa forma, as entradas são compostas da seguinte forma:

- PMV - Valor do *Predicted Mean Vote* (Voto Estimado Médio)
- Diff - Diferença entre a TExt e a TInt.

A Figura 12 mostra a representação difusa do PMV. É atribuído o quantificador quente quando o PMV está entre 0.5 e 3, já o intervalo de 0.1 e 0.7 descreve um ambiente que ainda não está calor, mas tende a isso. Algo similar é proposto para o frio, onde -0.5 e -3 é considerado frio e o ambiente está com tendência ao frio no intervalo de -0.1 a -0.7. Segundo a função definida, o ambiente está em conforto quando a variável PMV está no intervalo de -0.5 a 0.5. É importante utilizar sobreposições de valores, a fim de possibilitar que o controle trate as incertezas.

Para a variável Diff foram utilizados os quantificadores "Negativo" e "Positivo", o que permite inferir o impacto de uma possível alteração no estado do *output*. Esta quantificação é representado pela Figura 13.

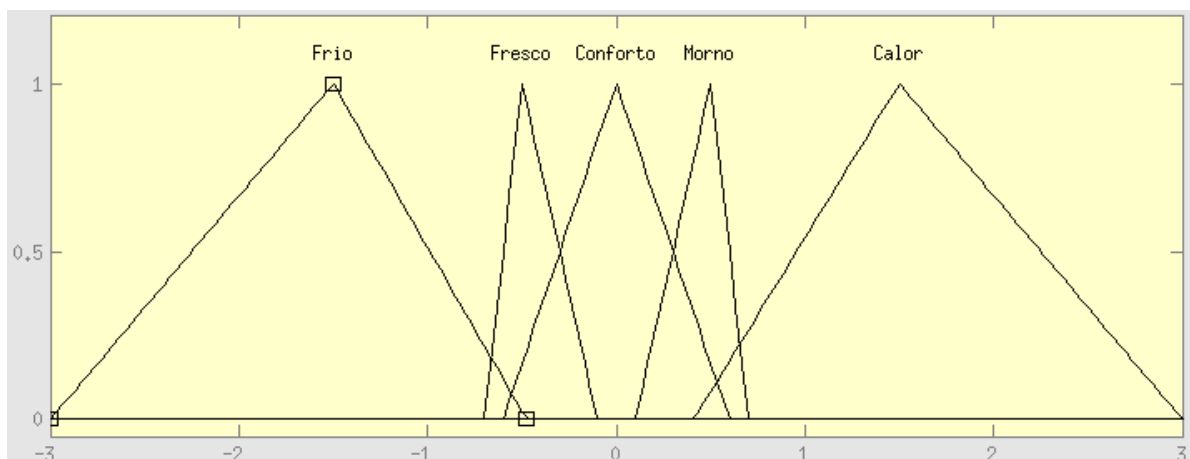


Figura 12: Representação da variável PMV

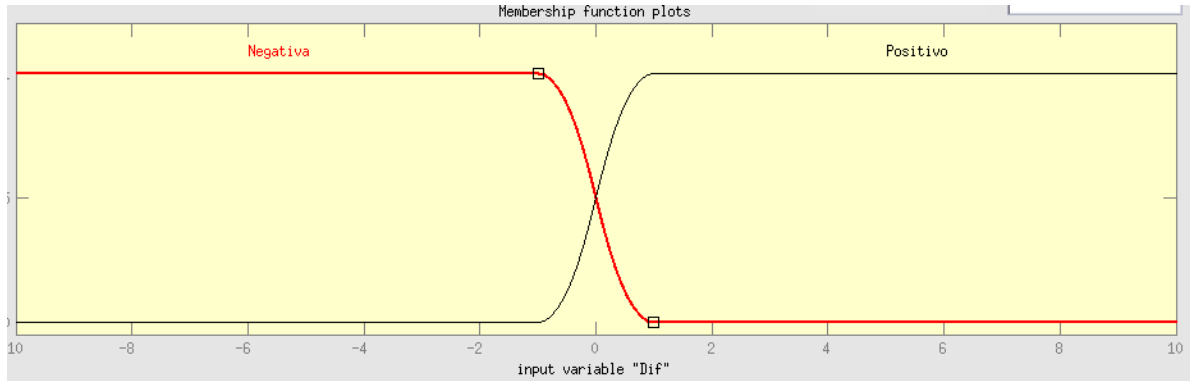


Figura 13: Representação da variável Diff

Com as entradas já fixadas, é realizada a definição da saída que corresponde aos possíveis estados das janelas. A saída possui apenas dois quantificadores, aberto ou fechado, que definem os novos estados das janelas, baseado nos dados de entrada. A Figura 14 representa o modelo de saída.

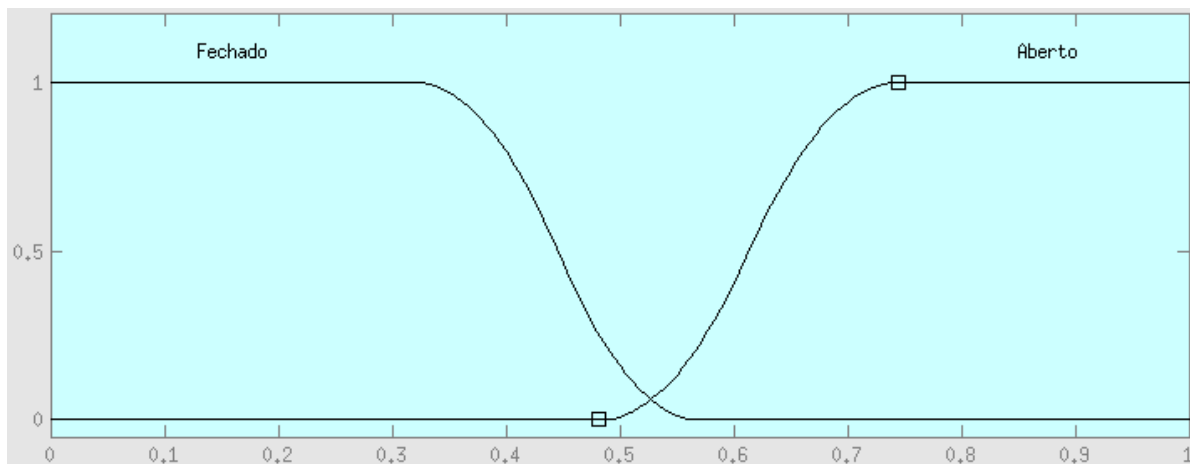


Figura 14: Representação da variável de saída

Após o processo de quantificação, foram definidas as regras de inferência através de comparações entre as entradas. As regras consistem em avaliar a classificação de um conjunto de entrada e atribuir uma saída.

Para a formulação é possível utilizar os operadores lógicos "E", "Ou" e "Implicação". Com isso, as regras definidas são as seguinte:

- Se (PMV é Frio) E (Diff é Positivo) ENTÃO (saída é Aberto)
- Se (PMV é Frio) E (Diff é Negativo) ENTÃO (saída é Fechado)
- Se (PMV é Calor) E (Diff é Positivo) ENTÃO (saída é Fechado)
- Se (PMV é Calor) E (Diff é Negativo) ENTÃO (saída é Aberto)

- Se (PMV é Fresco) E (Diff é Positivo) ENTÃO (saída é Aberto)
- Se (PMV é Fresco) E (Diff é Negativo) ENTÃO (saída é Fechado)
- Se (PMV é Morno) E (Diff é Positivo) ENTÃO (saída é Fechado)
- Se (PMV é Morno) E (Diff é Negativo) ENTÃO (saída é Aberto)

O algoritmo de aplicação da técnica de Lógica Difusa, implementado no Matlab, faz a leitura das regras difusas através do código `fis = readfis('regras')`. A cada *timestep* é enviado as variáveis para o cálculo da saída, através do código `output = evalfis([PMV, Diff], fis)`, o qual retorna o valor do novo estado das janelas.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a discussão dos resultados das diferentes avaliações de desempenho, e também os resultados obtidos com cada controle implementado.

### 6.1 Critérios de Análise

A eficiência de cada uma das abordagens implementadas é avaliada em dois cenários distintos:

- Cenário 1 - Aplicação no mês de Janeiro, com arquivo climático de Santa Maria.
- Cenário 2 - Aplicação do controle no mês de Julho, com arquivo climático de Santa Maria.

Os cenários apresentados, são simulados, independentemente, utilizando um arquivo climático (*WeatherData*) da cidade de Santa Maria, e representam, respectivamente, um mês típico de verão e inverno. Deste modo, é possível realizar uma análise de desempenho em condições climáticas opostas. O Anexo A contém a modelagem da simulação utilizando a interface do BCVTB.

Durante a análise de resultados, foi implementado um controle denominado Simulador. Este controle, de pouca complexidade, se propoe a imitar o comportamento de um usuário operando as janelas, de maneira que a abertura da janela seja feita apenas quando o ocupante sente algum desconforto. Esta implementação tem como objetivo proporcionar o contraste entre um ambiente controlado por uma pessoa sem conhecimento especialista e os controles abordados neste trabalho.

A metodologia definida para analisar o comportamento e o desempenho de cada controle, compreende três categorias:

1. Análise do percentual (%) de horas em conforto térmico.
2. Somatório das diferenças ( $Diff = PMV - Limite$ ), baseado na quantidade de horas em desconforto por frio ou calor, onde:

- PMV representa o valor do Predicted Mean Vote (Voto Médio Estimado) da hora avaliada.
- Limite é o valor limite para um PMV estar em conforto térmico. Este valor pode assumir dois valores na equação: 0.7 para avaliação de calor e -0.7 para avaliar um horário de desconforto por frio.

### 3. Consumo

A análise percentual admite, sempre, como melhor controle, aquele que obter uma maior porcentagem de horas dentro da faixa de conforto térmico. Já a Soma das Diferenças, busca verificar quais controles possuem um maior amortecimento do desconforto, de modo que o somatório seja mínimo.

Para medir os impactos no consumo energético, é utilizado uma nova estratégia para acionamento do ar condicionado, sempre que necessário. Ou seja, um *setpoint* é definido e sempre que a temperatura interna do ambiente ultrapassar este valor, o dispositivo HVAC é acionado para normalizar a situação. Com isso, é possível verificar o consumo do HVAC, que está ativo apenas quando os controles propostos não tem êxito, e apresentar o impacto de cada controle na economia de energia do edifício.

## 6.2 Resultados Sistema Especialista

Como observado no Capítulo 5, o SE é descrito como um conjunto de regras que atua de forma a controlar a abertura e fechamento das janelas, de modo que a maior quantidade de horas se mantenha na faixa de conforto térmico, considerando o valor do PMV na faixa de 0.7 a -0.7.

Os resultados deste controle são bastante satisfatórios, especialmente pela sua implementação intuitiva, que garante a facilidade para adição de novas regras e otimização do controle. A Figura 15 apresenta, em cenários distintos, a porcentagem de horas em situação de conforto térmico.

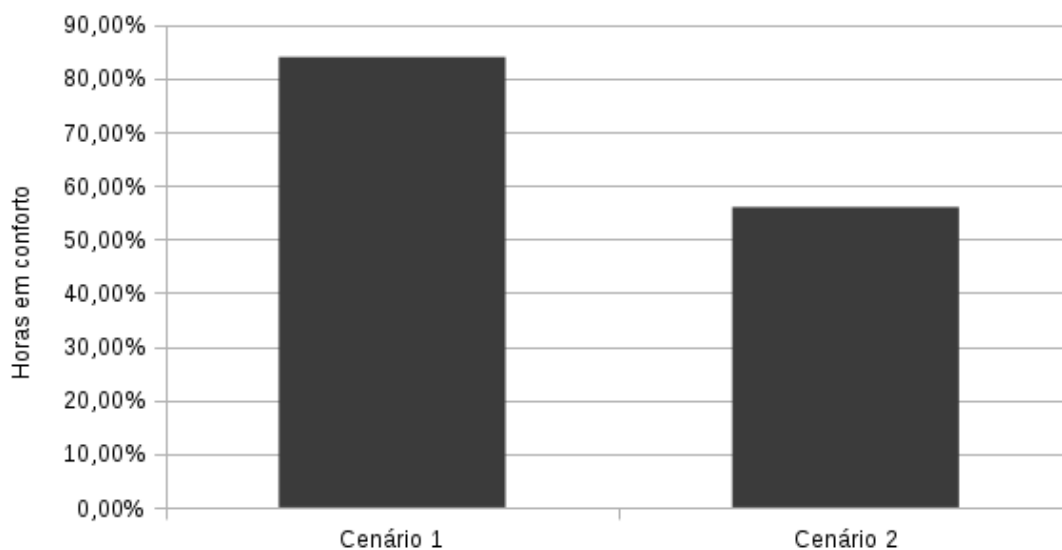


Figura 15: Percentual de horas em conforto do SE

Analisando o gráfico, observamos que o SE garantiu, em conforto, 84% das horas avaliadas no mês típico de verão. Já no mês de Julho, o qual representa o inverno, o desempenho ficou em 56%, porém, este desempenho inferior em Julho será também observado nas outras implementações, já que conservar o calor para aquecer a residência é uma tarefa árdua e prevê o controle de outros recursos arquitetônicos, como por exemplo, os brises.

A Tabela 5 apresenta alguns dados para análise de desempenho. Do total de 744 horas simuladas, 79 horas, do mês de Janeiro, estiveram em desconforto por calor, e apenas 21 horas em desconforto por frio. Os dados SomaCalor e SomaFrio representam, respectivamente, a soma dos valores de PMV que excederam a faixa de conforto.

Tabela 5: Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto

-	Desconforto por Calor	SomaCalor	Desconforto por Frio	SomaFrio
Cenário 1	79 horas	30.51	21 horas	4.99
Cenário 2	-	-	327 horas	230.59

O Sistema Especialista baseado em regras garante uma grande faixa de horas em conforto térmico, e com isso uma ótima taxa de acertos em suas decisões. Pelo baixo valor de SomaCalor e SomaFrio, notamos que mesmo quando os valores do PMV excedem o limite, o controle consegue tomar decisões para amenizar e reverter a situação de desconforto, impedindo que ele se eleve.

### 6.3 Resultados Redes Neurais

A RN foi inicialmente proposta por ser um aproximador universal de funções e pelo seu alto poder de generalização. Este controle possui um desempenho bastante similar ao SE, porém, com o decorrer do tempo, consegue contornar alguns casos críticos através do processo de treinamento contínuo ao qual é submetido. O treinamento da RN é realizado a cada 3 passos da simulação (*timestep*) e converge em aproximadamente 11 épocas.

O Controle baseado em RN atingiu, no Cenário 1, 84% de desempenho, e 58% no Cenário 2. O poder de generalização deste controle, garantiu um comportamento bastante coerente, mantendo um desempenho adequado, mesmo quando exposto a situações críticas. A Figura 16 mostra o percentual de horas em conforto, referente a este controle.

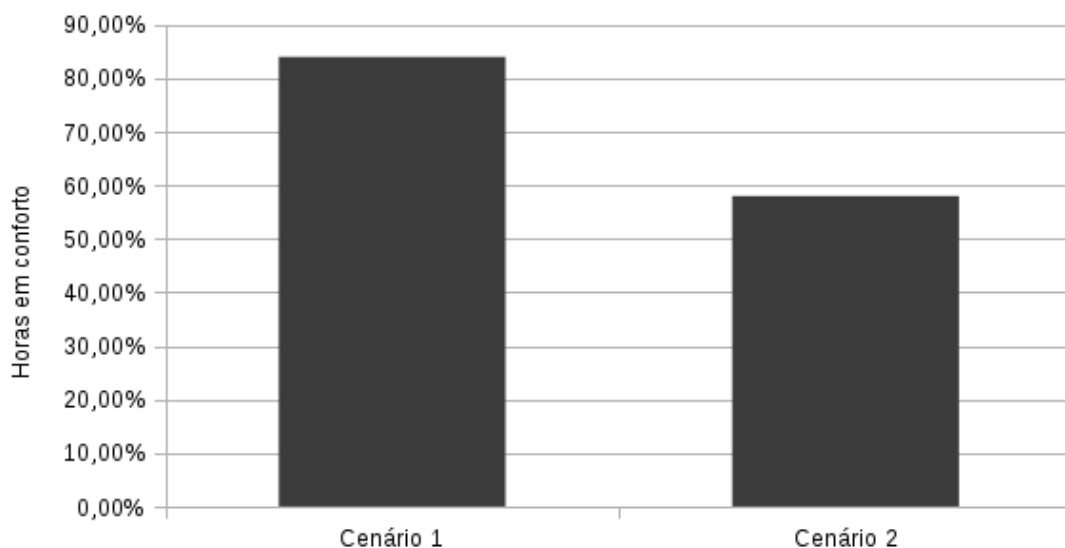


Figura 16: Percentual de horas em conforto do controle baseado em RN

A Tabela 6 apresenta baixos valores de SomaCalor e SomaFrio, mostrando assim, que o controle com RN consegue manter um elevado nível de conforto e também tomar ações para prevenir estados críticos, como por exemplo, dissipar o calor para evitar uma situação que tende a desconforto por calor.

Tabela 6: Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto

-	Desconforto por Calor	SomaCalor	Desconforto por Frio	SomaFrio
Cenário 1	77 horas	28.35	23 horas	4.22
Cenário 2	-	-	312 horas	201.16

O que difere esta abordagem de outras, é a capacidade de aprender com suas próprias ações. Antes de cada tomada de decisão é realizado um novo treinamento, utilizando uma nova base dados, que contém, além dos dados iniciais, informações oriundas das decisões anteriores do controle. Com isso, é possível aprimorar a base de treinamento a cada passo de simulação e propor um controle que se adapte e aprenda consigo mesmo.

## 6.4 Resultados PID

O Controle Proporcional-Integral-Derivativo apresentou a menor quantidade de variações dos estados da janela, o que gerou um desempenho considerado abaixo da média.

Este controle possui uma implementação bastante simples, tendo como maior desafio a definição das variáveis P, I, e D. Na Figura 17 é apresentado o gráfico do percentual de horas em conforto térmico, que mostra 71% para o mês típico de verão e 53% para o inverno.

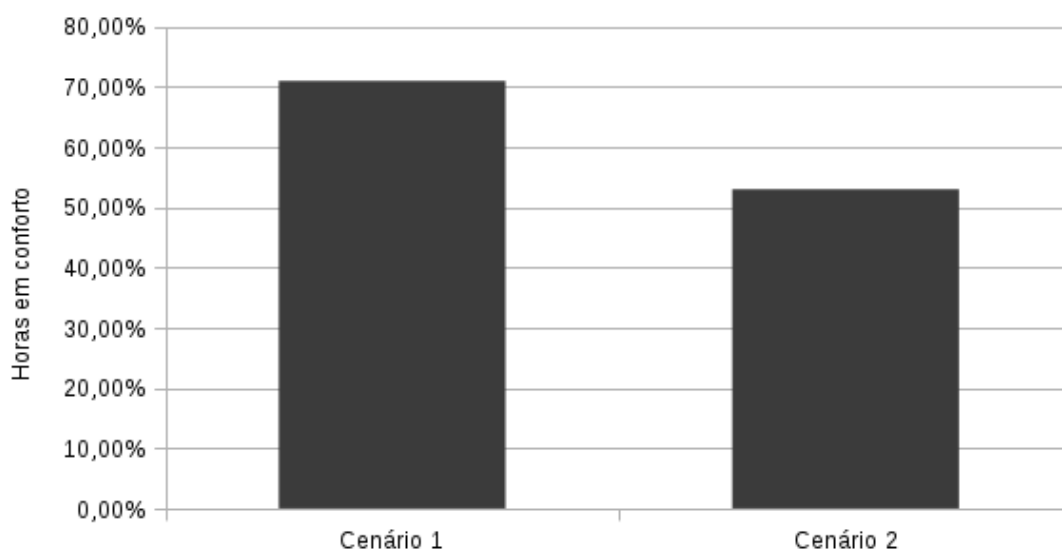


Figura 17: Percentual de horas em conforto do controle PID

A difícil escolha de valores para as variáveis P, I e D para o problema de abertura e fechamento de janelas, se reflexe em um baixo desempenho, quando comparado com os outros controles implementados. A Tabela 7 apresenta alguns dados coletados que representam de forma mais abrangente o desempenho deste controle.

Tabela 7: Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto

-	Desconforto por Calor	SomaCalor	Desconforto por Frio	SomaFrio
Cenário 1	161 horas	98.43	33 horas	6.78
Cenário 2	-	-	230 horas	95.52

Analisando os valores de SomaCalor e SomaFrio, é notável os valores elevados. Este fenômeno se dá devido a demora do tempo de resposta do controle PID, já que a maioria de suas decisões foram tomadas quando o PMV estava em um nível elevado ou crítico, possibilitando assim que situações de desconforto sejam apenas amenizadas, e não prevenidas.

## 6.5 Resultados Lógica Difusa

O Controle utilizando Lógica Difusa foi proposto por possibilitar a representação de situações de imprecisão. Os resultados exibidos na Figura 18 são de 75% para Janeiro e 65% para Julho, o que é surpreendente, já que obteve uma conduta com menor discrepância entre o inverno e verão.

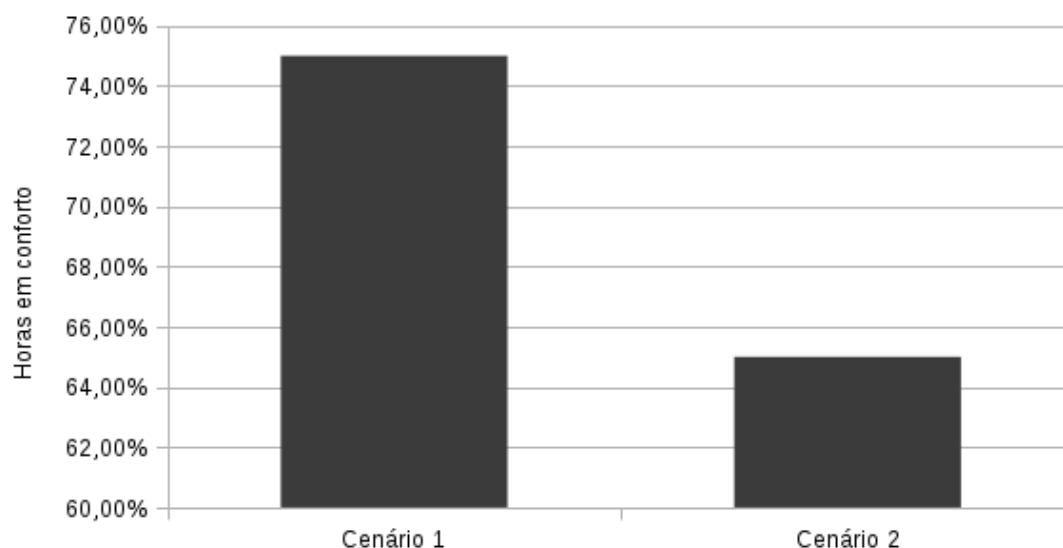


Figura 18: Percentual de horas em conforto do controle com Lógica Difusa

O desempenho superior para o inverno tem o bom gerenciamento do Jardim de Inverno como principal responsável. Este controle foi o que mostrou melhor flexibilidade para acumular calor, quando necessário, e com isso, prover algumas ações não detectadas em outros controles.

Tabela 8: Resultado da Soma das Diferenças e horas em desconforto

-	Desconforto por Calor	SomaCalor	Desconforto por Frio	SomaFrio
Cenário 1	158 horas	82.63	13 horas	2.32
Cenário 2	-	-	216 horas	81.33

Observando a Tabela 8, podemos inferir que o bom desempenho no inverno, gerou reflexos negativos no verão. O fato do controle tender a acumular calor no Jardim de Inverno, fez com que o SomaCalor atingisse valores elevados, enquanto o SomaFrio apresenta um resultado bastante interessante. Podemos considerar este controle como um dos mais promissores, já que desde sua concepção, ele apresenta características interessantes para desempenhar o papel de um usuário especialista.

## 6.6 Avaliação e Discussão

Nesta seção, os resultados apresentados serão comparados e discutidos, buscando inferir sobre a melhor abordagem.

### 6.6.1 Cenário 1

Os resultados comparados são consequência da aplicação independente de cada um dos controles, em um mês de Janeiro na cidade de Santa Maria-RS. A Figura 19 apresenta os resultados, para fins de comparação, do desempenho de horas em conforto (em percentual) dos controles implementados.

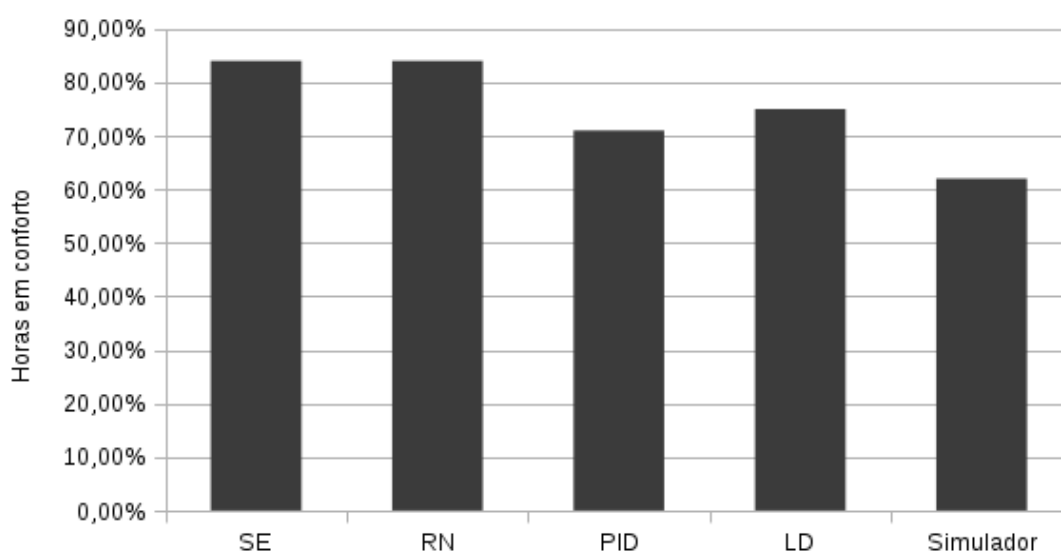


Figura 19: Percentual de horas em conforto dos controles no Verão

Analisando este gráfico, inferimos que o SE e as RN obtiveram os melhores resultados neste cenário. A Lógica Difusa garantiu um desempenho considerado aceitável, já o PID ficou abaixo das expectativas, superando apenas o controle de janelas de um usuário fictício, representado pelo Simulador. A Tabela 9 possui informações importantes para uma melhor análise do desempenho individual dos controles.

Tabela 9: Comparação Soma das Diferenças e horas em desconforto

-	Desconforto por Calor	SomaCalor	Desconforto por Frio	SomaFrio
SE	79 horas	30.51	21 horas	4.99
RN	77 horas	28.35	23 horas	4.22
PID	161 horas	98.43	33 horas	6.78
LD	158 horas	82.63	13 horas	2.32
Simulador	248 horas	99.2	34 horas	5.88

Pode-se concluir que a RN obteve um melhor desempenho em relação aos outros controles. Os valores da Soma das Diferenças mostra que a RN apresentou valores abaixo da média, isto nos permite supor que este controle suavizou os picos de desconforto e projetou melhores decisões para situações críticas. O SE obteve um excelente desempenho, sendo levemente superado apenas pelo poder de generalização e aprendizado da RN. O Controle PID apresentou um considerável atraso para detectar situações de desconforto, e com isso tem sua avaliação classificada como ruim. É notável características promissoras na LD, principalmente em seu desempenho para situações de frio.

### 6.6.2 Cenário 2

A avaliação dos controles, neste cenário, representa o gerenciamento dos meios passivos de ventilação em um mês típico de inverno. A Figura 20 apresenta o desempenho, em percentual, das horas em conforto. Já a Tabela 10, contém critérios mais relevantes para a análise do melhor controle.

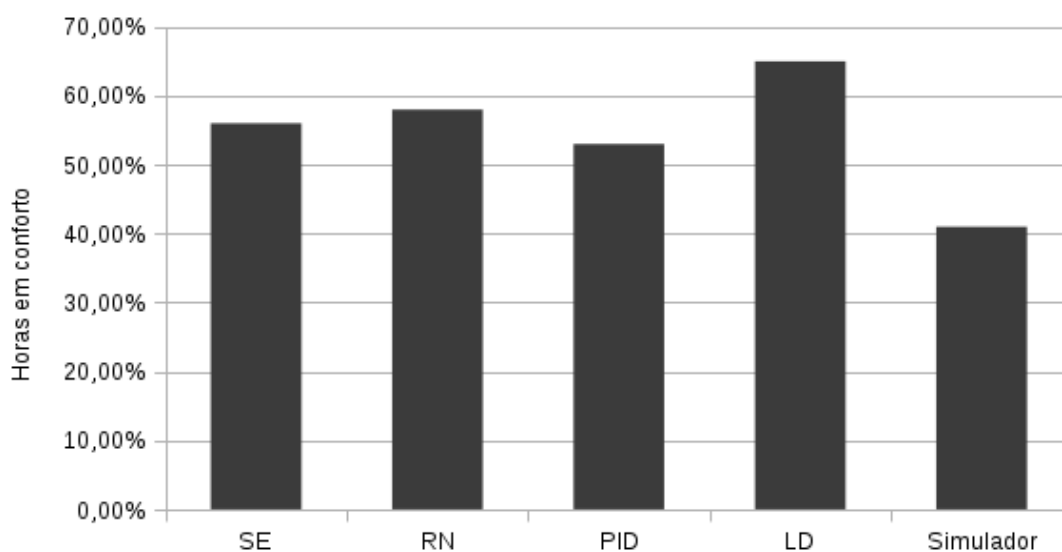


Figura 20: Percentual de horas em conforto dos controles no Inverno

As RN e o SE mantiveram um bom desempenho neste cenário, porém, foram superados pela LD. Este surpreendente desempenho da LD mostra que este controle possui um melhor gerenciamento do Jardim de Inverno, de modo que o calor é conservado e utilizado para aquecer os outros ambientes, característica esta não tão visível nos outros controles. Esta tendência para conservar o calor, torna o controle muito bom para um cenário de inverno, mas ocasiona algumas situações de desconforto por calor quando exposto a um mês de calor.

Tabela 10: Comparação Soma das Diferenças e horas em desconforto

-	Desconforto por Calor	SomaCalor	Desconforto por Frio	SomaFrio
SE	-	-	327 horas	230.59
RN	-	-	312 horas	201.16
PID	-	-	230 horas	95.52
LD	-	-	216 horas	81.33
Simulador	8	1.2	428	280.88

É nítido o desempenho superior da LD, que se dá pelo fato de ocorrer menor dissipação de calor, o que ocasiona um menor desconforto por frio. O Controle PID também teve um resultado interessante, devido ser o controle que realiza operações de abertura e fechamento com menos intensidade, garante que ocorra menor troca de calor entre os ambientes e com isso, um bom valor para a variável SomaFrio.

Os Controles com RN e o SE conseguem prever algumas situações de desconforto por frio, porém, não possuem muito calor armazenado nos ambientes para tentar solucionar este desconforto. Esta ausência se dá pelo fato destes dois controles serem os

que mais variam os estados das janelas, sempre buscando manter o PMV equilibrado, porém, em situações de frio, concluímos que é mais interessante efetuar menos ações de aberturas.

## 6.7 Consumo

Para analisar o consumo, foi realizada a simulação de um ano inteiro, de modo que o impacto dos controles seja melhor percebido. O consumo do HVAC, que é ativado em situações não resolvidas pelo gerenciamento dos meios passivos de ventilação, é medido em kWh. Este ar condicionado é utilizado apenas para este cenário de avaliação e tem seus *setpoints* definidos em 18 e 26 graus celsius. Ou seja, sempre que as estão acima de 26 graus ou menor que 18 graus, ele é ativado para normalizar o ambiente.

A Figura 21 apresenta o consumo da edificação com a aplicação, durante um ano inteiro, de cada controle proposto.

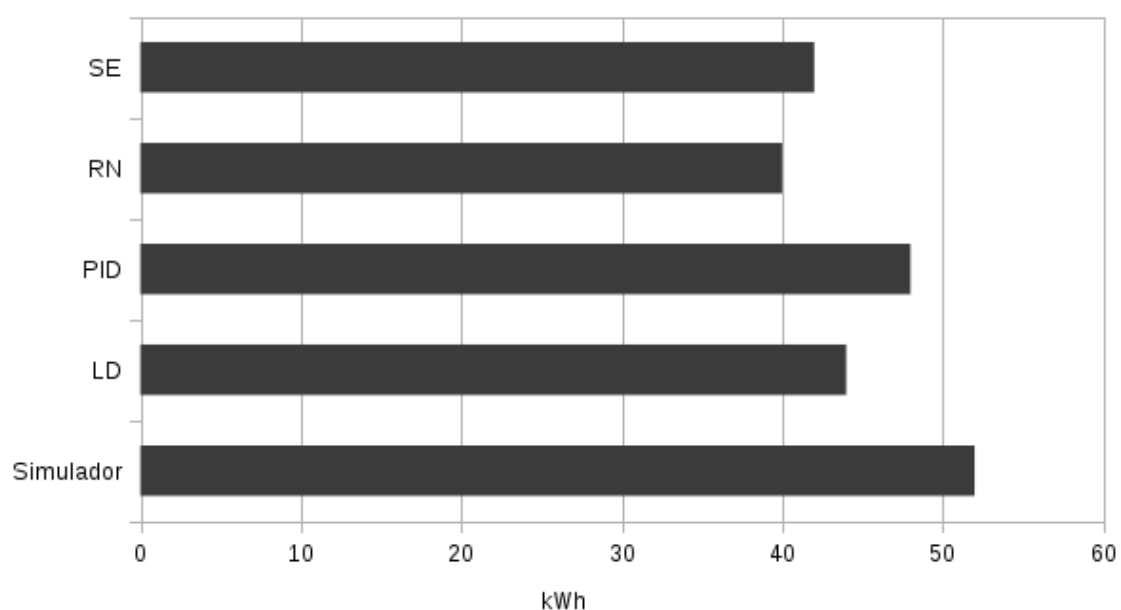


Figura 21: Consumo devido ao acionamento do HVAC durante a aplicação de cada controle

O SE e as RN tiveram o melhor desempenho também em termos de consumo. Baseado neste gráfico, podemos notar o impacto do acionamento das janelas no consumo energético de um meio artificial de climatização. Com isso, é visível que a utilização dos recursos naturais oferecidos pelo ambiente resulta em benefícios econômicos e ambientais.

## 7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado uma nova abordagem para simulações computacionais. Esta abordagem possibilita a implementação de projetos mais complexos na área de simulação energética, além de ampliar a capacidade dos recursos já utilizados. Baseado nesta abordagem, foram propostos quatro tipos de controles inteligentes para uma edificação sustentável, visando a otimização dos meios passivos de ventilação disponíveis no projeto arquitetônico.

A implementação do Controle com Redes Neurais obteve o melhor desempenho para um cenário de verão. Já o Controle baseado em Lógica Difusa foi o mais promissor para o inverno. No geral, o Controle com Redes Neurais, juntamente com o Sistema Especialista baseado em Regras, obtiveram os melhores resultados, tanto de conforto térmico, quanto em ganhos energéticos.

Cada uma das técnicas implementadas, proporcionou um comportamento diferente e oscilou entre erros e acertos, com isso, é clara a dificuldade de criar um controle genérico. Surge assim, a necessidade de revisar as implementações propostas e extrair suas peculiaridades, de modo a criar um controle com maior alcance.

Este trabalho viabiliza um novo caminho para as pesquisa na área, garantindo que as simulações sejam mais dinâmicas e concluindo que a aplicação de técnicas de inteligência artificial para o gerenciamento de eficiência energética é uma opção interessante e pode ter seus domínios de atuação ampliados.

### 7.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros pretende-se a elaboração de um controle híbrido, que contenha as melhores características de cada controle visto neste trabalho.

Prevemos também a elaboração de um software que reduza a curva de aprendizado presente na utilização do Building Control Virtual Test Bed, e possibilite que engenheiros e arquitetos criem seus próprios controles de forma amigável.

Por fim, é esperado que o melhor controle seja protipado a nível de hardware, e tenha uma aplicação em um edifício real, para fins educacionais, a ser construído após

a obtenção de recursos monetários.

## REFERÊNCIAS

ARAUJO, M. A. A moderna construção sustentável. **IDHEA - Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica**, [S.l.], 1996.

CRAWLEY. Contrasting the Capabilites of Building Energy Performance Simulation Programs. **U.S. Department of Energy - Building Energy Software Tools Directory**, [S.l.], 2005.

CUNHA, E. G. **Introdução á Simulação Computacional**. Material de aula.

CYBENKO, G. Approximation by Superpositions of Sigmoidal Function. **Math. Control Signals Systems**, [S.l.], 1989.

DOUNIS, A. **Design of a fuzzy system for living space thermal-comfort regulation**.

FANGER, P. **Thermal Comfort**. [S.l.]: McGraw Hill Book Company, 1970.

FEIGENBAUM E.; BUCHANAN, B. L. J. On generality and problem solving: a case study using the dendral program. **MACHINE INTELLIGENCE, Edinburgh University Press**, [S.l.], 1971.

FLORES, C. D. **Fundamentos dos Sistemas Especialistas**. [S.l.]: PortoAlegre: Bookman, 2003.

FRANCO, M. F. Automação e controle de simulações energéticas utilizando o BCVTB. **XXI CIC**, [S.l.], 2012.

FRANKLIN, G. **Feedback Control of Dynamic Systems**. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing, 1991.

FREITAS FILHO, P. J. de. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. [S.l.]: Visual Books Ltda, 2008.

GAO, J. Machine Learning Applications for Data Center Optimization. **Google**, [S.l.], 2014.

- HAYKIN, S. **Neural Networks**. [S.l.]: Macmillan, 2001.
- MARTINS, D. Ensaio sobre a utilização da automação de aberturas na simulação do desempenho térmico de edificações. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, [S.l.], 2009.
- MATHWORKS. . R2014a.ed. Natick-MA: [s.n.], 2014.
- MCCARTHY, J. What is Artificial Intelligence. **Computer Science Department - Stanford University**, [S.l.], 2000.
- MEDEVEDOVSKI, E. **Técnicas de Inteligência Artificial aplicadas a um dispositivo de aquecimento natural para ambientes**. Pelotas/RS: [s.n.], 2010.
- MELO, A. P.; SIMON, F. **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus**. Florianópolis-SC: [s.n.], 2009.
- OLIVEIRA MONTEIRO, A. C. de. **A Arquitetura Bioclimática**. 2012. Dissertação de Mestrado — FTUC.
- OTECWEB. **Consultoria em Eficiência Energética e Sustentabilidade**. Acessado em 30 de maio de 2014, <http://otecweb.com>.
- PANG, X. Real-time building energy simulation using EnergyPlus and The Building Controls Virtual Test Bed. **12th Conference of International Building Performance Simulation Association**, [S.l.], 2011.
- PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets**. [S.l.]: The MIT Press, 2000.
- PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing**. [S.l.]: The MIT Press, 2007.
- Pieter-Jan Hoes and Roel Loonen. Performance prediction of advanced building controls in the design phase using ESP-r, BCVTB and Matlab. **Clima 2013 : 11th REHVA World Congress**, [S.l.], 2013.
- PITTA, G. a. Advanced topics in Bioclimatology to building design, regarding environmental comfort. **PPGEC-UFSC**, [S.l.], 1994.
- POUEY, J. **Projeto de Edificação Residencial Unifamiliar para a Zona Bioclimática 2 com Avaliação Termo Energética por Simulação Computacional**. 2011. Dissertação de Mestrado — PPGA/UFPEL, Pelotas/RS.
- R. LAMBERTS, L. D. **Eficiência Energética na Arquitetura**. [S.l.]: Ed. ProLivros, 2001.

RABUSKE, R. A. **Inteligência Artificial**. [S.I.]: DAUFSC, 1995.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial - (3. ed.)**. [S.I.]: Elsevier Editora, 2013.

SGARBI, J. **Domótica Inteligente**: Automação Residencial baseada em Comportamento. 2007. Dissertação de Mestrado — FEI, São Bernardo do Campo/SP.

TORRES, J. L.; MARTIN, M. L. **Adaptive Control of Thermal Comfort Using Neural Networks**.

WETTER, M. Co-Simulation of Building Energy and Control Systems with the Building Controls Virtual Test Bed. **Lawrence Berkeley National Laboratory**, [S.I.], 2011.

ZADEH, L. Fuzzy Sets. **Information and Control**, [S.I.], 1965.

## ANEXO A MODELAGEM DA SIMULAÇÃO NA INTERFACE DO BCVTB

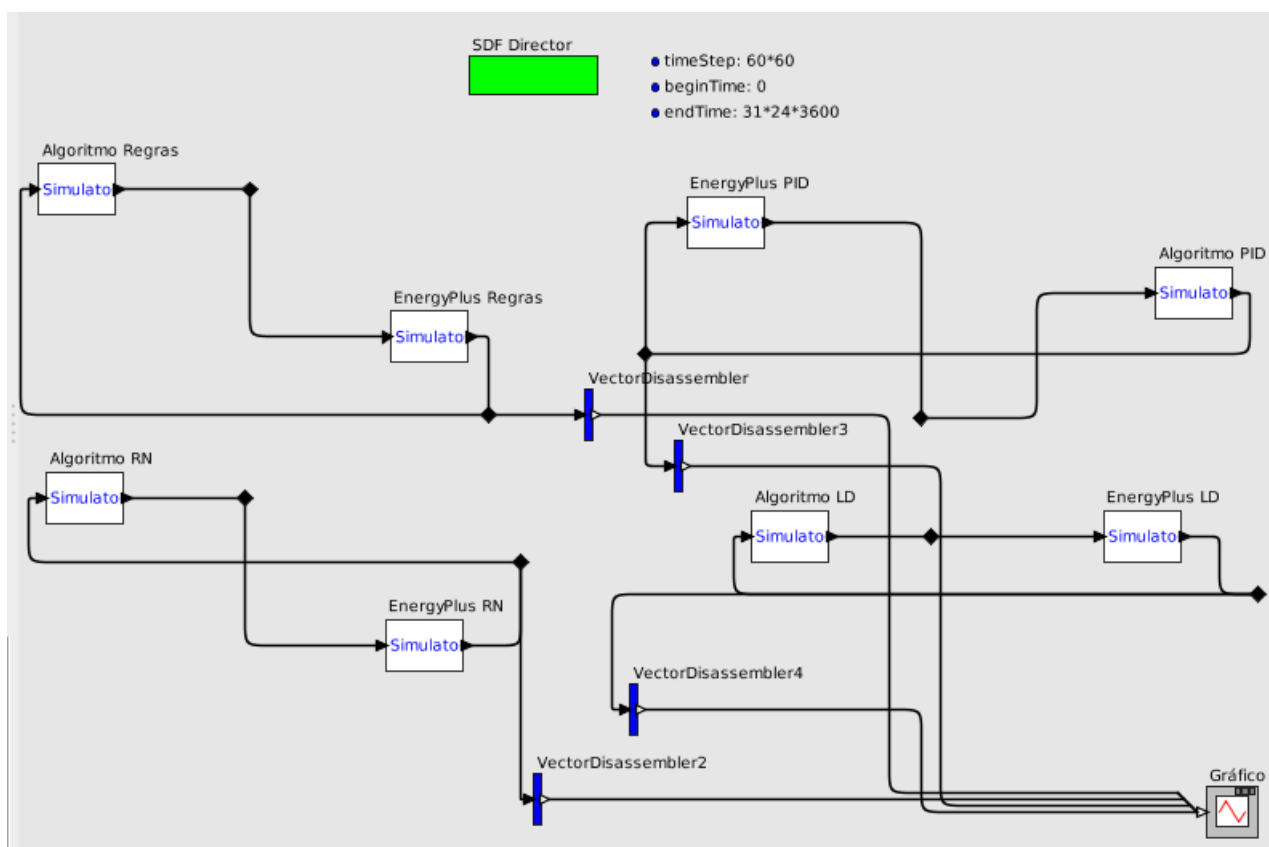


Figura 22: Modelagem da simulação na interface do BCVTB

## ANEXO B CÓDIGO DO SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM REGRAS

```
% Initialize model variables
delTim    = 60*60; % time step
TIni     = 10;
tau      = 2*3600;
Q0Hea   = 100;
UA      = Q0Hea / 20;
TOut    = 5;
C       = [tau*UA 2*tau*UA];
Controle = [0 0 0 0 0 0];
u       = [0 0 0 0 0 0 0 0];
% Initialize flags
retVal   = 0;
flaWri   = 0;
flaRea   = 0;
simTimWri = 0;
simTimRea = 0;

% Add path to BCVTB matlab libraries
addpath( strcat(getenv('BCVTB_HOME'), '/lib/matlab'));

% Establish the socket connection
sockfd = establishClientSocket('socket.cfg');
if sockfd < 0
    fprintf('Error: Failed to obtain socket file descriptor. sockfd=%d.\n',
           sockfd);
    exit;
```

**end**

*% Loop for simulation time steps.*

simulate=true;

**while** (simulate)

*% Assign values to be exchanged.*

try

[retVal, flaRea, simuTimRea, u ] = ...

exchangeDoublesWithSocket(sockfd, flaWri, **length**(u), simTimWri,  
Controle);

catch ME1

*% exchangeDoublesWithSocket had an error. Terminate the connection*

**disp**([ 'Error: ', ME1.message])

sendClientError(sockfd, -1);

closeIPC(sockfd);

rethrow(ME1);

**end**

*% Check return flags*

**if** (flaRea == 1) *% End of simulation*

**disp**('Matlab received end of simulation flag from BCVTB. Exit simul

closeIPC(sockfd);

simulate=false;

**end**

**if** (retVal < 0) *% Error during data exchange*

**fprintf**('Error: exchangeDoublesWithSocket has return value %d', ret

sendClientError(sockfd, -1);

closeIPC(sockfd);

simulate=false;

**end**

**if** (flaRea > 1) *% BCVTB requests termination due to an error.*

**fprintf**('Error: BCVTB requested termination of the simulation by se  
retVal);

sendClientError(sockfd, -1);

closeIPC(sockfd);

simulate=false;

**end**

```

% No flags have been found that require termination of the
% simulation.
% Having obtained  $u_k$ , we compute the new state  $x_{k+1} = f(u_k)$ 
% This is the actual simulation of the client.
if (simulate)

    % Controle sala-cozinha-mesanino INVERNO
    if u(3) > u(2)
        if u(1) < 0.5
            Controle(3) = 1;
            Controle(4) = 1;
        end
    else
        Controle(3) = 0;
        Controle(4) = 0;
    end

    if u(3) > u(7)
        if u(8) < 0.5
            Controle(5) = 1;
            Controle(6) = 1;
        end
    else
        Controle(5) = 0;
        Controle(6) = 0;
    end

    % Controle sala-cozinha
    if u(1) > 0
        if u(3) < u(2)
            Controle(4) = 1;
            Controle(3) = 1;
        end
        if u(3) > u(2)
            Controle(4) = 0;
            Controle(3) = 0;
        end
    end
end

```

```
if u(1) < -0.5
    if u(3) > u(2)
        Controle(4) = 1;
        Controle(3) = 1;
    end
    if u(3) < u(2)
        Controle(4) = 0;
        Controle(3) = 0;
    end
end
```

*%Controle mesanino*

```
if u(8) < -0.5
    if u(3) > u(7)
        Controle(5) = 1;
        Controle(6) = 1;
    end

    if u(3) < u(7)
        Controle(5) = 0;
        Controle(6) = 0;
    end
end
```

```
if u(8) > 0
    if u(3) < u(7)
        Controle(5) = 1;
        Controle(6) = 1;
    end
    if u(3) > u(7)
        Controle(5) = 0;
        Controle(6) = 0;
    end
end
```

*%Controle Jardim de Inverno INTERNA*

```
if u(6) > u(2)
```

```
        if u(1) < 0
            Controle(1) = 1;
        end
        if u(1) > 0
            Controle(1) = 0;
        end
    end

    if u(6) < u(2)
        if u(1) > 0.7
            Controle(1) = 1;
        else
            Controle(1) = 0;
        end
    end

    fid = fopen('pmv.txt','a');
    fprintf(fid, '%f|', u(1));
    fclose(fid);

    simTimWri = simTimWri + delTim;
end
exit
```

## **ANEXO C PUBLICAÇÕES DURANTE A GRADUAÇÃO**

1. FRANCO, M. F. ; FERRUGEM, A. P. ; SILVA, A. C. . Redes neurais aplicada na automação de uma residência energeticamente eficiente. In: CIC, 2011, Pelotas. Exatas e da Terra, 2011.
2. FRANCO, M. F. ; FERRUGEM, A. P. ; SILVA, A. C. S. B. . Redes neurais aplicada na automação de uma residência energeticamente eficiente. In: II SPC - Seminário de Pesquisa em Computação, 2011, Pelotas.
3. FRANCO, M. F. ; FERRUGEM, A. P. ; SILVA, A. C. S. B. . Automação e controle de simulações utilizando o BCVTB. In: 21<sup>o</sup> CIC, 2012, Pelotas. Engenharias, 2012.
4. MURIEL, F. FRANCO. ; ANDERSON, P. FERRUGEM. ; CÉSAR, B. SILVEIRA. ANTÔNIO . REDES NEURAS APLICADA NA AUTOMACÃO DE UMA RESIDÊNCIA ENERGETICAMENTE EFICIENTE. In: 10th World Congress on Computational Mechanics, 2014. v. 1. p. 1395.
5. FRANCO, M. F. ; FERRUGEM, A. P. ; SILVA, A. C. S. B. . Arquitetura Computacional Bioclimatica: Seleção de dados para Redes Neurais. In: XXII CIC, 2013, Pelotas. Ciências Exatas e da Terra, 2013.
6. FERRUGEM, A. P. ; SILVA, A. C. . Green Building: Uma abordagem inteligente para adaptação ambiental. In: XXIII CIC, 2014, Pelotas. Ciências Exatas e da Terra, 2014.
7. Prêmio Destaque, CIC 2012, Grande área: Engenharias

**Arquitetura Computacional para Controle Bio-climático: Uma Abordagem Baseada em Sistemas Inteligentes – Muriel Figueredo Franco**

