

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME GARBOSSA PASTRE

**SENSOR VIRTUAL BASEADO EM REGRESSÃO POR
SVM PARA CARACTERIZAÇÃO DE TEMPERATURA
AMBIENTE EM AR-CONDICIONADO AUTOMOTIVO**

Porto Alegre
2021

GUILHERME GARBOSSA PASTRE

**SENSOR VIRTUAL BASEADO EM REGRESSÃO POR
SVM PARA CARACTERIZAÇÃO DE TEMPERATURA
AMBIENTE EM AR-CONDICIONADO AUTOMOTIVO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação - Instrumentação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Porto Alegre
2021

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Garbossa Pastre, Guilherme

Sensor Virtual Baseado em Regressão por SVM para Caracterização de Temperatura Ambiente em Ar-Condicionado Automotivo / Guilherme Garbossa Pastre. – Porto Alegre: PPGEE da UFRGS, 2021.

17 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2021. Orientador: Alexandre Balbinot.

1. Sensor Virtual, Máquinas de Vetores de Suporte, Conforto Térmico, Eficiência Energética. I. Balbinot, Alexandre. II. Título.

GUILHERME GARBOSSA PASTRE

**SENSOR VIRTUAL BASEADO EM REGRESSÃO POR
SVM PARA CARACTERIZAÇÃO DE TEMPERATURA
AMBIENTE EM AR-CONDICIONADO AUTOMOTIVO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica e aprovada em sua forma final pelo
Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, UFRGS
Doutor pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon – Lyon,
França

Prof. Dr. Tiago Oliveira Weber, UFRGS
Doutor pela Universidade de São Paulo – São Paulo, Brasil

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____
Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner.

Porto Alegre, Março de 2021.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização do trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Balbinot pela confiança em abrir as portas do IEE&Bio e pela mentoria durante toda a realização do trabalho.

Aos colegas Eduardo Neumann, Matheus Oliveira e Vinícius Cene pela troca de ideias e pelos breves, porém importantes, momentos de convívio durante essa etapa.

À Valeo Climatização do Brasil pela compreensão, confiança e aposta na ideia de estudo além da disponibilização de sua estrutura, equipamentos e corpo técnico.

Aos colegas e excelentes profissionais que auxiliaram em temas relativos ao trabalho Ademir Silva, Frederico Acauan, Rafael Pedroni e Rodrigo Comin.

*“We live in a society exquisitely dependent on science and technology, in which
hardly anyone knows anything about science and technology.”*

Carl Sagan

RESUMO

É proposto nesse trabalho o desenvolvimento de um sensor virtual para realizar a caracterização da temperatura ambiente em aparelhos de ar-condicionado automotivo aplicado em ônibus elétricos quando este está operando sob condições de falha do sensor físico. Utilizando outros sensores presentes no sistema que mensuram dados de temperatura e pressão em diferentes pontos é proposto o uso de Regressão por Máquina de Vetor de Suporte para aproximar o valor do sensor de temperatura ambiente, permitindo que o sistema mantenha a operação em modo automático até que o sensor físico possa ser substituído, visando manter as características de conforto térmico e de consumo de energia. Para tanto foram realizados ensaios e aquisição de dados para treinamento do modelo de regressão e validação que totalizam cerca de 64h de operação em diferentes condições ambientais a partir dos quais obtém-se os modelos de regressão que são integrados no sistema de controle visando manter a operação. Como resultado obteve-se um modelo de regressão capaz de estimar a temperatura ambiente do sistema com erro médio quadrático de $1,3^{\circ}C^2$, erro médio absoluto percentual de 3,6% e coeficiente de correlação de 0,90. Esses resultados possibilitam manter a operação do aparelho de ar-condicionado em modo automático com capacidade de buscar características de conforto térmico e consumo de energia mesmo sob condição de falha no sensor físico. O sistema operando com o sensor virtual manteve uma temperatura ambiente média de $22,1^{\circ}C$ e $26,0^{\circ}C$ quando a temperatura objetivo foi regulada em $22^{\circ}C$ e $26^{\circ}C$ respectivamente, além de reduzir o consumo de energia em ao menos 15% em comparação com o modo de operação manual.

Palavras-chave: Sensor Virtual, Máquinas de Vetores de Suporte, Conforto Térmico, Eficiência Energética.

ABSTRACT

This work presents the design and application of a virtual sensor used in case of failure of the main physical sensor for temperature readings in automotive air conditioning applied to electrical buses. Using auxiliary temperature and pressure physical sensors combined with Support Vector Machine (SVM) Regression, the model of the virtual sensor is derived and prepared to be used as a redundant sensor until the broken physical sensor maintenance. Enabling the system to operate continuously and maintaining the original power and thermal comfort features until the physical sensor replacement. In total, 64 hours of training and test data involving different environmental conditions were used to generate the model that was further integrated and about 15 hours of validation data were used to evaluate the model performance. The designed virtual sensor presented a Mean Square Error (MSE) of $1,3^{\circ}C^2$, a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 3,6%, and a Pearson Correlation Coefficient of 0,90 when integrated with HVAC control system. The results allows the continuous and autonomous operation of the air conditioning plant respecting the designed thermal comfort guidelines and energy consumption even when under the physical sensor failure condition reaching a mean room temperature of $22,1^{\circ}C$ and $26,0^{\circ}C$ when the objective temperature is $22^{\circ}C$ and $26^{\circ}C$ respectively, in addition to reducing energy consumption by at least 15% compared to manual operating mode.

Keywords: Soft Sensor, Support Vector Machine, Thermal Comfort, Energy Efficiency.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	13
2	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

1 INTRODUÇÃO

O surgimento de sistemas de climatização tem como data inicial o ano de 1902, quando Willis Carrier inventou o então considerado primeiro ar-condicionado elétrico moderno. A partir desse momento, sistemas de climatização tornaram-se objeto de estudo multidisciplinar, reunindo diversos ramos da ciência com interesse das áreas de física, química, mecânica e elétrica (SUGARMAN, 2007).

Com o passar dos anos esses sistemas tornaram-se largamente utilizados em diversas áreas e aplicações, estando presentes em praticamente todo o tipo de ambiente frequentado por pessoas como escritórios, shoppings, restaurantes, residências e automóveis visando aumentar o conforto e por consequência o chamado bem-estar. Também são utilizados em aplicações técnicas específicas como frigoríficos, ambientes controlados fabris, usinas de geração de energia, hospitais, *data-centers* dentre outras.

Devido a este cenário a busca por técnicas para aumentar o conforto térmico consumindo a menor quantidade possível de energia, aumentando a eficiência viraram foco de estudo da área industrial e acadêmica. Nesse âmbito, técnicas avançadas de instrumentação inteligente podem ser utilizadas com diversos objetivos. Alinhando o conhecimento secular de sistemas de climatização com aquisição de dados, processos estatísticos e técnicas de aprendizado de máquina é possível realizar novos desenvolvimentos como diferentes possibilidades de controle, sistemas de predição e correção de falhas ou sensores, sistemas de telemetria e diagnóstico, dentre outros (AHMAD *et al.*, 2016).

1.1 Justificativa

Estudos realizados em diversas regiões do mundo constataam que os sistemas de climatização são um dos maiores consumidores de energia seja em ambientes comerciais, residenciais ou de transporte correspondendo por no mínimo a 40% do consumo de energia mundial (THANAYANKIZIL *et al.*, 2012; VAKILOROAYA *et al.*, 2014; AHMAD *et al.*, 2016).

Se considerados apenas os dados de sistemas de climatização automotiva, em veículos a combustão o consumo anual de combustível para suprir a demanda energética desses sistemas chega a atingir 27 bilhões de litros de gasolina por ano nos Estados Unidos (JOHNSON, 2002).

Em contrapartida ao consumo de energia dos sistemas está o conforto térmico dos passageiros, seja para veículos pequenos ou para veículos maiores de transporte de massa como ônibus e metrô. Em ambos os casos a melhor maneira de realizar o balanço entre energia consumida e conforto térmico é o uso de controle automático do ar-condicionado (MUSAT; HELEREA, 2009).

Para os veículos de transporte de passageiros, os sistemas de climatização deixam de ser apenas um opcional para aumentar o conforto e tornam-se, em algumas situações, sistemas indispensáveis para a operação, seja por requerimentos legais, concorrência de mercado, segurança ou mesmo características físicas da arquitetura da carroceria. Requisitos legais são aplicados em alguns municípios como São Paulo, onde é obrigatório a um percentual da frota de ônibus urbanos a presença de equipamento de ar-condicionado e que este opere em uma condição de temperatura predefinida fixa (SÃO PAULO, 2016). No caso de ônibus para aplicação rodoviária, o aparelho de ar-condicionado é indispensável para manter o conforto dos passageiros durante viagens que podem ser de longas distâncias e durações, além disso, grande parte dos modelos de ônibus rodoviário possuem as janelas seladas impossibilitando a operação sem climatização (MARCOPOLLO, 2019).

Considerando que os sistemas de climatização são susceptíveis a falhas como qualquer outro sistema e devido aos requerimentos expostos anteriormente é perceptível a importância do correto funcionamento do aparelho de ar-condicionado. Dependendo o modo de falha no sistema é necessário parar a operação para que a correta manutenção seja realizada, porém a grande incidência desses casos ocorre

durante a operação e realizar manutenção nessas situações é oneroso. Existem diferentes modos de falha em um sistema de climatização, sendo elas caracterizadas como falhas operacionais ou falhas de segurança. Se a ocorrência não for crítica e não impactar na segurança do sistema de climatização ou do veículo, como é o caso de uma falha no sensor de temperatura ambiente que controla o acionamento do compressor e ventilação, algumas estratégias podem ser traçadas para reduzir o impacto da falha e manter a operação até a realização da manutenção. Atualmente, essas estratégias baseiam-se em sobrepor o sinal do sensor fazendo com que o sistema de climatização opere em modo de acionamento manual, o que evidentemente prejudica o conforto térmico e aumenta significativamente o gasto de energia.

Visando uma alternativa para esta situação, uma possível aplicação de técnicas de instrumentação inteligente é estimar, por meio de dados de outros sensores e inteligência computacional, um modelo de regressão que realize a predição do valor da temperatura ambiente fazendo com que o sistema possa operar em modo automático sem grandes perdas de desempenho mesmo sob uma condição de falha.

A escolha de aplicar o modelo de regressão sobre o sensor de temperatura ambiente foi tomada devido este ser o sensor que não impacta em segurança que possui o maior grau de importância para o controle do sistema de climatização. Salienta-se que o modelo proposto não é capaz de suprir todas as possíveis falhas do sistema de climatização, mas sim ser tolerante e manter o funcionamento para o de falha no sensor de temperatura ambiente onde há oportunidade de melhoria da forma de tratamento atual.

O estudo justifica-se por reduzir o impacto das possíveis falhas de sensoriamento no funcionamento global do aparelho. Essa redução de impacto representa, como resultado final, bem estar em relação ao conforto térmico e economia de energia. Considerando o mercado de climatização para veículos comerciais, esses dois tópicos são os de maior interesse de usuários, proprietários e fabricantes, devido sua grande importância no conjunto veicular e pelo alto custo agregado por um sistema de climatização. Considera-se ainda, em caso de implementação, o retorno financeiro com economia de energia, manutenções e aumento da autonomia do veículo sem a necessidade de *hardware* adicional, utilizando todo o sistema já existente.

Também é considerado ponto de destaque o interesse da indústria automotiva

como um todo na aquisição, processamento e análise de dados. Podendo assim, utilizar esses dados para obter quaisquer informações que possam ser extraídas e utilizá-las para melhoria contínua do desenvolvimento tecnológico de seus produtos. A aplicação proposta visa, além de atingir os objetivos que serão definidos a seguir, representar uma nova área de possíveis desenvolvimentos buscando modernizar a indústria de climatização automotiva comercial.

1.2 Objetivos

Visando as justificativas supracitadas, tem-se como objetivo geral desse trabalho o desenvolvimento de um sensor virtual aplicado na predição do valor da temperatura ambiente de um ar-condicionado automotivo aplicado em ônibus caso este esteja sob estado de falha.

Para atingir tal objetivo é proposto o uso da técnica de Regressão por Máquina de Vetor de Suporte (SVR), uma das mais utilizadas para regressão em sistemas de climatização juntamente com Redes Neurais Artificiais (ANN) (THANAYANKIZIL *et al.*, 2012). Esta técnica será aplicada sobre um conjunto de dados termodinâmicos mensurados em aparelhos de ar-condicionado.

Como saída do sistema espera-se obter um valor estimado da temperatura ambiente, fazendo com que o sistema de controle seja capaz de manter as características de conforto térmico do ambiente, bem como evitar o funcionamento do sistema em modo manual que representa um demasiado gasto de energia. A avaliação dos resultados será baseada em métricas para mensurar o erro de predição e a correlação entre o resultado predito e o mensurado, juntamente ensaios de validação para comparar o desempenho entre o sistema operando com sensor físico e com o sensor virtual.

Os objetivos específicos deste trabalhos dividem-se em realizar a aquisição dos dados de funcionamento de aparelhos de ar-condicionado aplicados a ônibus sob diferentes condições de funcionamento; desenvolver com base nesses dados um sistema de inteligência computacional para predição do sensor de temperatura ambiente; integrar o modelo desenvolvido no sistema de controle em substituição ao sensor físico e validar os resultados em laboratório utilizado para desenvolvimento de produtos que apresenta alta fidelidade em relação à aplicação em campo.

2 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho foi realizado com o objetivo de propor um sensor virtual, visando manter a operação de um aparelho de ar-condicionado utilizado em ônibus elétricos em modo de controle de temperatura automático quando o sensor físico de temperatura ambiente está sob condição de falha. O modo de operação automática busca manter características de desempenho relacionadas a conforto térmico e consumo de energia. Este sensor foi escolhido para este estudo devido ser o de maior importância para o sistema de controle que não impacta em segurança da operação.

Para tanto, após revisão de literatura definiu-se como método de regressão o uso de máquinas de vetores de suporte para gerar os modelos necessários para o desenvolvimento do sensor virtual. Também foi definida uma metodologia de ensaios de aquisição de dados adaptada da proposta apresentada por HEGAR *et al.* (2013), definindo assim, valores de carga térmica, temperatura objetivo, temperatura externa e dois aparelhos de ar-condicionado automotivo aplicados em veículos comerciais como fatores de experimento para aquisição de dados.

Definido o experimento e a metodologia foram realizados ensaios de aquisição de dados em diferentes condições ambientais de operação em dois modelos de ar-condicionado visando gerar a base necessária para o treinamento e otimização dos modelos de regressão. Esses ensaios totalizaram cerca de 64h de operação dos aparelhos que correspondem a aproximadamente 1h20min de operação em cada condição ambiental para cada aparelho com duas repetições.

Realizou-se posteriormente aos ensaios as etapas de treinamento, otimização e seleção do modelo de regressão que seria utilizado como sensor virtual, baseando-se em otimização Bayesiana e utilizando métricas de MSE, MAPE e correlação para

definir o modelo mais adequado dentre os 360 modelos gerados ao todo.

O modelo de regressão escolhido foi o que apresentou menor erro quadrático médio e erro médio absoluto percentual e maior coeficiente de correlação para os dados de teste obtidos inicialmente, atingindo respectivamente $0,5^{\circ}C^2$, $2,0\%$ e $0,95$. Posteriormente repetiu-se os ensaios utilizando o sensor virtual em substituição ao sensor físico para validação do sistema integrado.

O sistema com o sensor virtual integrado apresentou bons resultados, visto que foi capaz de operar mantendo as características de controle de temperatura e consumo de energia de maneira similar a operação com o sensor físico, conforme Seção ???. De modo geral o desempenho do sistema de regressão nos ensaios de validação apresentou erro médio quadrático de $1,3^{\circ}C^2$, erro absoluto médio percentual de $3,6\%$ e coeficiente de correlação de $0,90$. Além disso a temperatura média ficou em $22,1^{\circ}C$ quando a temperatura objetivo era $22^{\circ}C$ e $26,0^{\circ}C$ quando a temperatura objetivo era $26^{\circ}C$. O consumo médio de energia mensurado durante a operação em modo automático apresentou-se de 15% a 50% menor do que o consumo mensurado em modo manual, previamente utilizado quando havia falha no sensor físico dependendo da carga térmica utilizada.

Observando os resultados obtidos conclui-se que a metodologia utilizada pode ser aplicada para o desenvolvimento do sensor virtual em ambiente de laboratório e existe potencial de aplicação em produto.

Futuramente ensaios em campo são necessários para realizar a validação do método proposto na aplicação final dos aparelhos de ar-condicionado visando confirmar os resultados obtidos em laboratório, esses ensaios devem ser realizados em campo de provas com a instrumentação adequada durante a etapa de validação dos veículos.

Devido a verificação de significância estatística das condições ambientais na qualidade do modelo de regressão, sugere-se como trabalhos futuros inicialmente o estudo para aplicação de um método de aprendizado incremental, fazendo com que o modelo de regressão possa aprender continuamente com a operação do ar-condicionado a partir de um modelo pré-treinado. Espera-se que o sistema possa se tornar mais robusto à variações de instalação e condições de operação, podendo reduzir a influência das condições ambientais na qualidade do modelo, aumentando

a capacidade de generalização e ampliando a gama de aplicação do sensor virtual. Também é proposto o uso de técnicas adicionais para geração de base comparativa de desempenho.

Outra proposta visando a melhoria da qualidade do modelo é o uso de uma maior quantidade de variáveis preditoras, ou seja, realizar a aquisição de dados de outros sensores, bem como, realizar um pré-processamento e seleção afinada de características a serem utilizadas, como exemplo pode-se citar o uso de derivadas que identifiquem momentos transitórios da operação do aparelho como variável preditora. Essa aplicação pode significar a redução dos desvios de predição que ocorrem nesses períodos. Sugere-se também que seja possível utilizar uma estimativa da carga térmica aplicada ao sistema como variável preditora, visto que, este é um fator que apresentou significância na qualidade do modelo proposto, essa estimativa pode ser realizada por meio da medida da concentração de CO₂ presente no interior do veículo por exemplo.

Ampliando o escopo do trabalho, é proposto como desenvolvimento futuro um modelo inteligente capaz de ser tolerante a um maior número de falhas e em uma maior quantidade de sensores, desde que estes não impactem em segurança. É possível utilizar modelos de regressão para todos os sensores de temperatura presentes no aparelho de ar-condicionado fazendo com que exista uma capacidade elevada de operação sob condições de falha.

Também é proposta a aplicação de inteligência computacional visando a previsão de falhas, utilizando modelos de regressão de alta qualidade e capacidade de generalização como redundâncias no sistema e identificando alterações de comportamento das variáveis medidas em relação às preditas, é possível gerar alertas de revisão do sistema. Nesse âmbito, podem ser propostos sistemas online de predição de falhas como alterações no funcionamento do compressor, necessidade de manutenção de ventiladores e detecção de excesso de carga térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, M. *et al.* Computational intelligence techniques for HVAC systems: a review. **Building Simulation**, New York, v. 9, 02 2016.
- HEGAR, M. *et al.* Bus HVAC energy consumption test method based on HVAC unit behavior. **International journal of refrigeration**, Amsterdam, v. 36, n. 4, p. 1254–1262, 2013.
- JOHNSON, V. H. **Fuel used for vehicle air conditioning**: a state-by-state thermal comfort-based approach. Warrendale: SAE Technical Paper, 2002.
- MARCOPOLO. **Paradiso New G7 1800 DD**.
<https://www.marcopolo.com.br/marcopolo/paradiso-new-g7-1800-dd/caracteristicas>.
- MUSAT, R.; HELEREA, E. Parameters and models of the vehicle thermal comfort. **Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering**, Cluj-Napoca, v. 1, p. 215–226, 2009.
- SÃO PAULO, P. **LEI Nº 16.428, DE 25 DE ABRIL DE 2016**.
<http://documentacao.camara.sp.gov.br/iah/fulltext/leis/L16428.pdf>.
- SUGARMAN, S. C. **HVAC Fundamentals**. 2. ed. Lilburn: Fairmont Press, 2007.
- THANAYANKIZIL, L. V. *et al.* Softgreen: towards energy management of green office buildings with soft sensors. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORKS, 40., 2012, New York.
Proceedings [. . .] New York: IEEE, 2012.
- VAKILOROAYA, V. *et al.* A review of different strategies for HVAC energy saving. **Energy conversion and management**, Amsterdam, v. 77, p. 738–754, 2014.