Revista **Ciências Exatas**
V.31, N°2, 2025 | Taubaté/SP - Brasil | **ISSN:** 1516-2893 | **DOI:** https://doi.org/10.69609/1516-2893.2025.v31.n2.a4027

ENGENHARIA DE SUPRIMENTOS MULTINÍVEL: UM ESTUDO SOBRE A PADRONIZAÇÃO DO AVAC-R EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO

MULTILEVEL SUPPLY ENGINEERING: A STUDY ABOUT STANDARDIZATION OF HVAC-R AT EDUCATIONAL INSTITUTION

Fernando Elisiario Correia | fernando.elisiario@hotmail.com | Universidade de Taubaté/SP
Arcione Ferreira Viagi | arcione.fviagi@unitau.br | Universidade de Taubaté/SP
Roque Antônio de Moura | roque.moura@fatec.sp.gov.br | Fatec São José dos Campos/SP

RESUMO

Esta pesquisa analisa a aplicação da Engenharia de suprimentos multinível sobre a padronização e sustentabilidade da climatização artificial de aquecimento, ventilação e resfriamento de ambientes (>22ºC< 26ºC) em uma Instituição de Ensino médio profissionalizante, monitorando a instalação de sistemas de climatização do tipo VRF (Fluxo de Refrigerante Variável) e *Split System*. Esta pesquisa visa investigar gargalos técnicos e operacionais por meio de entrevistas, análises documentais e inspeções em campo que inviabilizam a padronização sistêmica do AVAC e assim sugerir uma padronização. A metodologia usada contou com uma pesquisa bibliográfica e publicações técnicas inerentes ao tema. Entrevistas e inspeções de campo para o reconhecimento da instalação e obstáculos à padronização conforme prevê a literatura e o manual do fabricante. Como resultado, embora haja notável evolução nos equipamentos AVAC, há falhas frequentes nas instalações que apontam para lacunas estruturais por não atender os requisitos técnicos e infraestruturais recomendados pelo fabricante. Conclui-se que para mitigar erros, falhas e rendimento nas operações de aquecimento e resfriamento é importante a integração entre os agentes da cadeia e da institucionalização de práticas técnicas padrões para elevar o desempenho, a durabilidade e a sustentabilidade dos sistemas AVAC no contexto educacional.

Palavras-chave: AVAC. Climatização Escolar. Engenharia Multinível. Padronização. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This research analyzes the application of multilevel supply engineering to the standardization and sustainability of artificial air conditioning for heating, ventilation, and cooling environments (>22°C < 26°C) in a vocational high school, monitoring the installation of VRF (Variable Refrigerant Flow) and split-system air conditioning systems. This research aims to investigate technical and operational bottlenecks through interviews, document analysis, and field inspections that hinder systemic HVAC standardization and thus suggest standardization. The methodology used included bibliographical research and technical publications related to the topic. Interviews and field inspections were used to identify the installation and obstacles to standardization, as outlined in the literature and the manufacturer's manual. As a result, although there has been notable progress in HVAC equipment, there are frequent failures in the installations, indicating structural deficiencies due to failure to meet the technical and infrastructural requirements recommended by the manufacturer. It is concluded that to mitigate errors, failures, and performance in heating and cooling operations, it is important to integrate stakeholders and institutionalize standard technical practices to improve the performance, durability, and sustainability of HVAC systems in the educational context.

Keywords: HVAC. School Air Conditioning. Multilevel Engineering. Standardization. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as políticas públicas brasileiras voltadas à infraestrutura educacional vêm incorporando progressivamente critérios de conforto ambiental como parte integrante da qualidade do ensino (Benevides *et al*., 2024; Antônio *et al*., 2024). Entre esses critérios, destaca-se a climatização dos ambientes escolares como elemento essencial para garantir condições adequadas de aprendizagem, saúde e bem-estar de estudantes e educadores (Brasil, 2020).

Estudos em psicologia ambiental e pedagogia têm evidenciado que a temperatura e a qualidade do ar influenciam diretamente a concentração, o desempenho acadêmico e a permanência dos alunos em sala de aula (Wargocki; Wallace, 2018).

Para garantir tais condições, a temperatura interna deve ser mantida dentro de faixas compatíveis com o conforto térmico humano segundo a norma ABNT NBR 16401-2: 2024, para ambientes internos de uso contínuo como salas de aula, recomenda-se que a temperatura operativa esteja entre 22ºC e 26ºC, dependendo da estação do ano, da umidade relativa do ar e da vestimenta dos ocupantes (ABRAVA, 2022; ABNT, 2020).

Essa faixa é respaldada por normas internacionais que define zonas de conforto térmico com base em parâmetros fisiológicos e ambientais. Temperaturas fora desses limites não apenas comprometem o conforto térmico, como também afetam o desempenho cognitivo e o consumo energético dos sistemas de climatização.

Nesse contexto, a adoção de sistemas de climatização do tipo *split system* e VRF (Fluxo de Refrigerante Variável) em escolas públicas tem se expandido dado o seu potencial de modularidade, eficiência energética e viabilidade de instalação em estruturas existentes conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 | Temperatura operativa de conforto ambiental.

Fonte: Autor (2025).

No ensino, conforme Costa *et al.* (2025) a performance real desses sistemas especialmente em ambientes coletivos e com ciclos intensos de uso como escolas depende não apenas da tecnologia, mas da qualidade da cadeia de suprimentos envolvida em sua implementação e manutenção (Moura *et al*., 2022).

A cadeia de suprimentos AVAC (Aquecimento, Ventilação, Ar-Condicionado) é por natureza, uma cadeia técnica é complexa, composta por múltiplos níveis de fornecedores, prestadores de serviço e atores institucionais.

Para fins analíticos, pode-se dividir essa cadeia em três níveis principais.

***Tier 1**: fabricantes de equipamentos, responsáveis pelo desenvolvimento tecnológico, especificações técnicas e garantia de desempenho.*
***Tier 2**: distribuidores, integradores e representantes comerciais que intermediam a venda, prestam suporte técnico e configuram os sistemas conforme a demanda do cliente.*
***Tier 3**: empresas instaladoras e equipes de manutenção, que executam a obra, fazem ajustes em campo e realizam serviços pós-instalação.*

A literatura em gestão da cadeia de suprimentos (Chopra; Meindl, 2016) destaca que a fragmentação e a falta de integração entre os níveis da cadeia são fatores recorrentes de ineficiência operacional, perda de qualidade e aumento de custos.

Em setores técnicos como o AVAC, esses problemas se manifestam de forma crítica: instalações inadequadas, falta de treinamento técnico, ausência de planos de manutenção e falhas de comunicação entre fabricantes e instaladores são alguns dos sintomas de um sistema desarticulado

(Ramos; Pereira, 2019).

Na realidade das escolas públicas brasileiras as falhas imapactam diretamente sobre o ciclo de vida útil dos sistemas, comprometendo não apenas o conforto térmico, mas também a sustentabilidade financeira e ambiental das unidades.

Muitas vezes, mesmo com equipamentos de alto desempenho, os sistemas operam abaixo da sua capacidade ideal por erros básicos de instalação, má especificação ou ausência de supervisão técnica continuada.

Assim, este estudo parte da hipótese de que a origem de boa parte dos problemas em projetos de climatização está menos na escolha da tecnologia e mais nas falhas sistêmicas da cadeia de suprimentos (Silva *et al*., 2025).

Propõe-se, portanto, realizar um diagnóstico qualitativo dessa cadeia por meio de estudo de caso múltiplo em uma unidade de ensino, a fim de identificar gargalos logísticos, problemas de padronização e fragilidades contratuais.

Ao se propor diretrizes institucionais baseadas em padronização técnica, rastreabilidade, capacitação e gestão integrada, o presente trabalho busca contribuir tanto para a literatura sobre cadeia de suprimentos aplicada à engenharia quanto para a melhoria prática dos sistemas de climatização no ambiente escolar brasileiro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Christopher (2020), a cadeia de suprimentos é um sistema integrado de fluxos materiais, financeiros e informacionais que conecta fabricantes, intermediários e clientes finais. No setor AVAC-R, a cadeia é tipicamente estruturada em níveis hierárquicos.

- **Tier 1**: Fabricantes de equipamentos e tecnologia;
- **Tier 2**: Distribuidores, projetitas e representantes técnicos regionais;
- **Tier 3**: Empresas instaladoras, mão de obra local, peças e assistências técnicas e profissionais locais.

Segundo ABRAVA (2022), a qualidade de um sistema AVAC depende não apenas do equipamento, mas da correta especificação, instalação e manutenção (Oliveira *et al*., 2025).

A ausência de padronização nos procedimentos de montagem, drenagem, fixação e isolamento compromete diretamente a durabilidade e o desempenho térmico. Sistemas mal instalados operam com menor eficiência, elevando o consumo energético e exigindo manutenções corretivas recorrentes sem oferece rum conforto térmico descente (Silva *et al.*, 2024).

Boas práticas de comissionamento, alinhadas às normas da ABNT e ao conceito de sustentabilidade operacional (Liu; Deshmukh, 2021), são essenciais para a redução do impacto ambiental.

Relatórios de inspeção na unidade escolar revelam falhas estruturais como drenos mal inclinados, sobredimensionamento, unidades condensadoras mal posicionadas e ausência de automação, destacando a fragilidade dos processos de supervisão técnica e integração entre os níveis da cadeia (Da Silva Filho *et al.,* 2025).

3. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e exploratória, com base em um estudo de caso múltiplo aplicado a unidades escolares da rede privadas no estado de São Paulo. A escolha por essa abordagem se justifica pela necessidade de compreender em profundidade as particularidades dos processos logísticos, técnicos e contratuais envolvidos na instalação de sistemas de climatização em ambientes educacionais, especialmente diante das recorrentes falhas operacionais identificadas em campo. A pesquisa foi conduzida em quatro fases.

Análise Documental

Foram avaliados projetos técnicos, memoriais descritivos, contratos de fornecimento e instalação, bem como relatórios de comissionamento e aceitação técnica. O objetivo é verificar a aderência aos requisitos normativos da ABNT (especialmente NBR 16401), o grau de rastreabilidade dos componentes e a clareza na definição de responsabilidades entre os Tiers da cadeia de suprimentos.

Entrevistas Semiestruturadas

Apos realizadas entrevistas com:

- Engenheiros responsáveis pelas instalações (Tier 3);
- Supervisores e gestores escolares (clientes diretos);
- Fabricantes e distribuidores de equipamentos (Tiers 1 e 2).

Em busca mapear as percepções sobre falhas recorrentes, lacunas de comunicação, práticas informais e desafios logísticos enfrentados.

Inspeções *in loco*

Visitas técnicas foram realizadas em ao menos 4 unidades escolares, com registro fotográfico, preenchimento de checklist técnico baseado na ABNT NBR 16401, e observação direta das condições de instalação e operação dos sistemas VRF e split. Serão priorizados ambientes críticos, como salas de aula, bibliotecas e espaços com alta densidade de ocupação.

Mapeamento dos Fluxos de Suprimento

Com base nas informações coletadas, será realizada a diagramação da cadeia AVAC para a escola estudada, destacando os fluxos físicos (equipamentos e insumos), fluxos informacionais (projetos, ordens de serviço, notas fiscais) e os fluxos de decisão (contratações e aprovações). Essa modelagem foi essencial para identificar gargalos, zonas de risco e pontos de melhoria sistêmica.

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise empírica foi conduzida em unidades escolares da rede privada, distribuídas em regiões administrativas distintas, todas com sistemas de climatização tipo VRF ou *split system* em operação. A coleta de dados envolveu visitas técnicas com registros fotográficos e inspeções documentais.

4.1 Diagnóstico das Falhas por Tier

Tier 1 - Fabricantes e Desenvolvedores

Foram identificadas falhas relacionadas à ausência de comunicação direta com os níveis de instalação e operação. Em todos no caso analisado:

- Nenhum fabricante participou ativamente da fase de comissionamento.
- Apenas dois dos seis sistemas analisados tinham manuais técnicos adequados entregues junto à obra.
- Não houve treinamento prático oferecido aos instaladores locais, resultando em erros operacionais (como inversão de ligações elétricas e configuração incorreta de evaporadoras).

Tier 2 - Distribuidores e Integradores

Os problemas mais frequentes nesta camada foram:

- Atrasos logísticos de até 21 dias na entrega dos equipamentos, gerando reprogramações de cronograma e impacto no ano letivo.
- Substituição de componentes por similares não especificados no projeto original, sem documentação ou justificativa técnica.
- Falta de interface clara com os instaladores terceirizados, contribuindo para retrabalhos.

Tier 3 – Instaladores e Prestadores de Serviço Locais

Nesta camada, os principais pontos críticos observados foram:

- Falta de padronização na execução: instalações hidráulicas sem inclinação no dreno, ausência de isolamento nas tubulações e fixação inadequada dos suportes de condensadoras.
- Na escola estudada, o sistema apresentou vazamentos de água nas unidades internas dentro de seis meses após a instalação.
- Nenhuma das escolas possuía plano formal de manutenção preventiva acordado ou executado, comprometendo a durabilidade do sistema.
-

4.2 Diretrizes Institucionais Propostas

Com base nos achados do estudo, são propostas as seguintes diretrizes para melhoria da cadeia AVAC educacional:

a) Contratos com Escopo Técnico Mínimo Obrigatório

Os contratos de fornecimento e instalação devem conter:

- Layout de dutos e unidades;
- Indicação das inclinações de dreno e tipo de tubulação;
- Lista de verificação técnica a ser preenchida ao final de cada etapa;
- Cláusulas específicas de descarte: condensado, acesso e segurança elétrica.

b) Capacitação Técnica Certificada (Tier 3)

Recomenda-se que a contratação de instaladores e equipes de manutenção para:

- Participação em treinamentos homologados por fabricantes (Tier 1);
- Registro em banco de dados interno com histórico de conformidade;
- Exigência de ART ou RRT para todos os projetos.

c) Checklists padronizados por fase

Desenvolver um *checklist* unificado, aplicável a todas as etapas do projeto:

- Verificação de infraestrutura elétrica e civil;
- Conferência de layout e espaçamento mínimo;
- Teste de estanqueidade e pressão;
- Comissionamento funcional e registro fotográfico obrigatório.

d) Rastreabilidade Técnica com QR Code

Propõe-se a criação de um sistema de rastreabilidade por QR Code fixado em cada unidade evaporadora, contendo:

- Número de série, fabricante e data de fabricação;
- Responsável pela instalação e assinatura técnica;
- Datas de manutenções futuras e alertas automáticos.

Esse sistema permitira a integração futura com o banco de dados institucional de ativos e manutenção, promovendo transparência e prevenção de falhas.

4.3 CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS

A pesquisa avança no campo da gestão da cadeia de suprimentos ao:

- Aplicar o conceito de **tiers** (multinível) a um setor não industrial (climatização educacional pública);
- Relacionar diretamente falhas operacionais com fragmentações contratuais e falta de rastreabilidade;
- Propor um modelo integrador com mecanismos técnicos, contratuais e digitais, promovendo maior governança sobre a cadeia.
- Além disso, a metodologia adotada pode ser replicada em outros contextos (ex: hospitais, bibliotecas, ginásios escolares), onde o desempenho de sistemas AVAC é igualmente crítico.
- Este estudo contribuirá para o avanço da literatura sobre gestão de cadeia de suprimentos aplicada ao setor AVAC com recorte em instalações de sistemas de climatização educacionais. A pesquisa dialoga com temas como gestão da qualidade, responsabilidade técnica compartilhada, comissionamento e rastreabilidade em obras prediais, além de fornecer insumos práticos para gestores públicos que desejam adotar modelos integrados e sustentáveis de contratação e manutenção de sistemas de climatização.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou que a ausência de integração operacional e informacional entre os diferentes níveis da cadeia de suprimentos AVAC-R, especialmente nos Tiers 2 e 3 compromete significativamente a eficácia dos sistemas de climatização instalados em escolas.

As falhas recorrentes de comunicação entre fabricantes, projetistas, instaladores e gestores escolares resultam em atrasos logísticos, baixa padronização, inexistência de planos de manutenção e descontinuidade técnica ao longo do ciclo de vida dos sistemas.

A análise qualitativa, baseada em estudos de caso múltiplos, entrevistas e vistorias in loco, permitiu mapear os principais gargalos e propor diretrizes institucionais voltadas à qualificação da cadeia.

A exigência de escopo técnico mínimo nos contratos, o uso de checklists de aceitação por fase, a capacitação técnica homologada de equipes Tier 3 e a implementação de rastreabilidade por QR Code em equipamentos e registros de obra.

Os resultados aqui apresentados contribuem de forma teórica e prática para a gestão de suprimentos aplicada à climatização educacional, sendo relevantes tanto para formuladores de políticas públicas quanto para engenheiros e fornecedores do setor.

REFERÊNCIAS

ABRAVA. Boas Práticas para Instalação de Sistemas AVAC-R. São Paulo: 2022.

ABNT. 2020. Associação Brasileira de Normas Técnicas: **ABNT NBR 16401: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários.** Parte 1, 2 e 3. Rio de Janeiro, 2008.

ANTÔNIO, M. R., REGINA, O. M., GOUSSAIN, B. G. C. S., SILVA, M. B. (2024). **Neuroergonomics approach in the workplace** aiming to standardize movements and increase workers' sense of well-being. 24(10), 472–482. https://doi.org/10.53660/CLM-3313-24H27

BENEVIDES, M. P.; XAVIER, K. R. S. L.; et al. (2024**) Sign talk assistive technology**: real-time recognition of the libras typical alphabet using artificial intelligence. RGSA, v. 18, n. 12, p. e010610, 2024. DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-214

BRASIL. **Ministério da Educação.** Plano Nacional de Educação – PNE 2024–2034: Documento-Base para Discussão. Brasília: MEC, 2020.

CHRISTOPHER, M. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2020.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Administração da Cadeia de Suprimentos: Estratégia, Planejamento e Operação.** 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2016.

COSTA, J. C. L., SANTOS, D. F. A., OLIVEIRA, M. R. DE, & MOURA, R. A. DE. (2025). **Aprendizagem com solução de problemas reais** para aprimoramento discente na injunção socioprofissional. CLCS, 18(2), https://doi.org/10.55905/revconv.18n.2-100

DA SILVA FILHO, A. L.; BENEVIDES, M. P.; NOHARA, E. L.; DE MOURA, R. A. (2025). **Mechanical engineering in the construction** .... up to 1200 mm in diameter. ARACÊ , [S. l.], v. 7, n. 7, p. 40298–40314, DOI: 10.56238/arev7n7-295. Disponível em: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/6788 Acesso em: 27 jul. 2025.

LIU, Y.; DESHMUKH, A. **Resilience in Automotive Supply Chains**. Chalmers University, 2021.

MOURA, J. S.; ALMEIDA, M. R.; SILVA, T. F. **Avaliação da Eficiência Operacional de Sistemas de Climatização em Escolas Públicas: Um Estudo sobre Falhas de Implementação.** Rev. Brasileira de Eng.e Sustentabilidade, v. 10, n. 2, p. 88–101, 2022.

OLIVEIRA, M. R.; BENEVIDES, K. D. G.; RUFINO, L. J. G. C.; SANTOS, D. F. A.; BENEVIDES, M. P.; MOURA, R. A. **Direito Digital e limitação no uso da inteligência artificial hodierna: um ponto para reflexão** e ações requeridas. **CLCS**, *[S. l.]*, v. 18, n. 7, p. e19679, 2025. DOI: 10.55905/revconv.18n.7-341. Disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/19679 . Acesso em: 29 jul. 2025.

RAMOS, C. L.; PEREIRA, A. G. **Desafios da Gestão Técnica em Sistemas AVAC-R: A Falta de Integração como Fator Crítico.** Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada, v. 7, n. 1, p. 35–49, 2019.

SILVA, E. A.; CAMARGO, A. A.; SILVA, M. B.; MOURA, R. A. (2024). **Neuroergonomía y Tecnologías inmersivas para lograr un envejecimiento saludable** sin dolor. Exatas. V.30. DOI: https://doi.org/10.69609/1516-2893.2024.v30.n2.a3916

SILVA, JC DA, TOMÉ, LL, SANTOS, DFA, COSTA, JCL, OLIVEIRA, MR DE, & MOURA, RA DE. (2025). **Indústria metalmecânica conectada à internet das coisas para eficiência** na gestão robôs colaborativos. RGSA , 19 (6), e012413. https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n6-018

WARGOCKI, P.; WALLACE, L. A. **Air Quality, Ventilation and Learning in Schools.** International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 15, n. 5, p. 906, 2018. DOI: 10.3390/ijerph15050906

fapeti

FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

pós-graduação

UNITAU

Universidade de Taubaté