

# CONTROLE DE UMIDADE BASEADO NA CARTA PSICROMÉTRICA PARA CABINES DE PINTURA

Tiago dos Santos de Souza\*

## RESUMO

Os fenômenos físico-químicos que envolvem a aplicação da pintura automotiva são muito sensíveis, necessitando de controle rígido dos fatores que os influenciam. Qualquer parâmetro fora de especificação se expressa sob a forma de problemas de aplicação. Um problema de excesso de cratera na pintura em épocas do ano determinadas ficou evidenciado na linha de pintura contexto desse trabalho. Feito um brainstorming e elaborado um diagrama de ishikawa, cogitou-se a possibilidade do ar condicionado estar causando esse efeito uma vez que o estado do ar externo varia ao longo do ano. Após investigação descobriu-se que a casa de ar que alimenta a cabine de pintura não possui controle de umidade nem infra-estrutura para isso, permitindo a variação da umidade dentro da cabine de pintura. Verificou-se que as limitações que a infra-estrutura disponível de atuadores (trocadores de calor e sprays de água) ofereceria para executar o controle da umidade permitiriam que o mesmo fosse implementado, mas de forma limitada. Notou-se, então, através da análise da saída do sistema, que o conjunto tem capacidade para executar o especificado, bastava implementar um controle. Foi então proposto a implementação de um controle de umidade baseado em conhecimento especialista, a carta psicrométrica, para realizar sua função.

Palavras-chave: Pintura automotiva; Condicionamento de ar; Automação e controle.

---

\* Engenheiro de manutenção das Cabines de Pintura do Complexo Industrial Ford Nordeste.  
Engenheiro Mecatrônico – FTC – Faculdade de Tecnologias e Ciências  
Pós graduando em Especialização em Automação, Controle e Robótica pelo SENAI/CIMATEC.  
E-mail: eng.tiago@yahoo.com.br

# 1 INTRODUÇÃO

Numa linha industrial de pintura automotiva é extremamente necessário que os diversos fatores que interferem diretamente na aplicação de tinta sejam controlados. Isso se deve à sensibilidade dos fenômenos físico-químicos que a envolvem. As alterações influenciadas pela variação desses fatores expressam-se facilmente na qualidade final do produto gerando custos devido a reparos e retrabalhos.

Os fatores que influenciam diretamente na aplicação encontram-se, basicamente, em quatro categorias, nas características da tinta (viscosidade, temperatura, concentração de pigmentos, etc.), nos parâmetros de aplicação da pintura eletrostática (alta tensão, rotação do sino, vazão de fluido, etc), nas condições ambientais da cabine de pintura (temperatura e fluxo do ar, umidade, etc) e no grau de controle de limpeza da fábrica e dos entre processos. Quando eles estão fora dos limites definidos, diversos problemas de qualidade começam a aparecer, como coladura, respingos, crateras, estrias, etc.

Um dos problemas que ganhou notoriedade na linha de pintura contexto desse trabalho foi o aumento de crateras em determinadas épocas do ano. O gráfico abaixo mostra a quantidade de carros que apresentaram problema de cratera a cada mil carros produzidos ao longo dos meses nos últimos anos. Nota-se o aumento significativo de problemas encontrados entre agosto e dezembro.

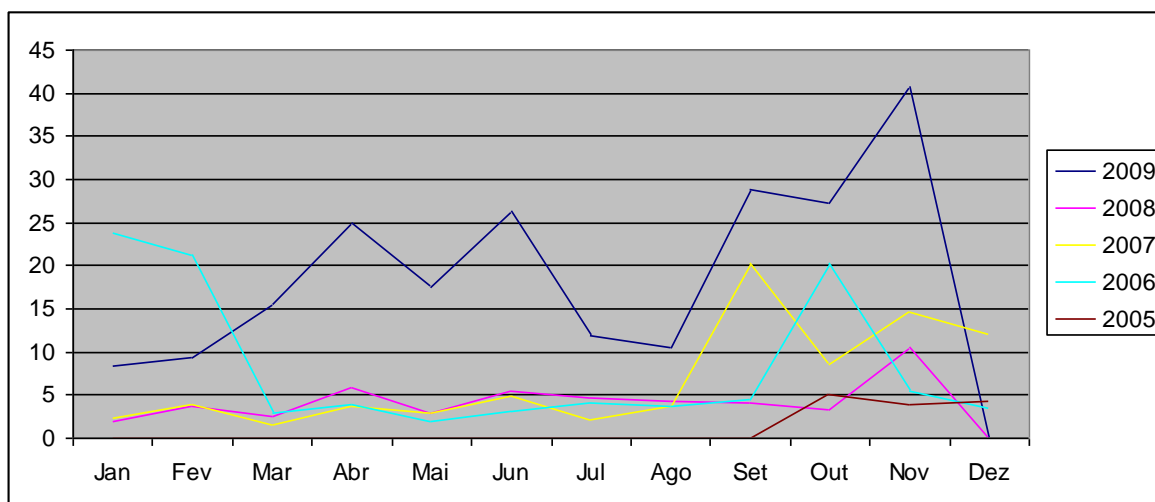


Figura 1: Quantidade de carros com crateras a cada mil carros produzidos ao longo do ano.

Foi realizado um estudo para solucionar o problema, onde fora gerado a partir de um brainstorm, reunindo especialistas em aplicação, manutenção e processo, uma espinha de peixe (Diagrama de Ishikawa) com as possíveis causas de formação de crateras. Uma das causas, como mostra diagrama abaixo, figura 2, foi a variação do condicionamento do ar dentro das cabines.

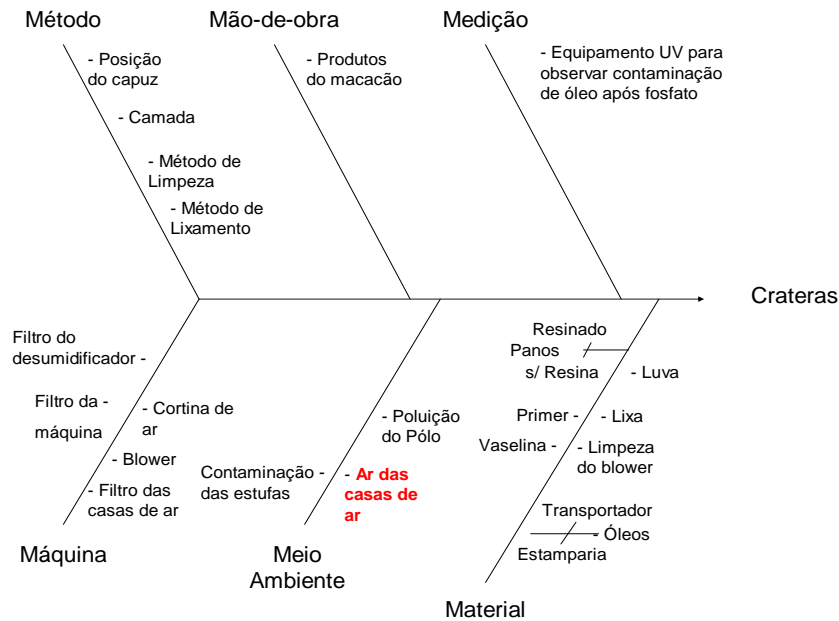


Figura 2: Diagrama de Ishikawa com possíveis causa de formação de crateras.

Como o estado do ar ambiente externo à fábrica varia ao longo do ano notou-se que ele poderia ser a provável causa dessa variação de cratera caso o condicionamento de ar realizado pelas casas de ar estivesse deficiente.

Motivado por essa hipótese, foi investigado o comportamento do ar dentro das cabines de pintura. Notou-se que na cabine de base os valores de temperatura e umidade encontravam-se quase sempre nos setpoints variando cerca de 2%, diferente das outras duas cabines, a de primer e a de verniz, que variavam muito e saía fora dos valores de aplicação ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$ ), conforme mostra o gráfico abaixo, formado pelos dados do checklist de verificação de balanceamento de ar da cabine Primer entre os dias 14/09/09 a 24/09/09.

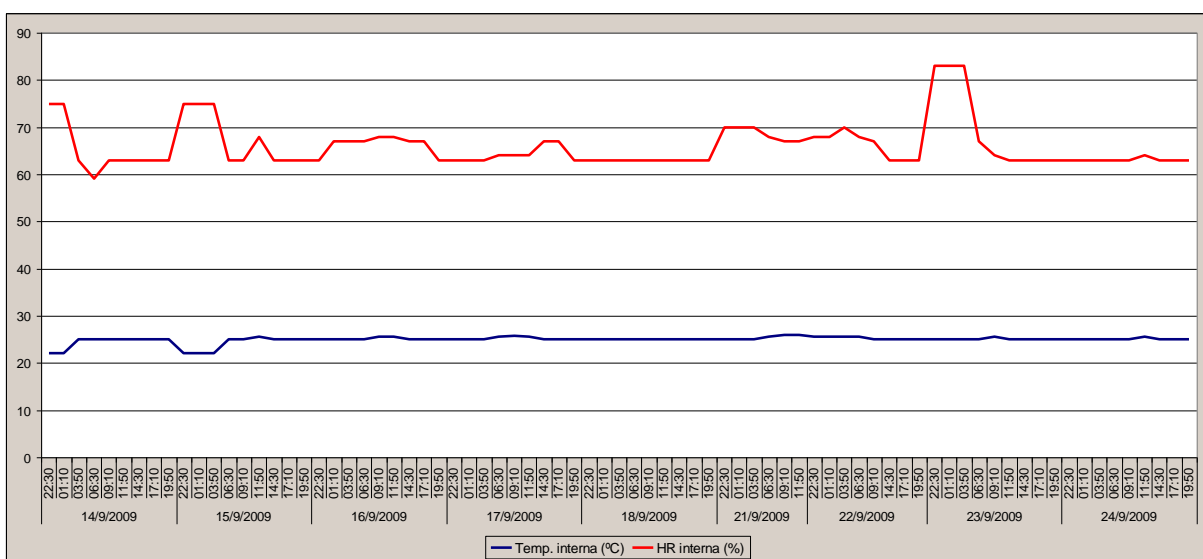


Figura 3: Variação de umidade na cabine de Primer.

Nota-se que a umidade varia bastante, inclusive passando de 80%, valor muito alto para a aplicação da pintura. O problema de a umidade estar muito alta é que há a formação de

condensados de água nas máquinas de aplicação. Esses condensados de água, ao pingar de uma máquina sobre uma carroceria, impedem a formação do filme de tinta no local em que se apresentam, gerando, por consequência, crateras na pintura.

Ao investigar a diferença de comportamento da umidade entre as cabines de pintura notou-se que a estrutura dos equipamentos que fornecem o ar condicionado às cabines (casas de ar) difere entre si, dando suporte ou não ao controle de umidade. As casas de ar da cabine de base realizam o controle da umidade. O porquê dessa diferença nas instalações ainda é uma incógnita, muitas informações do comissionamento se perderam ao longo do tempo.

Para corrigir o problema e verificar o impacto real que a umidade tem sobre a formação de crateras, notou-se a necessidade de implementar algum tipo de controle de umidade para as duas cabines (primer e verniz) que não possuem.

Como as casas de ar associadas a elas não possuem suporte a esse controle, pois faltam componentes essenciais em sua estrutura para que isso seja implementado em sua completude, surgiram algumas questões: Existe alguma forma de implementar o controle da umidade, mesmo que de forma limitada, utilizando os elementos ativos do processo de condicionamento de ar (trocadores de calor e ventiladores) já instalados na casa de ar? Se existirem limitações, elas são aceitáveis? Como ele poderia ser implementado?

## 2 UMIDADE, DIAGRAMA PSICROMÉTRICO E PINTURA AUTOMOTIVA

A umidade é a quantidade de vapor d'água contido no ar. Ela pode ser expressa sob a relação quantidade de vapor no ar por quantidade de vapor que o ar poderia reter naquela temperatura (umidade relativa, em %) ou pela quantidade de vapor que está no ar em valores absolutos (umidade absoluta, em g/Kg).

Sua importância no contexto da pintura automotiva deve-se à sua interferência no processo de aplicação dentro das cabines de pintura. Essas cabines possuem um balanceamento ambiental que envolve diversas variáveis como temperatura, umidade, direção e velocidade de insuflação de ar.

Existem quatro fatores que evidenciam a importância do seu controle dentro das cabines. O primeiro de todos é que a pintura é do tipo eletrostática. Nessa forma de pintura a tinta é carregada eletricamente e pulverizada no ar. Perto do ponto de pulverização ficam eletrodos, carregados com cerca de 100 KV, responsáveis pela formação do campo elétrico que guia a tinta para a carroceria, que está aterrada. Como a magnitude da tensão é muito alta ao diminuir-se a resistência do ar na presença de alta umidade, aumenta-se o risco de formação de arcos-elétricos pela quebra da rigidez dielétrica do ar, podendo causar acidentes.

O segundo fator é que a quantidade de vapor d'água no ar interfere na taxa de evaporação dos solventes utilizados na tinta. Caso o solvente evapore antes do tempo (devido à baixa umidade), a tinta resseca. Se evaporar muito tarde (devido à alta umidade), aparecem ferveruras após a cura.

O terceiro ponto é que quando a umidade está alta, acontece do vapor d'água condensar sobre as máquinas de aplicação e sobre a carroceria. Essa condensação deve-se ao resfriamento do ar ambiente quando em contato com o ar comprimido dispensado pelas máquinas que fica em

torno de 7 °C. Quando acontece condensação sobre as carrocerias formam-se crateras na pintura e quando condensa sobre as máquinas começam a haver falhas de alta tensão.

O último, e não menos importante fator, é o conforto térmico dos operadores que trabalham dentro da cabine de pintura.

A determinação da dinâmica da umidade do ar pode ser modelada através de equações termodinâmicas, entretanto, a utilização do diagrama psicrométrico simplifica grandemente a abordagem, uma vez que a dinâmica física relacionada à umidade não precisa ser calculada. O diagrama apresenta graficamente a relação entre temperatura, umidade relativa, umidade absoluta e outras variáveis termodinâmicas o mais próximo da realidade possível, pois o mesmo fora obtido de forma experimental. Através do diagrama psicrométrico as mudanças dos estados do ar podem ser facilmente demonstradas.

No diagrama psicrométrico mostrado abaixo está mapeada a faixa de parâmetros aceitáveis para a aplicação da pintura, que será utilizada como referência para a estratégia de controle. Tais parâmetros foram obtidos experimentalmente por empresas, laboratórios e especialistas em processos de pintura. Os valores padrões de temperatura e umidade para cabine de primer e verniz são  $25 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5$  % de umidade relativa.

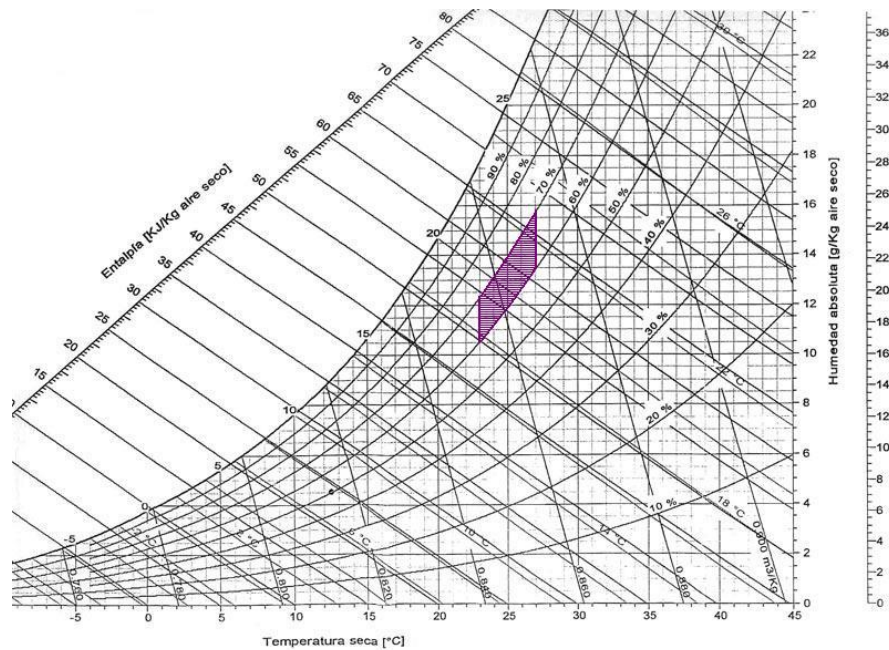


Figura 4: Faixa de parâmetros aceitáveis para aplicação da pintura

### 3 ESTRUTURA E FUNCIONALIDADE DA CASA DE AR COMPLETA

A casa de ar completa possui a funcionalidade de controle de temperatura e umidade. Ela é constituída de filtro de ar, um trocador de calor de pré-aquecimento, spray umidificador, trocador resfriador, trocador aquecedor e um ventilador, conforme mostra o esquema abaixo. As linhas pontilhadas mostram os elementos interligados em uma malha de controle específica.

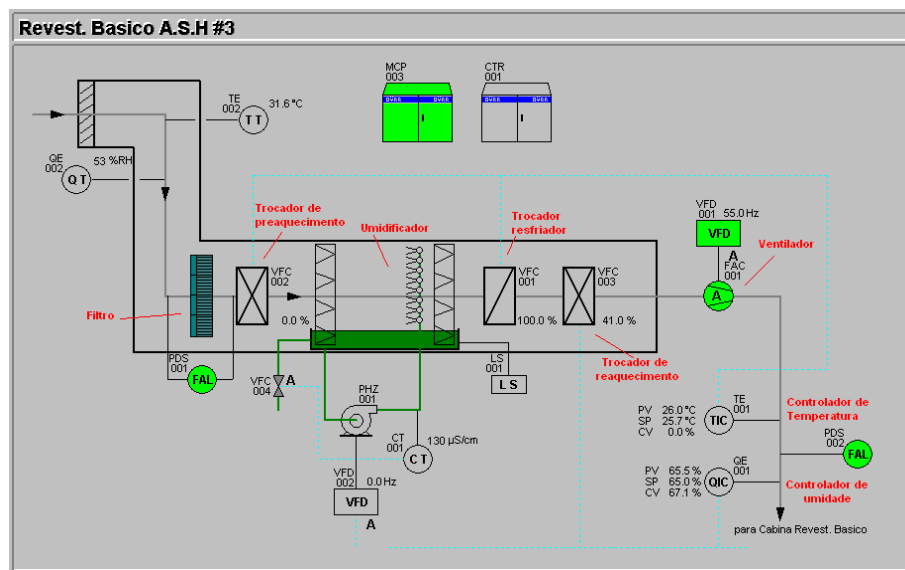


Figura 5: Esquema da casa de ar completa

Nesse sistema, o ventilador gera o empuxo que succiona o ar do ambiente externo para dentro da casa de ar passando, nessa trajetória, por um conjunto de filtros que removem poeira e outras partículas sólidas. O ar então é aquecido no trocador de pré-aquecimento. Esse aquecimento tem a finalidade de aumentar a capacidade de retenção de água do ar para a umidificação posterior. Esse processo é mostrado na figura 6, abaixo, como a transição entre o estado 1 e o estado 2.

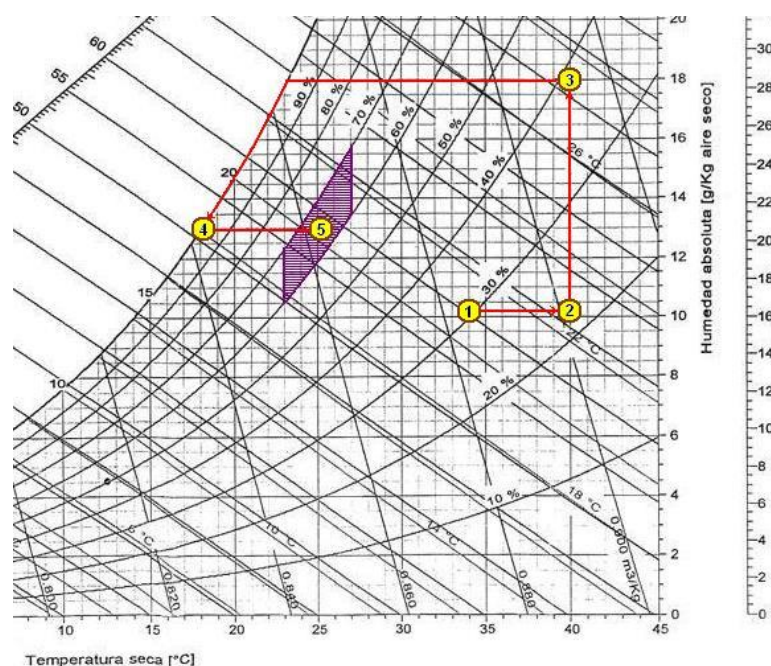


Figura 6: Processo da casa de ar 3

A zona de umidificação realiza o seu trabalho utilizando bicos de spray. Ela é constituída de um tanque aberto onde fica a água a ser pulverizada e onde decanta a água não retida pelo ar, pela bomba de recalque e pelos bicos de spray. A água pressurizada no sistema pela bomba sai sob a forma de spray nos bicos. Parte da água vaporiza-se e é retida pelo ar e parte decanta de volta para o tanque. O nível do tanque é monitorado para recarga e descarga da água do sistema. Além disso, a qualidade da água é monitorada com um medidor de condutividade

para evitar contaminações nos trocadores posteriores. Essa zona é separada das outras por paletas que servem de anteparo para impedir que a água não vaporizada seja arrastada pelo ar para as outras zonas. A transição do estado 2 para o estado 3 da figura 6, mostra a atividade desse processo.

Depois que o ar é umidificado, ele passa então pelo trocador de resfriamento. Ele é levado, então, à determinada temperatura de forma a condensar o vapor d'água até atingir a umidade desejada, transição do estado 3 para o 4 da figura 6. Então ele é reaquecido pelo trocador de reaquecimento até atingir a temperatura adequada, transição do estado 4 para o 5, em que será insuflado para dentro das cabines de aplicação. Nesse ponto o ar está na temperatura e umidade desejada para a aplicação.

Uma fato importante é que as casas de ar não possuem nenhum elemento desumidificador específico como lãs de captação de vapor, etc. A redução da umidade absoluta do ar, então, dá-se através do resfriamento do ar abaixo do ponto de orvalho em que o vapor d'água no ar condensa-se.

#### 4 ESTRUTURA E FUNCIONALIDADE DA CASA DE AR SIMPLES

A casa de ar simples, diferente da casa de ar completa, não apresenta o trocador de pré-aquecimento e o sistema de umidificação, conforme mostra o diagrama da figura 7. Isso implica na impossibilidade de aumentar a umidade absoluta do ar, mostrada na transição do estado 2 para o 3 da figura 6.

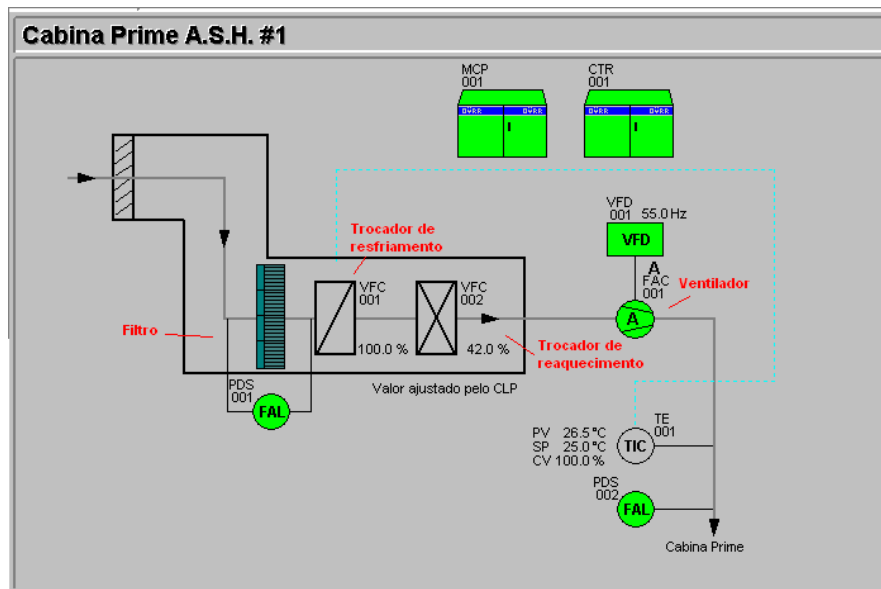


Figura 7: Esquema da casa de ar simples.

Analisando essa informação através do diagrama psicrométrico nota-se que não poderão acontecer transições ascendentes. Ou seja, se o estado do ar externo estiver situado abaixo da linha vermelha mostrada na figura 8, a umidade dentro da cabine estará abaixo da faixa de tolerância e não atenderá às exigências de qualidade.

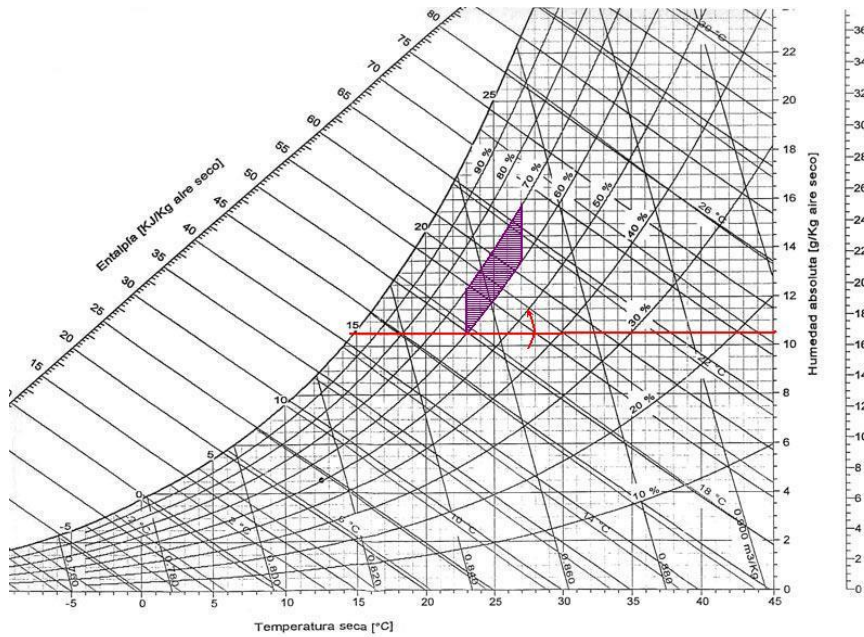


Figura 8: Limitação da casa de ar simples

## 5 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE UMIDADE PARA CASA DE AR SIMPLES

A estratégia de controle de umidade proposta baseia-se no conhecimento da dinâmica do ar expressada na carta psicrométrica e no estado de entrada do ar, o sistema de controle toma as decisões e parametriza os elementos ativos da casa de ar de forma a levar o ar às condições ideais dentro da cabine de pintura.

A efetividade requerida deverá levar em consideração a capacidade e as limitações da casa de ar simples e o perfil de temperatura e umidade do ar externo ao longo do tempo, considerando-se as suas condições extremas.

Fora levantado o perfil de temperatura e umidade do ar do ambiente externo da fábrica relativo ao mês de outubro através do gráfico histórico do sistema supervisorio, figura 9, que coleta esses dados através de um medidor de umidade e temperatura eletrônico que fica operando constantemente.

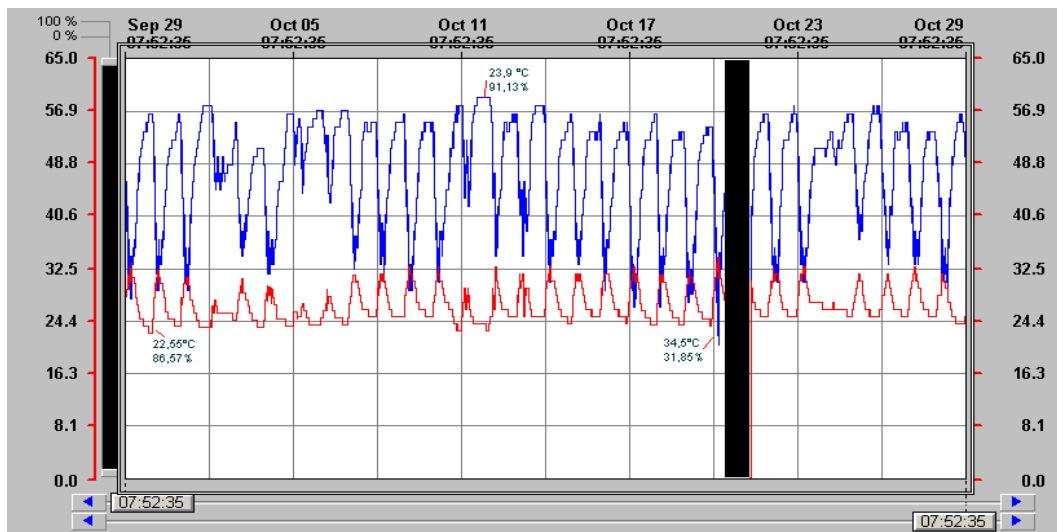


Figura 9: Temperatura e umidade relativa ao longo do mês de outubro



Observando o perfil do mês de outubro notou-se que as condições extremas para umidade foram 23,9 °C a 91,13% (11/10/09) e 34,5 °C a 31,85% (20/10/09) e para temperatura foi 22,55 °C a 86,57% (30/09/09).

As transformações psicrométricas necessárias para levar o ar nas condições extremas, encontradas acima, de temperatura e umidade para dentro da faixa de parâmetros aceitáveis estão mostradas na figura 10, abaixo.

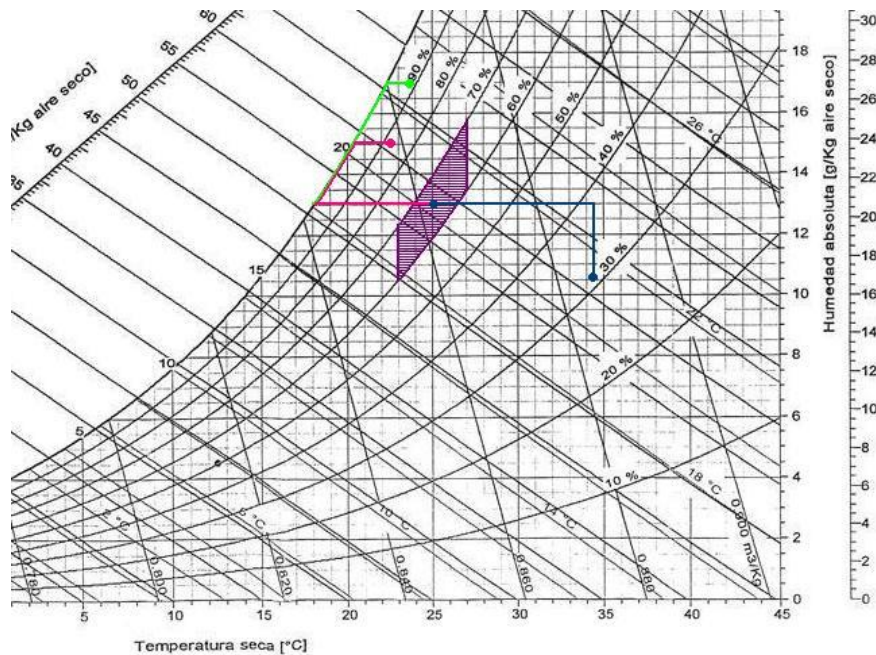


Figura 10: Transformações das condições de temperatura e umidade extremas para as aceitáveis

A figura mostra três processos. O de cor verde refere-se à condição do dia 11/10/09, o azul refere-se ao dia 20/10/09 e o rosa ao dia 30/09/09.

Tomando o processo de cor verde como exemplo, o ar no estado encontrado de 23,9 °C a 91,13% para atingir a faixa ideal precisou ser resfriado até 17,5 °C, no caminho ele atingiu a temperatura de orvalho de 22°C em que ficou saturado. Daí até atingir 17,5 °C, o vapor d'água excedente à quantidade saturação condensou-se diminuindo, conseqüentemente, a umidade absoluta do ar. Na temperatura de 17,5 °C, o ar após ter passado por esse processo encontra-se saturado e a quantidade de vapor contido no ar nesse momento é equivalente à 65% de umidade relativa na temperatura de 24 °C. O ar então é aquecido até atingir essa temperatura em que estará no estado ideal para a aplicação da pintura.

Ao observar o processo descrito acima e comparar com o processo de cor rosa, pode-se abstrair a primeira regra de comportamento que será adotada pelo controlador de forma a levar o ar a atingir a condição ideal. Sempre que a umidade absoluta esteja acima da desejada o ar pode ser resfriado até 17,5 °C, em que estará saturado com a umidade absoluta desejada e reaquecido até 24 °C onde atingirá as condições ideais.

A segunda regra leva em consideração a limitação da casa de ar simples quanto ao aumento da umidade absoluta. Nesse caso, mostrado na figura 10 como o processo azul, como não há a possibilidade de aumentar a umidade para os valores ideais, resta somente resfriar ou aquecer o ar de forma a adequá-lo na temperatura.

Tendo definido as regras que nortearão a estratégia de controle resta saber duas coisas, se os elementos ativos da casa de ar simples possuem potência térmica para realizar essas transições das piores condições aos estados desejados e como a estratégia de controle poderá ser implementada.

## 6 ANÁLISE DA CAPABILIDADE DE PROCESSAMENTO DA CASA DE AR SIMPLES

Para determinar a capacidade de processamento da casa de ar simples é necessário analisar o seu funcionamento através da sua resposta, a temperatura de saída e a umidade relativa de saída, enquanto em operação.

Conforme mostrado nos gráficos abaixo, obtido pela inserção dos dados dos checklists diários no software Minitab, os limites de controle da temperatura (Tbs) encontram-se bem ajustados próximo ao valor ideal de 25°C da faixa de especificação das cabines ( $25 \pm 2$  °C). Nota-se, entretanto, que os limites de controle da umidade relativa (HR) estão próximos dos limites de especificação e existe quantidade significativa de valores que estão fora da delimitação especificada de  $65 \pm 5\%$  ou em seu limite, que não é bom.

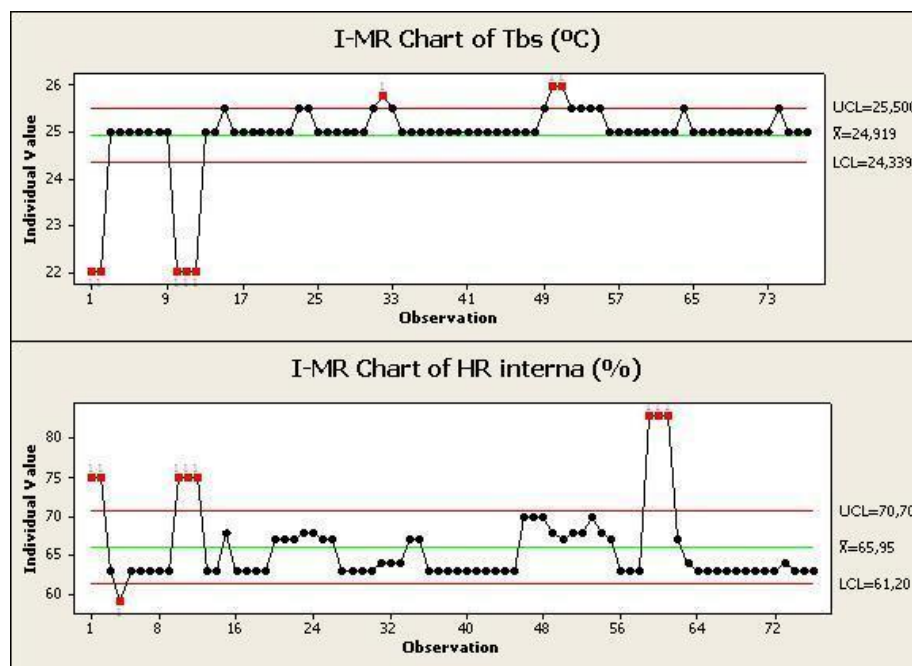
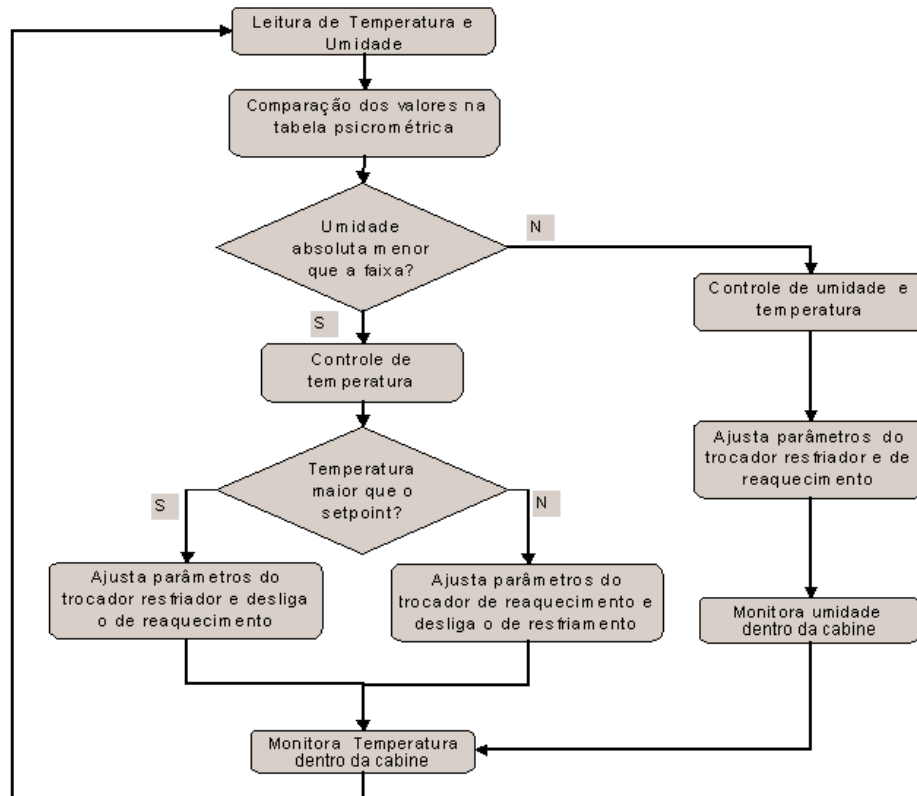


Figura 11: Arquitetura de controle proposta para a casa de ar

Analisando as informações obtidas nos gráficos acima, nota-se que a casa de ar simples consegue suprir o ar com valores de temperatura bem próximos do ideal dando uma folga de cerca de 1,6 °C dos limites de especificação, que é bom. Quanto à umidade relativa, a casa de ar simples supre o ar com valores dispersos, muitas vezes estourando os limites de especificação, o que é intolerável. Nota-se, entretanto, que os limites de controle, mesmo sem a implementação de controle de umidade, encontram-se próximo aos limites de especificação, logo a casa de ar simples tem a capacidade de prover o ar dentro da especificação. Capacidade não aproveitada corretamente conforme evidenciado pela alta dispersão dos valores, mostrando a falta de um controle de umidade.

## 7 IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle de umidade proposta pode ser separada em dois níveis de controle, a tomada de decisão e o controle de variáveis. Na tomada de decisão o controlador tem por função situar o ar ambiente succionado no diagrama psicrométrico, avaliar se nesse estado o sistema tem capacidade de atingir os objetivos, decidir qual ação será executada e ajustar os parâmetros de controle do nível mais baixo, o controle de variáveis, de forma a alcançar os objetivos traçados. O fluxograma abaixo mostra a sua atividade.



Fluxograma 1: Processo de tomada de decisão

Nesse processo, a leitura das variáveis, tanto as internas quanto as externas, é realizada através de transdutores de temperatura e medidores de umidade e transmitidas através de transmissores associados a esses instrumentos. Um CLP (Controlador Lógico Programável) coleta essas informações, processa os dados e ajusta os valores de parametrização do PID do nível de controle mais baixo, executado pelo próprio CLP.

O nível de parametrização depende exclusivamente da complexidade do controlador utilizado. Nela são ajustados a referência (setpoint) e os parâmetros de PID. Desta forma a dinâmica do controle pode ser ajustada conforme a necessidade do momento.

No sistema proposto, mostrado pelo diagrama de engenharia da figura 12, o controlador MIC representa o CLP, que executa a tomada de decisão e parametriza o sistema de forma a atingir os objetivos, tomando como referência para a parametrização as variáveis de entrada, as variáveis de saída e os valores ideais dentro da cabine. TT e MT são os transmissores de temperatura e transmissor de umidade relativa, respectivamente.

São utilizados somente dois transmissores a mais que os existentes, um MT e um TT.

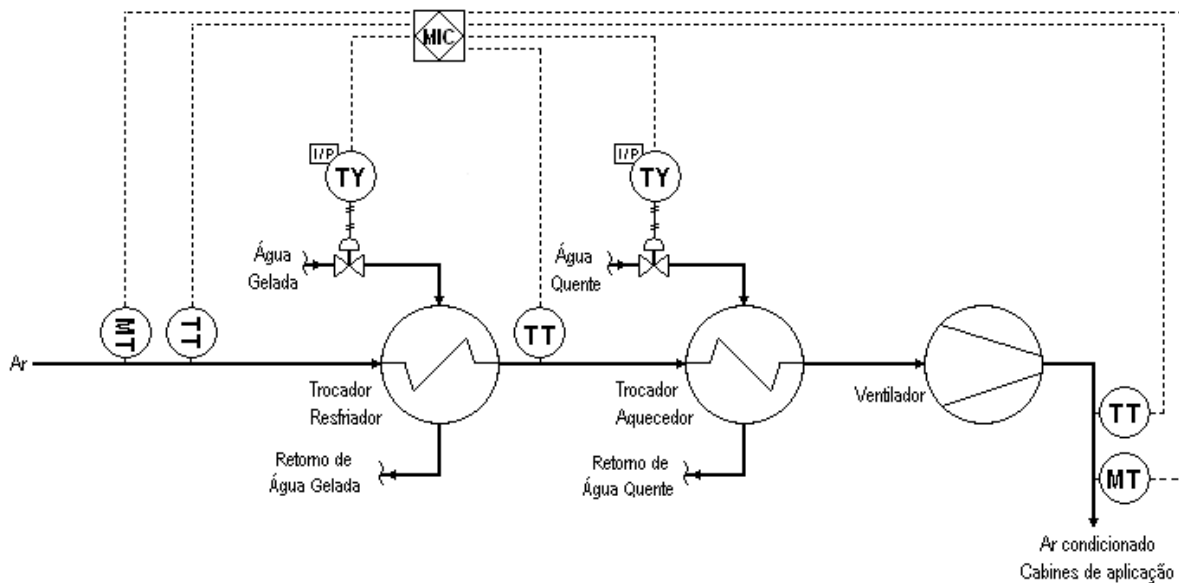


Figura 12: Arquitetura de controle proposta para a casa de ar

## 8 CONCLUSÃO

A casa de ar simples é mal aproveitada. Apesar de não ter sido implementada com a função de controle de umidade, tanto em infra-estrutura física de atuadores, quanto em automação, ela possui capacidade, mesmo de forma limitada, de realizar esse controle. Além disso, o processo a qual está associada requer esse controle, pois o problema realmente interfere no processo.

Somente se verá o real impacto que a umidade tem sobre a formação de crateras através da implementação de um controle de umidade.

A proposta de controle apresentada nesse trabalho é relativamente barata considerando-se que não haverá investimento na compra de elementos de atuação (trocadores de calor e sistema de pulverização de água) que são muito mais caros do que os instrumentos de medição (transmissor de temperatura para malha de controle de resfriamento e transmissor de umidade da cabine de pintura).

## 9 BIBLIOGRAFIA

CHECKLIST DE ACOMPANHAMENTO DE UMIDADE DAS CABINES DE PINTURA.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA DE UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Tópicos dos conhecimentos básicos no estudo de trocadores de calor. Disponível em: [www.pfmilcent.eng.br/topicosTC%20c%2022007.pdf](http://www.pfmilcent.eng.br/topicosTC%20c%2022007.pdf). Acessado em: 10/11/09

MANUAL DAS CABINES DE PINTURA FORD AMAZON DURR.

SISTEMA SUPERVISÓRIO EMOS FORD AMAZON DURR.

TERMODINÂMICA IV: Mistura ar e vapor d'água – Introdução. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/termo/termod0410.shtml>. Acessado em: 10/11/09