

Projeto e Estudo de Caso da Implementação de um Controle MPC em Sistemas HVAC para Salas Limpas do itt-Chip/Unisinos^{*}

Cristian F. dos Santos^{*} Rodrigo I. G. Mejia^{*}
Tiago A. Pereira^{*}

^{*} Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica,
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, RS,
(e-mail: crisfigueiredo@edu.unisinos.br, rmejia@unisinos.br,
tiagoanacleto@edu.unisinos.br).

Abstract: This work presents the development of an advanced control solution for HVAC systems dedicated to the Air conditioning from a clean room at the itt-Chip / Unisinos institute. HVAC systems (*Heating Ventilation and Air Conditioning*) are responsible for a large part of the semiconductors production costs because of the need to control temperature, humidity and internal pressure of the controlled environments. Due to the enormous potential of contribution, a multivariable predictive control system was developed at an application-level to meet the control specifications required by the technological institute. In order to obtain the predictive controller design, it proceeded with the psychometric processes characterization and parametric modeling from response tests. Servo and regulatory behavior and the evaluation of an energy consumption index (ECI) were carried out compared to the PID controller installed. The results demonstrate an excellent servo and regulatory response and a reduction in the energy consumption index between 80 and 90 %, depending on the chosen predictive controller tuning.

Resumo: O presente trabalho apresenta a aplicação de uma solução de controle avançado para sistemas HVAC dedicado ao condicionamento de ar de uma sala limpa do instituto itt-Chip/Unisinos. Sistemas HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*) são responsáveis por grande parcela dos custos de produção de semicondutores por conta da necessidade do controle de temperatura, umidade e pressão interna dos ambientes controlados. Por conta do grande potencial de contribuição ao mercado de semicondutores, foi desenvolvido um sistema de controle preditivo multivariável em nível de aplicação visando o atendimento das especificações de controle requeridas pelas salas limpas do instituto tecnológico. De modo a obter-se a síntese do controlador preditivo, foi realizada a caracterização dos processos psicrométricos e modelagem paramétrica a partir de ensaios de resposta. Foram desenvolvidos ensaios do comportamento servo e regulatório do controlador preditivo e a avaliação de um indicador de consumo energético (ECI) dos benefícios energéticos quando comparado com o controle PID originalmente instalado. Os resultados revelaram um bom comportamento servo e regulatório do controle MPC e uma redução no indicador de consumo energético que pode variar entre 80 e 90%, a depender da sintonia escolhida para o controle preditivo.

Keywords: HVAC; Model Predictive Control; MPC; Clean Room; ECI.

Palavras-chaves: HVAC; Controle Preditivo; MPC; Sala Limpa; ECI.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*), representam grande parte do consumo energético em edificações no mundo. Esses sistemas, além de promover níveis adequados de conforto térmico, também são parte fundamental de processos produtivos que requerem um controle de umidade, temperatura e pressão de ambientes controlados, como por exemplo, no processo de encapsulamento e produção de circuitos integrados. A

redução do consumo energético é basicamente o objetivo principal de muitos projetos em nível de simulação e de aplicação prática na indústria, como meios de melhorar margens de lucro das organizações limitando também o impacto ambiental. Segundo relatório de Watson et al. (2019), o fracasso global na redução das emissões de carbono custará ao mundo US\$ 2 bilhões/dia até o ano de 2030. Muitos trabalhos evidenciam o notável potencial na redução do consumo energético alcançado no uso de técnicas avançadas de controle, como Yu (2012); Razmara et al. (2015); Salsbury e Mhaskar (2013). Segundo Zajic et al. (2011) estratégias de controle avançado possuem um maior potencial de economia uma vez que a lei de controle obtida é baseada num processo de otimização

^{*} O presente trabalho foi realizado com apoio do itt Chip - Instituto Tecnológico de Semicondutores da Universidade Unisinos. Os autores agradecem ao coordenador Prof. Celso Peter e à empresa HT Micron Semicondutores pelo financiamento.

restritivo, além de considerar a interação entre as variáveis e as limitações do sistema. Além disso, segundo Butcher e Yarham (2000), ao menos 15% do consumo energético total de um sistema HVAC típico pode ser reduzido somente com melhorias no ajuste de sintonia dos controladores. As considerações anteriores, revelam um grande potencial de melhoras na aplicação de uma estratégia de controle avançado em um sistema HVAC, resultado de evidente interesse para a indústria, sociedade e comunidade científica. Neste trabalho foi utilizada a infraestrutura de pesquisa do Instituto Tecnológico Itt Chip como estudo de caso, buscando entender os pré-requisitos específicos de redução de energia. Porém vale ressaltar que os ganhos obtidos no desenvolvimento deste trabalho se estendem a inúmeros processos industriais, residenciais ou prediais, com ou sem especificações para salas limpas (Butcher e Yarham, 2000).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na última década inúmeros estudos foram divulgados validando a aplicação de sistemas de controle MPC em diferentes aplicações. Uma revisão do estado da arte da aplicação de MPC em sistemas prediais foi recentemente publicada por Serale et al. (2018), o qual relaciona o crescimento do MPC em popularidade com a evolução dos sistemas computacionais em custo e desempenho. Esse estudo se destaca por suprir uma necessidade de estruturar o conhecimento sobre o tema servindo como uma importante fonte de consulta nesse contexto. Nesta revisão, é ressaltado o potencial de bons resultados em termos de economia de energia e desempenho utilizando-se um sistema de controle baseado em um processo de otimização restritiva. Além disso, o ASHRAE Handbook (2013) descreve as alternativas de controle para sistemas HVAC salientando que geralmente há a aplicação de controles tradicionais em sistemas prediais enquanto há uma margem para a aplicação de estratégias de controle avançado que possam englobar todo o sistema predial, podendo inclusive estruturar-se em uma camada acima do controle regulatório. O impacto da implementação de MPC em sistemas prediais fora do contexto de salas limpas também está em destaque nesse estudo, tendo em vista que cerca de 40% da energia primária dos Estados Unidos está atualmente direcionada para prédios residenciais e comerciais, segundo relatório do *U.S. Energy Information Administration*, EIA (2016). A revisão feita por Serale et al. (2018) ainda apresenta os elementos críticos da aplicação do MPC, os quais tem impacto direto no problema de otimização: Distúrbios, Restrições, Modelagem, Horizontes de predição e controle, Função custo. A revisão do problema de otimização sob a ótica desta revisão foi fundamental ao planejamento, sendo que pode-se revisar a decisão sobre a estrutura do MPC para o caso do itt-Chip.

Considerando-se as não linearidades envolvidas no modelo fenomenológico do sistema, o uso de modelos lineares ao redor de um ponto de operação estável é uma alternativa tradicionalmente empregada estudada em diferentes livros como Camacho e Bordons (1999).

2.1 Modelagem paramétrica de sistemas HVAC no MPC

No trabalho de Mustafaraj et al. (2010) foram apresentadas alternativas para modelagem paramétricas utilizando-se estruturas diferentes e validando-as diante dos valores

medidos de uma planta real. Para estimação dos parâmetros foi utilizado o método do erro de predição (*Prediction Error Method*) e aplicados alguns indicadores que são utilizados para medir a qualidade do modelo, tais como MSE (*Mean squared error*), MAE (*Mean Absolute Error*) e GOF (*Goodness of Fit*). O coeficiente de determinação, R^2 chegou a valores próximos a 0,9 nas predições de temperatura e umidade, utilizando-se a estrutura *ARMAX*, indicando um grande potencial para esse método. No mesmo ano, outros trabalhos podem ser citados com características semelhantes, como os trabalhos de Hariharan e Rasmussen (2010), Zajic et al. (2010), Platt et al. (2010). Embora a contribuição de Hariharan e Rasmussen (2010) esteja mais voltada para a estimação de parâmetros do sistema HVAC como vazão mássica de ar no sistema e pressão no evaporador, também existe uma etapa onde o autor apresenta os resultados da estimação de parâmetros utilizando *SIMPLEX* e mínimos quadrados não linear, tendo uma aproximação visivelmente muito boa, apesar de não haver a apresentação de indicadores para avaliar a qualidade do modelo. O trabalho de Zajic et al. (2011) utilizou uma abordagem semi-física caixa cinza baseada na obra de Ljung e Glad (1994) para obter o modelo para predição da temperatura de um ambiente. Foram utilizados um conjunto de dados coletados do sistema para realizar a aproximação com o modelo, obtendo uma aproximação de 89,8%. Uma etapa de validação utilizando-se o mesmo modelo para outro conjunto de dados foi aplicado, obtendo uma aproximação de 67,8%, o que indica que o modelo pode ter uma boa aproximação dependendo-se do ponto de operação do sistema. Outros autores desenvolveram métodos similares partindo-se de estruturas multivariáveis (espaço de estados) em virtude da crescente necessidade de técnicas de controle avançado como controle preditivo aplicadas a um sistema com grandezas acopladas (temperatura e umidade) como é o caso dos sistemas HVAC, porém sem uma validação consistente comparando-se a simulação do modelo paramétrico obtido com um sistema real. Desta forma, identifica-se nesse ponto um potencial para novos estudos nessa área. (Abdo-Allah et al., 2017; Castellanos Molina et al., 2014; Royer et al., 2014)

2.2 Indicadores de consumo energético para sistemas de controle

No trabalho de Mohammad et al. (2019) foi apresentada uma comparação entre duas estratégias de controle, MPC e PID *Fuzzy*, e como avaliação do consumo energético foi apresentada técnica de avaliação através do indicador ECI (*Energy Consumption Index*) conforme detalhamento em (1).

$$ECI = \sum_{t=0}^{\infty} \|e(t)\|^2 + \sum_{t=0}^{\infty} \|u(t)\|^2 \quad (1)$$

Sendo $e(t)$ o erro de seguimento de referência, e $u(t)$ o valor da variável manipulada, pode-se verificar que o primeiro termo está diretamente relacionado com o seguimento de referência e rejeição de perturbações do processo em malha fechada, enquanto o segundo termo está relacionado com o esforço de controle, ou também pode-se dizer que tem relação direta com o consumo energético do processo. A técnica apresentada por Mohammad et al. (2019) possui

considerável facilidade de implementação, uma vez que utiliza os próprios sinais das malhas de controle na avaliação do consumo de energia, sem a necessidade da estimação de parâmetros relacionados aos modelos fenomenológicos da planta. Além disso, a técnica apresenta um grande potencial para realizar-se a comparação entre dois tipos de controladores, devido ao fato que os sinais utilizados são obtidos a partir de ambas estratégias. A mesma estratégia foi utilizada no trabalho de Minchala-Avila et al. (2016), a partir das ideias de Bakhtiar e Hara (2004) e Chen et al. (2002) nas quais os autores buscam a obtenção da lei de controle através de estratégias de otimização restrita ao consumo energético do processo, utilizando ECI como um indicador de desempenho. Portanto, é de grande potencial o uso da técnica de obtenção de um indicador de consumo energético como forma de *benchmark* (utilizando-se um controlador como referência) para o caso do itt-Chip da Unisinos.

3. CONTROLE MPC PARA SALAS LIMPAS

O sistema HVAC das instalações do instituto itt-Chip é composto por um conjunto de elementos apresentados na Figura 1 para que sejam atendidos os níveis das variáveis controladas na sala limpa: temperatura, °C, umidade relativa, %, e pressão interna, Pa. O tratamento do ar para atender as especificações do ambiente controlado é realizado através da manipulação dos atuadores que compõe a AHU (*Air Handling Unit*). A relação entre os atuadores e cada uma das seções da AHU (S_0 , S_1 , S_2 , S_{ext} , e S_{ins}) são descritas a seguir:

A caixa de mistura é o elemento da AHU onde ocorre o encontro da massa de ar externo (S_{ext}) com a massa de ar que retorna da sala limpa (S_{ret}). A proporção de ar externo que entra na caixa de mistura frente o ar de retorno é definida pelo percentual de abertura do *damp*er de ar externo $D_{ext}(\%)$ e o percentual de abertura do Damper do ar de retorno $D_{ret}(\%)$. A ação de controle é enviada ao $D_{ext}(\%)$ e uma conexão mecânica entre eles garante que $D_{ext}(\%) + D_{ret}(\%) = 100\%$. A consequência da ação de controle ao $D_{ext}(\%)$, além de afetar a renovação de ar, implica no aumento da pressão interna da sala, uma vez que o ar de retorno encontra resistência no fechamento de $D_{ret}(\%)$.

O primeiro trocador de calor em serpentina/condensador realiza a troca de calor entre o ar da caixa de mistura (S_0) e a massa de água gelada fornecida pelo *chiller*. A ação de abertura da válvula de controle (VAG) tem relação direta com o aumento da vazão de água gelada na serpentina, que produz a redução da umidade absoluta, $g_{água}/kg_{ar\ seco}$, e da temperatura, °C, na seção S_1 .

O trocador de calor em serpentina de aquecimento realiza a troca térmica entre a massa de ar que passa pela seção S_1 e a massa de água aquecida pelo *boiler*. A ação de controle de abertura de (VAQ) tem relação direta com o aumento da vazão de água quente e consequentemente com o aumento da temperatura do ar na seção S_2 .

O ventilador (Fan) é o elemento que atua na transmissão de energia cinética à massa de ar que passa pela AHU. A ação de controle voltada ao ventilador produz o aumento da velocidade do ar no interior da unidade e aumento da pressão interna do ambiente controlado.

3.1 Escolha da estrutura de controle

As variáveis manipuladas foram escolhidas a partir da infraestrutura da AHU existente nas instalações a partir da observação dos elementos que alteram os estados das variáveis controladas. Além disso, foram evidenciados distúrbios medidos que interferem no desempenho de controle, e ocorrem por conta da entrada da massa de ar úmido a partir do ambiente externo: 1) Distúrbio de temperatura, °C; 2) Distúrbio de umidade absoluta, $g_{água}/kg_{ar\ seco}$. A umidade, portanto, possui um *setpoint* sob a unidade relativa à saturação (Umidade Relativa- UR , em %) enquanto que na síntese de controle adotou-se a razão de umidade, $g_{água}/kg_{ar\ seco}$, para melhor avaliar o distúrbio causado pela entrada de ar externo.

Um ponto importante foi a escolha da temperatura de insuflamento (temperatura em S_2) declarando-a no modelo como distúrbio medido. Essa estratégia melhorou consideravelmente o desempenho da variável controlada de temperatura, uma vez que há uma influência direta da temperatura de insuflamento com a predição da temperatura da sala no horizonte definido.

Tabela 1. Definição das variáveis do sistema HVAC.

Tipo ¹	Descrição	Sigla	Unidade
PV	Temperatura	T	°C
PV	Umidade Absoluta	UA	$g_{água}/kg_{ar\ seco}$
PV	Pressão interna	P	Pa
MV	Abertura VAG	VAG	% (0-100)
MV	Abertura VAQ	VAQ	% (0-100)
MV	Freq. Inversor - <i>Fan</i>	$Freq(\%)$	% (30-60Hz)
MV	Abertura D_{ext}	D_{ext}	% (0-100)
MD	Dist. Temperatura	DM_T	°C
MD	Dist. Umidade	DM_U	$g_{água}/kg_{ar\ seco}$

3.2 Identificação dos modelos

A obtenção dos modelos para o sistema multivariável passa pela observação de cada variável controlada frente à resposta de cada variável manipulada e distúrbios medidos. Inicialmente se obteve a matriz de influências de cada variável manipulada (MV) e cada distúrbio medido (MD) sobre as variáveis controladas, conforme sugere Campos et al. (2013). A construção do modelo MIMO (*multiple-inputs and multiple-outputs*) foi feita a partir da matriz com as funções de transferência obtidas em cada ensaio de resposta, para cada relação de influência. As funções de transferência obtidas para o estudo de caso são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Modelos das dinâmicas das variáveis controladas frente os sinais de teste.

$MV \backslash PV$	T	UA	P
VAG	$\frac{-0.6947 \cdot e^{-157.8s}}{(564.7s+1)^2}$	$\frac{-0.0682 \cdot e^{-100.9s}}{260.2s+1}$	0
VAQ	$\frac{0.3057 \cdot e^{-226.5s}}{(491.7s+1)^2}$	0	0
$Freq\%$	0	0	$\frac{0.1049 \cdot e^{-1.5s}}{1.24s+1}$
D_{ext}	0	0	$\frac{0.1684 \cdot e^{-9.33s}}{14.8s+1}$
DM_T	$\frac{0.6769 \cdot e^{-88.5s}}{(355.1s+1)^2}$	0	0
DM_U	0	$\frac{1 \cdot e^{-100s}}{200s+1}$	0

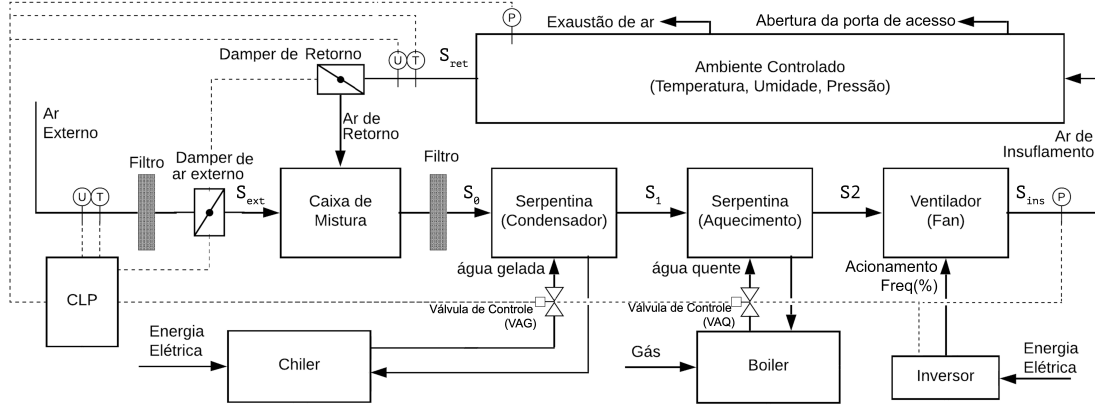


Figura 1. Representação do sistema HVAC completo do instituto itt-Chip/Unisinos utilizado como case de estudo na implementação do controle MPC.

Por conta da conservação de energia e massa do sistema, foi percebida uma forte característica integradora da resposta da variável controlada de temperatura T . Esse fato implica na definição dos sinais de teste como impulso para essa variável, ao invés de teste ao degrau. O impacto dos distúrbios medidos sobre as variáveis controladas foi observado sob medição em períodos onde há maior nível de distúrbios, como por exemplo, em períodos de calor e umidade externa elevados. O modelo de UA em relação ao distúrbio DM_U deve ser aproximado por conta de limitação de instrumentação na caixa de mistura. A modelagem da temperatura da sala (T) em função do distúrbio medido foi empregada a partir do impulso em VAG , e consequentemente na observação da temperatura da sala T frente à sua diferença para a temperatura na seção S_2 . A validação de cada função de transferência foi determinada pelo índice R^2 relacionando a soma do quadrado dos resíduos entre os dados do ensaio e a resposta do modelo. Os índices R^2 de cada função de transferência é apresentado na tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de determinação R^2 para cada função de transferência obtida

$MV \backslash PV$	T	UA	P
VAG	0.996	0.996	-
VAQ	0.997	-	-
$Freq\%$	-	-	0.975
D_{ext}	-	-	0.971
DM_T	0.994	-	-
DM_U	-	-	-

3.3 Problema de otimização do MPC para Salas Limpas

O problema de otimização resolvido iterativamente pelo MPC tradicionalmente conta com a resolução de uma função custo em (2) composta por quatro parcelas relacionadas a: seguimento de referência da variável de processo, $J_y(u_k)$, em (3); seguimento de referência das variáveis manipuladas, $J_u(u_k)$, em (4); supressão de movimento das variáveis manipuladas, $J_{\Delta u}(u_k)$, em (5); relaxamento de violação das restrições definidas para a função custo, $J_\varepsilon(u_k)$, em (6). A minimização da função quadrática resulta na obtenção da matriz com os valores das variáveis

manipuladas ótimas para que se atendam os pré requisitos de controle desejados. As equações a seguir são definidas para o instante k à frente do instante atual t , baseando-se nos sinais do tempo atual, resultando na notação $(t+k|t)$. (dos Santos, 2019, p.39).

$$\min J = \min [J_y + J_u + J_{\Delta u} + J_\varepsilon] \quad (2)$$

$$J_y = \sum_{n=1}^{n_y} \sum_{k=0}^{P_n} \{w_n^y [\hat{y}_n(t+k|t) - W_n(t+k|t)]\}^2 \quad (3)$$

$$J_u = \sum_{m=1}^{n_u} \sum_{k=0}^C \{w_m^u [u_m(t+k|t) - u_{ref}(t+k|t)]\}^2 \quad (4)$$

$$J_{\Delta u} = \sum_{m=1}^{n_u} \sum_{k=0}^C \{w_m^{\Delta u} [u_m(t+k|t) - u_m(t+k-1|t)]\}^2 \quad (5)$$

$$J_\varepsilon = \rho_\varepsilon \varepsilon_k^2 \quad (6)$$

Na sequencia descreve-se uma síntese dos processos realizados iterativamente pelo MPC, para obtenção do desempenho desejado:

- (1) Cálculo da resposta livre das variáveis de processo para o horizonte de predição: Leva em consideração a dinâmica das variáveis de processo frente os sinais de controle passados, com o impacto da predição dos distúrbios medidos;
- (2) Resolução do problema de otimização, obtendo-se o vetor com os sinais de controle que produzem a resposta forçada que atende as especificações de projeto definidas na função custo;
- (3) Aplicação do sinal de controle referente a primeira posição do horizonte de controle;
- (4) Leitura dos valores das variáveis de processo e novo cálculo da resposta livre para o horizonte de predição;
- (5) Novo processo de otimização com a resposta livre atualizada;

A aplicação do algoritmo de controle MPC para o sistema HVAC possui uma vantagem sobre o controle PID para as variáveis de temperatura e umidade absoluta, as quais possuem um forte acoplamento. Por exemplo, levando-se em consideração que há necessidade de atuação em

VAG para redução da umidade, haverá também impacto na redução da temperatura. Por conta da predição da dinâmica das variáveis controladas dentro de um horizonte futuro, o processo de desumidificação com controle MPC compensa o impacto na temperatura mesmo antes que o desvio da referência ocorra.

As condições de operação do sistema HVAC que definem as restrições do problema de otimização são listadas na Tabela 4. A definição das restrições deve levar em consideração os limites do processo, baseando-se no seu conhecimento prévio. É importante que sejam definidas, sempre que possível, faixas de operação para as variáveis do processo. Essa configuração permite liberar graus de liberdade para o controle ao desconsiderar do problema de otimização as variáveis que estão na faixa definida. Essa estratégia também deve reduzir o esforço de controle e consequentemente os custos de energia por conta do relaxamento do seguimento de referência das variáveis na faixa. O controle MPC permite a configuração de setpoint para as variáveis manipuladas (*Targets*) o que permite que sejam definidos os valores-alvo para obtenção do menor custo e especificações de operação.

Tabela 4. Parâmetros de restrição e configurações de otimização do MPC.

Variável	Condição ideal	Operação	min	max
T	23 °C	Setpoint	20	26
UA	11 gágua/kgar seco	Faixa	5	11
P	5 Pa	Setpoint	4	15
VAG	0%	Target	0	100
VAQ	0%	Target	0	100
D_{ext}	20%	Target	0	100
$Freq\%$	-	Livre	0	100

3.4 Sintonia dos parâmetros de ajuste do MPC

O processo de otimização quadrática realizado no algoritmo de controle preditivo recebe um conjunto de parâmetros de ajuste (horizonte de predição e controle, N e C ; pesos de cada parcela da função custo, w ; tempo de amostragem, T_s ; ajustes de penalização sobre violação de restrições, ρ_ϵ e ϵ) para cumprimento das especificações de controle. A etapa de sintonia requer o conhecimento detalhado do conjunto de processos psicrométricos envolvidos na AHU uma vez que a alteração de parâmetros de sintonia do MPC na estrutura multivariável procede a alteração da dinâmica de todo o sistema. O processo de sintonia do MPC pode partir de valores iniciais, conforme sugere o trabalho de Trierweiler e Farina (2003). A partir do ponto de partida, o aumento ou redução de valores de pesos na função custo revela-se menos intuitivo em comparação com a sintonia de controladores PID. No sistema HVAC é importante destacar a que a variável de pressão (P) possui grau de acoplamento com as demais variáveis controladas pouco significativo, e com constante de tempo consideravelmente inferior. Esse fato resulta na necessidade de ajustes específicos para o caso de salas limpas, onde a queda da pressão interna por conta de exaustão ou abertura de portas requer uma resposta prioritária sobre as demais. Considerando-se que a perturbação de pressão na rotina de operação da sala limpa seja de curta duração, pode-se dar prioridade para o seguimento de referência da Pressão sem prejudicar o o seguimento de referência das

demais variáveis controladas. Além disso, a perturbação de pressão se torna menos agressiva quando as salas limpas possuem uma ante câmara no acesso aos corredores, como é o caso do itt-Chip. Tendo em vista que existem duas variáveis manipuladas que possuem influência sobre a variável de Pressão ($Freq\%$ e D_{ext}), e considerando-se que a ação do D_{ext} resulta num aumento dos distúrbios medidos, deve-se priorizar a ação de $Freq\%$ reduzindo-se a supressão de movimento para essa variável.

A supressão de movimento das variáveis manipuladas VAG e VAQ tem impacto direto na redução de indicadores de consumo de energia. Porém, é necessário que haja cautela no aumento dos pesos de $J_{\Delta u}(u_k)$ pois a limitação de energia nos atuadores restringe o comportamento servo e regulatório, causando aumento de erro de referência, o que poderá causar oscilações na resposta da temperatura do ambiente controlado.

O resumo dos principais parâmetros de sintonia da função custo descritas na Equação 2 é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de sintonia iniciais definidos para o MPC do HVAC-itt-Chip.

Símbolo	Variável	Sintonia conservativa
w^y	$[T, UA, P]$	$[1000, 1000, 80]$
w^u	$[VAG, VAQ, Freq\%, D_{ext}]$	$[400, 400, 0, 80]^1$
$w^{\Delta u}$	$[VAG, VAQ, Freq\%, D_{ext}]$	$[1, 1, 1, 1]$
T_s	Tempo Amostragem MPC	10 segundos
N	Horiz. Predição	$1500/T_s$
C	Horiz. Controle	$375 (= N/4)$
ρ_ϵ	$[T, UA, P]$	1×10^{-2}
ρ_ϵ	$[VAG, VAQ, Freq\%, D_{ext}]$	1
ϵ_k	$[T, UA, P]$	1×10^5
ϵ_k	$[VAG, VAQ, Freq\%, D_{ext}]$	1×10^5

¹ Para sintonia agressiva, $w^u = [100, 100, 0, 80]$.

4. ESTUDO DE CASO: SALA LIMPA DO ITT-CHIP

Nesta seção são apresentados os procedimentos que devem ser utilizados para cumprir com os objetivos deste estudo.

4.1 Auditoria do sistema de automação e controle original

Uma avaliação completa das malhas de controle em operação é necessária como primeira etapa do projeto e implementação de uma nova estratégia de controle avançado. Nesta etapa são avaliadas as condições da instrumentação e infraestrutura de controle locais, buscando anomalias que interferem no resultado da lei de controle, como por exemplo, ruídos elevados nos sinais das variáveis, verificando o funcionamento de atuadores, posicionamento de sensores, ajustes das escalas dos sensores para a grandeza pretendida, entre outros. Considerando-se que o MPC deste trabalho foi concebido para manipular diretamente os atuadores da planta (ao invés de servir como uma camada de controle avançado sobre a camada regulatória) foi descartada a alternativa de avaliar os ganhos energéticos com a melhoria da sintonia do controle PID original.

4.2 Arquitetura do sistema para implementação

Após realizar uma auditoria completa das malhas de controle em operação no sistema HVAC do itt-Chip, foi também necessário avaliar um meio de realizar a integração

da infraestrutura local com o controlador MPC em nível de aplicação. O levantamento da infraestrutura local foi elaborado, avaliando-se alternativas para a realização da leitura e escrita das variáveis necessárias, processamento da lei de controle e aquisição de dados, conforme apresentado na Figura 2. A utilização de OPC (*Open Platform Communications*) foi considerada no intuito facilitar a comunicação dos controladores com o software contendo o algoritmo de controle MPC.

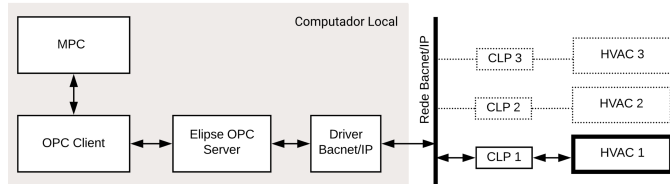


Figura 2. Representação da infraestrutura de testes e implementação.

4.3 Desenvolvimento sistema supervisório SCADA

A plataforma de desenvolvimento Elipse® E3 é uma ferramenta de desenvolvimento de um ambiente HMI/SCADA para monitoramento e controle de processos. Para o desenvolvimento do projeto, três softwares de Elipse® foram utilizados: *E3 Studio*, utilizado para desenvolvimento e configuração da aplicação; *E3 Server*, utilizado como o servidor das aplicações, sincronismo e redundância dos dados; *E3 Viewer*, utilizado para execução da aplicação desenvolvida como interface de operação do sistema e visualização de dados on-line. No estudo de caso do instituto itt-Chip o sistema SCADA será a plataforma para monitorar os indicadores de consumo de energia e desempenho, portanto, é a base onde deverão estar consolidadas as informações coletadas a partir do OPC as quais serão armazenadas em bancos de dados. Uma vez que o sistema de controle esteja finalizado, é importante que exista um sistema para viabilizar a avaliação do desempenho a partir de indicadores e dados, para manter-se o nível de desempenho do controle MPC ao longo do tempo. Além disso deve-se seguir as melhores tendências de interfaces de alto desempenho, com estilos e cores adequados. Na Figura 3 é apresentada uma das telas da HMI do SCADA desenvolvido para o processo relacionado às salas limpas do itt-Chip/Unisinos.

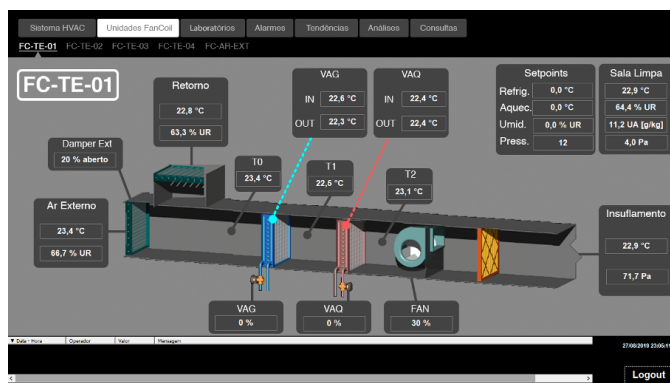


Figura 3. Interface do sistema SCADA para desenvolvimento do MPC.

5. RESULTADOS

Foi planejado um conjunto de testes para avaliar os resultados da aplicação do MPC em termos de desempenho. As duas sintonias detalhadas na Tabela 5 foram aplicadas de modo a se estudar as diferenças e o impacto na estabilidade do controle. Após finalização dos testes de desempenho foi analisado o consumo de energia aplicando-se o indicador ECI em ambos os controladores (MPC e controle PID instalado originalmente no sistema HVAC). O planejamento dos testes de desempenho foi detalhado na Tabela 6.

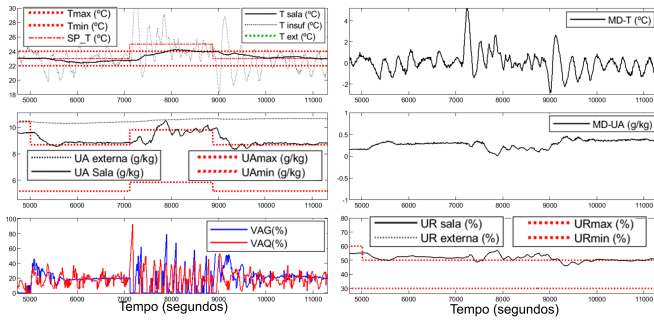
Tabela 6. Parâmetros de sintonia iniciais definidos para o MPC do HVAC-itt-Chip.

	MPC (Agressiva)	MPC (Conservativa)
Seg. Referência	T-1	T-2
Rejeição Perturbações	T-3	T-2
Respeito a restrições	T-1	T-5

Os primeiros testes realizados (teste 1 e 2) mostram o seguimento de referência, rejeição de perturbações, e o respeito às restrições aplicadas a variável de temperatura da sala limpa. Os testes relacionados à aplicação do índice de consumo energético ECI foram realizados sob condição de regime permanente sob mesmos *setpoint* para variáveis controladas, em um controlador por vez e no mesmo HVAC, podendo haver uma pequena interferência da variação de temperatura externa nos resultados. Conforme apresentado na Figura 4, foram estabelecidos limites para as variáveis de temperatura da sala e Umidade absoluta da sala para o teste 1. As restrições aplicadas à variável controlada de temperatura da sala correspondem a 1 °C, acima e abaixo do ponto de operação de 23 °C, portanto, mesmo que um *setpoint* fora dos limites estabelecidos seja escolhido, o controlador preditivo deve manter a variável dentro das restrições, o que fica evidente no teste 1. Percebe-se, portanto, o seguimento de referência da variável de temperatura e umidade absoluta, sob mudança das referências no instante aproximadamente igual a 7000 segundos e novamente retornando para a restrição no instante próximo a 9000 segundos. No instante de tempo igual a 8000 segundos é percebido que a referência está fora da faixa de restrições, porém a variável permanece com valor máximo de 24 °C, ou seja, o limite superior da restrição para temperatura. No ensaio T-1 a umidade absoluta externa está consideravelmente acima do setpoint de umidade absoluta desejada. Portanto, ao abrir-se o damper de ar externo, uma perturbação de umidade está agindo sobre o sistema, a qual é corrigida ao longo do tempo. Além disso, sabe-se que a umidade absoluta é levemente perturbada durante o processo de aquecimento por conta do aumento do calor latente na AHU e adsorção da umidade das superfícies da sala limpa, o que produz as oscilações na umidade absoluta (e consequentemente na umidade relativa).

Os testes realizados para obtenção de um Benchmark relacionando o indicador ECI do controlador preditivo frente ao indicador do controle tradicional do itt-Chip foram realizados levando-se o sistema ao ponto de operação e mantendo-o sob a mesma referência por um período de 10×10^3 segundos. Ao final desta etapa, foi obtido um vetor de dados contendo a evolução deste indicador frente à

Teste 1: Sintonia agressiva



Teste 2: Sintonia conservativa

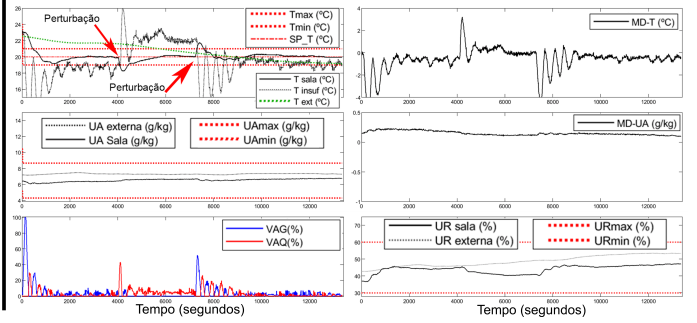


Figura 4. Testes de desempenho do controle MPC aplicado ao HVAC do itt-Chip, conforme planejamento detalhado na tabela 6.

evolução do indicador do controle PID original do itt-Chip, ao longo dos 10×10^3 segundos. Os resultados da aplicação do indicador ECI para ambas sintonias são apresentados nas Figuras 5 e 6.

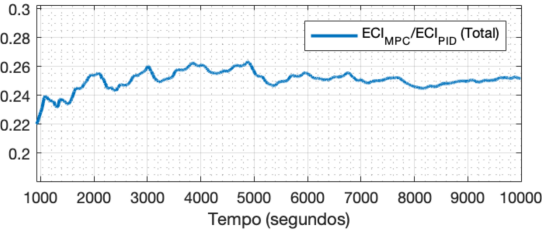


Figura 5. Evolução do ECI em regime permanente, sintonia agressiva.

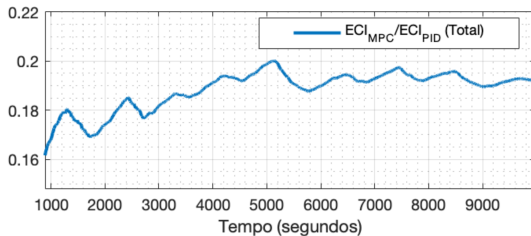


Figura 6. Evolução do ECI em regime permanente, sintonia conservativa.

CONCLUSÕES

Em resumo, foi comprovado que com o MPC temos as principais vantagens:

- (1) Melhoria de segurança de operação, por conta da consideração dos limites de operação de todas as variáveis controladas, garantindo que as restrições não sejam violadas;
- (2) Possibilidade de configuração de *targets* para as variáveis manipuladas, aumentando a versatilidade do controlador ao definir ajustes específicos para cada processo;
- (3) Redução do consumo de energia por conta do uso ótimo dos recursos, viabilizada pela minimização de uma função custo a cada período de amostragem;
- (4) Capacidade de configuração do MPC em uma camada de controle superior à camada regulatória, possibilitando a otimização de um sistema predial mais complexo;

- (5) Controle de múltiplas variáveis (acopladas ou não) sob uma única lei de controle;
- (6) Consideração do impacto dos distúrbios sobre as variáveis controladas na lei de controle;
- (7) Robustez frente a processos com atraso de transporte, em cenários de perturbações e mudança nas condições de desempenho;
- (8) Capacidade de deslocamento de pico de carga;
- (9) Melhorias na qualidade do ar do ambiente controlado e conforto térmico;
- (10) Redução no tempo de cálculo.

Por outro lado, algumas desvantagens podem ser listadas, em conclusão ao trabalho desenvolvido:

- (1) Necessidade de identificação de um modelo adequado ao sistema;
- (2) Custo de implementação por conta do investimento em infraestrutura;

Com relação à avaliação do controlador preditivo em termos de desempenho em mudanças de referências, pode-se concluir que a aplicação do controlador atende de maneira satisfatória o seguimento de referência e rejeição de perturbações das variáveis de temperatura, umidade e pressão interna do ambiente controlado. Também, como uma das principais vantagens na aplicação dessa estratégia avançada de controle, a aplicação do controlador se apresentou extremamente vantajosa para restringir as variáveis controladas dentro dos valores seguros para as instalações e a saúde das pessoas que ocupam a sala do instituto. Com relação aos testes relacionados ao controle de pressão ambiente da sala, pode-se concluir que o controlador preditivo atende as especificações de projeto elevando o nível da obtenção da lei de controle para outro patamar. Isso é justificado diante da capacidade que o controlador preditivo possui de seguir valores de objetivo das variáveis manipuladas (*targets*) podendo desta forma estabelecer-se um valor ideal para abertura do damper, de modo a apenas garantir a renovação de ar do ambiente. Conforme mencionado ao longo deste trabalho, a abertura do Damper em excesso permite o aumento dos distúrbios através da entrada do ar externo na AHU, fazendo com que o controle tenha que compensar distúrbios sem necessidade, e assim, desperdiçando energia. Portanto, do modo como foi configurado o MPC neste projeto, foi possível atingir o controle da pressão de ar do ambiente, com o mínimo distúrbio, podendo-se permitir a abertura do damper externo acima do target desde que o outro atuador atinja sua

capacidade máxima de atuação. Conforme apresentado na seção de Resultados, a aplicação do controlador preditivo no itt-Chip da Unisinos, conforme estabelecido na seção 4, resulta em uma redução no indicador de consumo energético em torno de 80% se sintonizado agressivamente e em torno de 90% se sintonizado de forma conservativa, considerando-se um cenário de regime permanente. Os resultados da aplicação dos indicadores, portanto, mostram a elevada economia de energia possível com a aplicação dessa estratégia de controle, mesmo que com uma sintonia agressiva. Observando-se os resultados gerais comparando-se ambas as formas de sintonia, pode-se concluir que a sintonia agressiva atende aos requisitos de controle em termos de desempenho de maneira mais eficiente, porém a sintonia conservativa resulta em um nível de eficiência ainda mais expressivo. A utilização da sintonia conservativa como modo de maior eficiência em conjunto com a sintonia agressiva em cenários onde se requer um maior desempenho, se mostra como uma alternativa para se extrair os maiores proveitos possíveis do controlador preditivo.

REFERÊNCIAS

- Abdo-Allah, A., Iqbal, T., e Pope, K. (2017). Modeling and Analysis of an HVAC System for the S.J. Carew Building at Memorial University. In *IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) Modeling*, 8–11. St. John's, NL, Canada.
- ASHRAE Handbook (2013). *Fundamentals, SI ed., American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers*.
- Bakhtiar, T. e Hara, S. (2004). Tracking performance limits for SIMO Discrete-Time Feedback Control Systems. *SICE Annual Conference*, 2, 1825–1830.
- Butcher, K. e Yarham, R. (2000). *Building control systems*. Butterworth-Heinemann.
- Camacho, E.F. e Bordons, C. (1999). *Model Predictive Control*.
- Campos, M.C.M.M., Gomes, M.V.d.C., e Perez, J.M.G.T. (2013). *Controle Avançado e Otimização na indústria do Petróleo*. 1a edição edition.
- Castellanos Molina, L., Vega Lara, B., e Monteagudo Yanes, J. (2014). Model identification of a tropical hotel suite room. *2014 3rd International Congress of Engineering Mechatronics and Automation, CIIMA 2014 - Conference Proceedings*, 1–5. doi:10.1109/CIIMA.2014.6983435. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/6983435/>.
- Chen, J., Hara, S., e Chen, G. (2002). Best tracking and regulation performance under control effort constraint: Two-parameter controller case. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 15(1), 497–502.
- dos Santos, C.F. (2019). *Controle Preditivo Aplicado a um sistema HVAC*. Dissertação de mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos.
- EIA (2016). Commercial buildings energy consumption survey (CBECS). *U.S. Department of Energy, Energy Information Administration*.
- Hariharan, N. e Rasmussen, B.P. (2010). Parameter estimation for dynamic HVAC models with limited sensor information. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 5886–5891. doi:10.1109/ACC.2010.5531211. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/5531211/>.
- Ljung, L. e Glad, T. (1994). *Modeling of dynamic systems*.
- Minchala-Avila, L.I., Palacio-Baus, K., Ortiz, J.P., Valladolid, J.D., e Ortega, J. (2016). Comparison of the performance and energy consumption index of model-based controllers. *2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2016*. doi:10.1109/ETCM.2016.7750825.
- Mohammad, N.N., Azman, A.A., Marzaki, M.H., Adnan, R., Tajjudin, M., Fazalul Rahiman, M.H., e Tajuddin, S.N. (2019). Performance comparison and energy consumption index between MPC and FuzzyPID in small-scaled agarwood distillation pot. *2018 9th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2018 - Proceeding*, (August), 156–161. doi:10.1109/ICSGRC.2018.8657575.
- Mustafaraj, G., Chen, J., e Lowry, G. (2010). Development of room temperature and relative humidity linear parametric models for an open office using BMS data. *Energy and Buildings*, 42(3), 348–356. doi:10.1016/j.enbuild.2009.10.001.
- Platt, G., Li, J., Li, R., Poulton, G., James, G., e Wall, J. (2010). Adaptive HVAC zone modeling for sustainable buildings. *Energy and Buildings*, 42(4), 412–421. doi:10.1016/j.enbuild.2009.10.009. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.009>.
- Razmara, M., Maasoumy, M., Shahbakhti, M., e Iii, R.D.R. (2015). Exergy-Based Model Predictive Control for Building HVAC Systems.
- Royer, S., Thil, S., Talbert, T., e Polit, M. (2014). Black-box modeling of buildings thermal behavior using system identification. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 19, 10850–10855. doi:10.3182/20140824-6-ZA-1003.01519.
- Salsbury, T. e Mhaskar, P. (2013). Predictive Control Methods to Improve Energy Efficiency and Reduce Demand in Buildings. *Computers & Chemical Engineering*, 51, 77–85.
- Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D., e Bemporad, A. (2018). Model Predictive Control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*, 11(3). doi:10.3390/en11030631.
- Trierweiler, J.O. e Farina, L.A. (2003). RPN tuning strategy for model predictive control. *Journal of Process Control*, 13(7), 591–598. doi:10.1016/S0959-1524(02)00093-8.
- Watson, R., McCarthy, H., Canziani, P., Nakicenovic, N., e Hisas, L. (2019). The Truth Behind the Climate Pledges.
- Yu, Y. (2012). *MODEL-BASED MULTIVARIATE CONTROL OF CONDITIONING SYSTEMS FOR OFFICE BUILDINGS*. P.h.d. dissertation, Carnegie Mellon.
- Zajic, I., Larkowski, T., e Hill, D. (2011). Energy consumption analysis of HVAC system with respect to zone temperature and humidity set-point. 4576–4581.
- Zajic, I., Larkowski, T., Hill, D., e Burnham, K.J. (2010). Temperature model of clean room manufacturing area for control analysis. *The institute of engineering and technology*, 1251–1256. doi:10.1049/ic.2010.0460. URL <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ic.2010.0460>.