



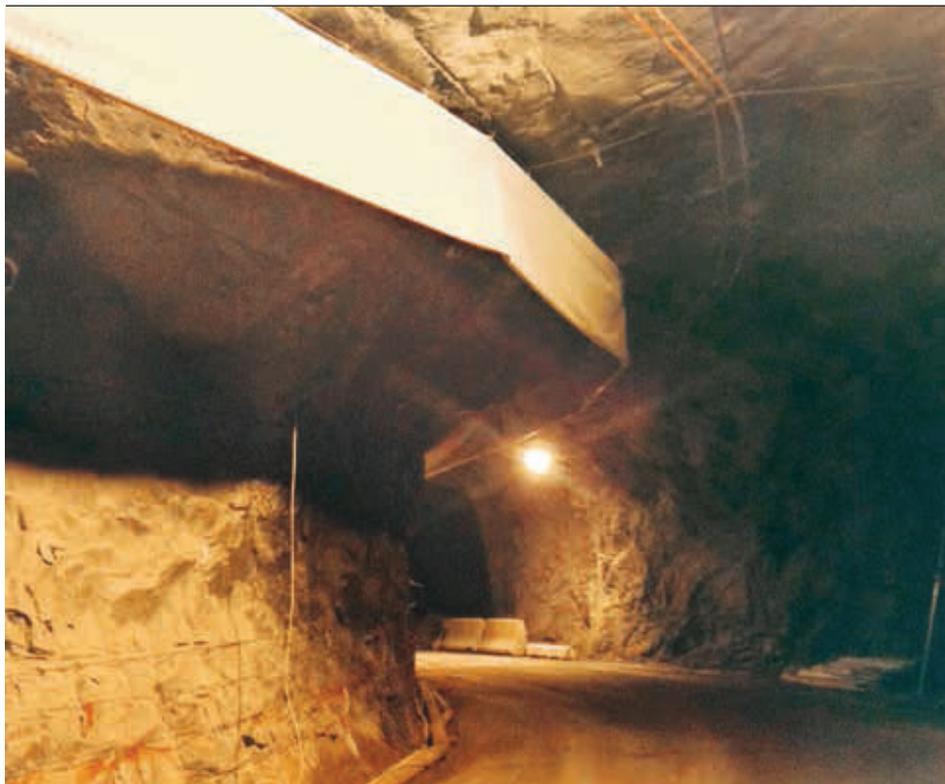
Respire fundo

Optimizando os caudais
de ar em minas
subterrâneas

Entre Agosto e Outubro de 2010, o mundo susteve a respiração. Encurralados a uma profundidade de 700 metros no deserto do Atacama, no Chile, estavam trinta e três mineiros. A sua situação chamou a atenção para os frágeis elementos essenciais para a vida: temperatura ambiente, nutrição, água e ar. Com o aumento do preço das matérias-primas, recursos previamente “inacessíveis” tornam-se economicamente viáveis. Mas não são os atractivos preços de mercado ou os limiares de investimento que permitem ultrapassar os desafios físicos e técnicos que a exploração desses recursos remotos acarreta. As limitações físicas permanecem, definindo claramente o que pode ser obtido de uma forma razoável e, ainda mais importante, segura. Mas continuam a surgir e a evoluir novas tecnologias que permitem à Humanidade uma redefinição constante destas limitações. São atingidas novas fronteiras, mas apenas depois de ser assegurado que os sistemas de suporte de vida acompanham essa evolução.

A ventilação consome uma quantidade significativa de energia, tipicamente 100 GWh/ano, podendo representar até 50 por cento do consumo total de energia da mina.

1 Uma conduta de ventilação numa mina subterrânea



As minas subterrâneas actuais operam frequentemente a profundidades até 2500 m, indo algumas minas de ouro a profundidades até 3600 m. Como termo de comparação, esta profundidade é da mesma ordem de grandeza da altitude de La Paz, na Bolívia. As tendências futuras vão no sentido de explorações mineiras em localizações remotas, principalmente subterrâneas e a profundidades cada vez maiores. A indústria mineira, caracterizada actualmente por um elevado grau de tarefas móveis mecanizadas em ambientes adversos, encontra-se activamente à procura de soluções automatizadas para a satisfação dos requisitos futuros de operações seguras, sustentáveis e produtivas.

O ar nas minas subterrâneas encontra-se poluído por gases nocivos, tais como monóxido e dióxido de carbono e óxidos de azoto, provenientes de motores diesel e de operações de dinamitação, e também radão e metano, como gases nativos em minas de carvão. Um ambiente de trabalho seguro exige uma ventilação apropriada →1, tendo como objectivo a distribuição de ar fresco às áreas de produção onde se encontram os mineiros. É uma função de suporte que interage fortemente com a produção. A ventilação consome uma quantidade significativa de energia, tipi-

camente 100 GWh/ano, podendo representar até 50 por cento do consumo total de energia da mina.

Presentemente, ventiladores primários à superfície alimentam a mina com ar fresco, o qual é distribuído por meio de ventiladores e/ou reguladores de ar às zonas subterrâneas que o requerem. O ar de entrada pode necessitar de aquecimento ou arrefecimento. A tecnologia mais moderna de controlo é a ventilação a pedido (VoD, Ventilation on Demand); contudo, muitas minas não são controladas de todo. Mas mesmo a VoD apresenta desvantagens, nomeadamente (i) a ausência de controlo de feedback e (ii) a utilização de modelos de relação ventilador/regulador de ar demasiado complexos ou pouco precisos.

A ABB dispõe presentemente de um método novo e exclusivo de controlo dos ventiladores que inclui uma sua coordenação global da qual resulta uma solução fiável e energeticamente optimizada que automaticamente alimenta a mina com os caudais desejados. Esta solução é baseada em modelos empíri-

cos e opera a partir de sinais de feedback provenientes de sensores de ar, que podem ser, por exemplo, sensores de gás, de caudal ou de temperatura. Modelos multivariáveis mostram como uma alteração na velocidade dos ventiladores afecta o caudal e a pressão do ar através deles. Os parâmetros dos modelos são obtidos empiricamente a partir de dados operacionais, o que os torna facilmente adaptáveis a novas condições.

O ar fresco tem de ser distribuído às áreas de produção onde se encontram os trabalhadores mineiros, eventualmente com a necessidade do seu aquecimento ou refrigeração.

Controlo Preditivo (MPC)

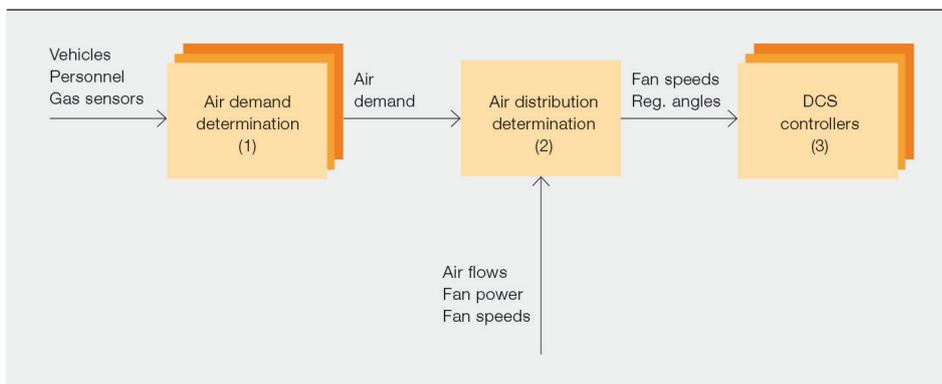
O controlo avançado de processos tem sido aplicado com sucesso em muitas áreas, p.ex., nos processos químicos e na refinação. A abordagem mais prevalente é a do controlo preditivo (MPC, Model Predictive Control), cujas origens remontam à década de 1970.

Foto de rosto

Um terço do cobre a nível mundial provém de minas do deserto mais seco do mundo, o Atacama, no Chile. Foto © 2013 Michael Vogel.

Através de uma identificação automatizada de sistemas baseada em dados operacionais ou em experiências ad-hoc, o modelo dinâmico pode ser facilmente ajustado às novas condições.

2 Perspectiva geral da função de controlo da ventilação da mina



Um controlador MPC utiliza um modelo explícito para a previsão da resposta futura de uma instalação. É então possível determinar sinais de controlo que afectam a instalação e assim, poderá ser obtida a resposta desejada da instalação. Uma vez que o comportamento desejado é frequentemente um compromisso entre objectivos contraditórios, a “melhor” solução é obtida a partir da formulação de um problema de optimização. Para este fim, é essencial um modelo dinâmico da instalação. A obtenção de um tal modelo pode ser uma tarefa morosa.

Nos projectos industriais com controlo de processos avançados (APC), normalmente o esforço mais substancial é

serão adicionados neste processo. Além destas alterações controladas, podem também ocorrer alterações não planeadas das estruturas, p.ex., depois de operações de dinamitação. Através de uma identificação automática de sistemas baseada em dados operacionais ou em experiências ad-hoc, o modelo dinâmico pode ser facilmente ajustado às novas condições.

Perspectiva geral

A nova abordagem à ventilação de minas tem similaridades com a tecnologia VoD actualmente utilizada. A estrutura pode ser dividida em três níveis para ambos os tipos de soluções, representada sinopticamente em →2.

Modelos multivariáveis mostram como uma alteração na velocidade dos ventiladores afecta o caudal e a pressão do ar através deles.

despendido na obtenção de um modelo suficientemente bom. Usualmente, a construção do modelo envolve uma fase de teste da instalação, na qual se exercem as entradas de forma a excitar as saídas. Os sinais observados em tal processo são registados e utilizados para a elaboração, por métodos matemáticos, de um modelo. Este processo é designado por identificação do sistema [2].

A nova abordagem à ventilação de minas é inspirada na metodologia MPC. As alterações que ocorrem constantemente numa mina subterrânea constituem um desafio importante para a tecnologia MPC: a geografia da mina encontra-se em constante alteração decorrente da abertura de novos túneis e do encerramento de túneis já trabalhados. Novos ventiladores e condutas de ventilação

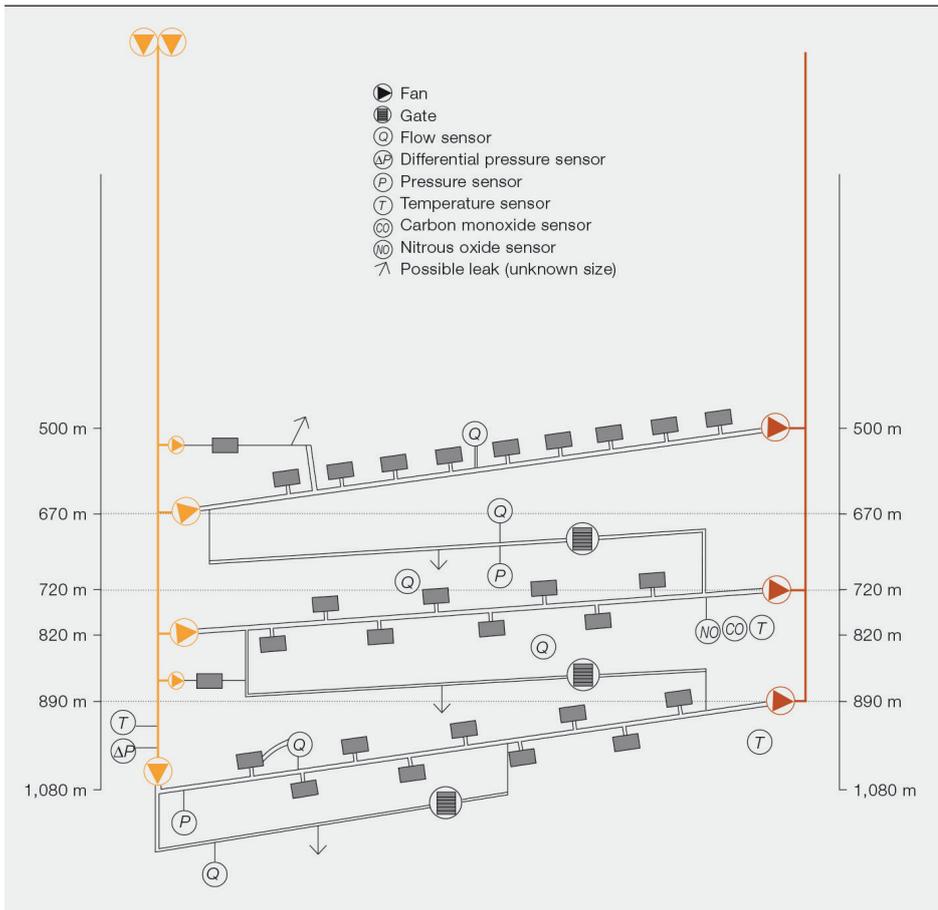
1) O primeiro nível determina os caudais de ar necessários nas várias zonas da mina a partir da necessidade da presença de veículos e pessoas em localizações específicas.

Estes valores podem tam-

bém depender de dados de sensores, p.ex., relativos a concentrações de vários tipos de gases. Podem também existir zonas onde exista interesse na manutenção dos caudais em valores mínimos, p.ex., para o controlo de caudais em rampas de acesso.

2) A funcionalidade de segundo nível determina a distribuição do ar por meio da optimização da velocidade dos ventiladores que impulsionam o ar através da mina. As velocidades óptimas são determinadas a partir dos valores de caudal desejados nas várias zonas, e das propriedades dos ventiladores e dos motores que os accionam. Este segundo nível pode também incluir os ângulos de abertura dos reguladores de ar utilizados para controlar os caudais de ar. As velocidades dos ventiladores e os ângulos

3 Diagrama esquemático da mina utilizada para ensaios



A velocidade óptima do ventilador é determinada a partir dos caudais desejados nas várias zonas, e das propriedades dos ventiladores e dos motores que os accionam.

dos reguladores são determinados de forma a minimizar a potência total despendida para a satisfação dos caudais requeridos. Esta optimização é baseada num modelo que relaciona a variação das velocidades do ventilador com a variação dos caudais de ar e com a potência utilizada.

alteração de velocidade de um ventilador irá afectar não só o caudal no local desse ventilador, mas também caudais noutros locais da mina. É esta interacção que dificulta o controlo óptimo dos caudais. É portanto importante que o modelo capture este comportamento.

3) Os valores óptimos das velocidades dos ventiladores e dos ângulos dos reguladores são então utilizados como pontos de referência para os controladores no nível inferior do sistema de controlo distribuído (DCS).

Na nova solução MPC, a optimização global da distribuição de ar é realizada no segundo nível.

Modelização

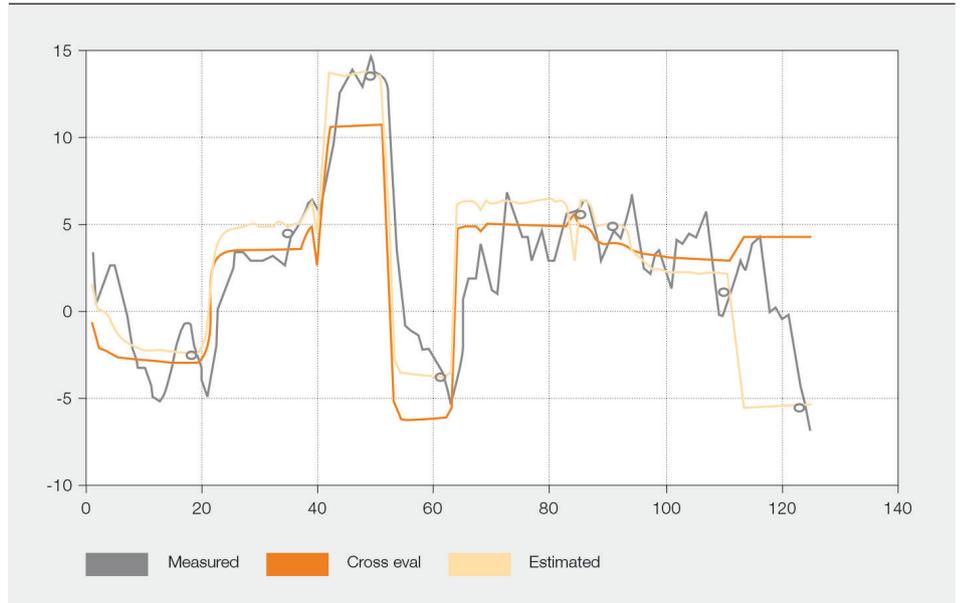
A distribuição do ar na mina é afectada pela velocidade dos ventiladores e pelos ângulos de abertura dos registos de saída, se existentes. Estas variáveis são os actuadores neste sistema de controlo. Existe interacção entre os actuadores e os caudais de ar na mina. Isto significa, por exemplo, que a

As velocidades dos ventiladores e os ângulos dos reguladores são determinados de forma a minimizar a potência total despendida para a satisfação dos caudais de ar requeridos.

Seria possível a utilização de modelos dinâmicos multivaráveis para a descrição da mina. Tais modelos são utilizados em muitas aplicações, p.ex., na indústria da refinação. Uma desvantagem destes modelos reside no esforço substancial necessário para a sua obtenção. Tal facto é aqui indesejado, dada a alteração constante da geografia da mina. Não é de todo prático ou útil despendir semanas na construção de um novo modelo dinâmico de elevada precisão de cada vez que ocorre uma alteração.

O objectivo do controlo é a minimização da potência necessária para a manutenção dos caudais desejados nos diferentes locais especificados.

4 Avaliação de um modelo



No caso presente é utilizado um simples modelo estático multivariável, capaz de capturar a interacção essencial e o impacto de alterações nos actuadores. O modelo é descrito em forma incremental por:

$$\begin{aligned}\Delta Q &= H_q \Delta \beta \\ \Delta p &= H_p \Delta \beta \\ \Delta E &= H_e \Delta (\beta^3)\end{aligned}$$

onde Q é um vector dos caudais de ar medidos, p é um vector das pressões de ar medidas nos ventiladores, β e E são vectores das velocidades e das potências dos ventiladores, respectivamente. O símbolo Δ indica a variação entre duas amostras consecutivas. Os coeficientes nas matrizes H_q , H_p e H_e são obtidos a partir de experiências simples, ou de dados operacionais normais que permitem a automatização do processo de identificação de sistemas.

Medições

A identificação de um modelo do sistema de ventilação da mina útil para fins de controlo requer a medição de um conjunto de variáveis.

- Concentrações de gases e/ou caudais de ar nos vários locais a serem controlados
- Potências dos ventiladores a serem controlados
- Velocidades dos ventiladores a serem controlados
- Pressões de ar nos ventiladores

O controlador ajusta a velocidade real do ventilador de acordo com os caudais desejados.

Controlo

O objectivo do controlo é a minimização da potência necessária para a manutenção dos caudais desejados nos diferentes locais especificados. Os caudais de ar nas zonas de produção devem estar acima de um valor pré-estabelecido. Outros locais podem ter um requisito de caudal tão pequeno quanto possível.

Esta situação pode ser formulada como um problema de optimização onde as novas velocidades dos ventiladores são determinadas de forma a minimizar a potência utilizada.

O processo de minimização toma em consideração restrições sobre os caudais e as pressões diferenciais:

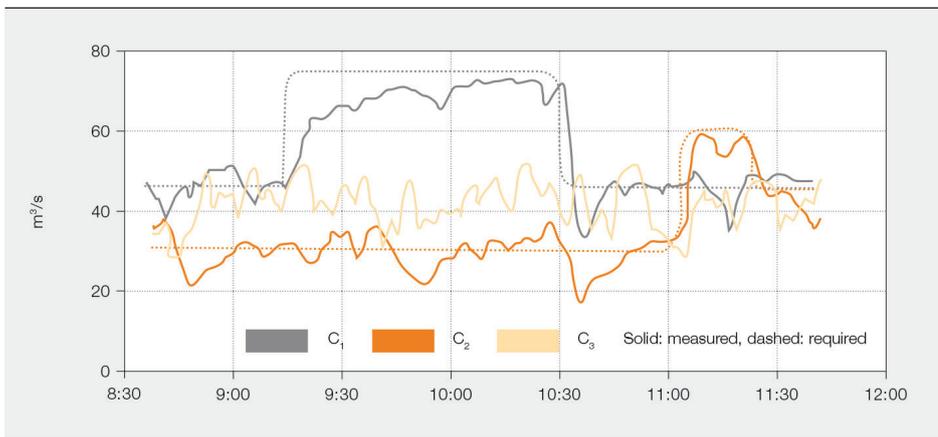
$$\begin{aligned}Q_{lo} \leq Q(k) \leq Q_{hi} \\ \Delta p_{lo} \leq \Delta p(k) \leq \Delta p_{hi}\end{aligned}$$

Além destas, existem também restrições sobre as velocidades dos ventiladores:

$$\beta_{lo} \leq \beta(k) \leq \beta_{hi}$$

Este problema de optimização é resolvido por um processo cíclico, originando regularmente novos valores para as velocidades dos ventiladores. Os valores iniciais para cada passo de optimização são fornecidos por valores filtrados dos sinais medidos.

5 O sistema exibindo o ajuste dos caudais de ar em resposta a uma variação em degrau dos requisitos



A entrada e saída permanente de veículos nas áreas de produção implica uma alteração constante dos requisitos de ar para estas áreas.

Ensaio de campo

O novo método de controlo para a ventilação optimizada de minas foi testado numa mina subterrânea em operação, já equipada com um sistema VoD da ABB interligando todos os sensores e ventiladores

Um diagrama esquemático da mina encontra-se representado em →3. A área controlada da mina consiste em três níveis de produção entre as profundidades de 500 m e 1800 m. Existem dois ventiladores na entrada de ar à superfície, mais um ventilador na entrada e outro na saída de ar de cada nível de produção. A linha laranja representa ar fresco que entra e a linha castanha ar poluído que sai. Em cada nível, e nos túneis de acesso entre níveis, a velocidade do ar é medida por sensores ultrasónicos de caudal, marcados com um Q no diagrama. Para cada ventilador, é também medido o aumento da pressão estática.

A entrada e saída permanente de veículos nas áreas de produção implica uma alteração constante dos requisitos de ar para estas áreas, a qual é satisfeita por alterações às velocidades dos ventiladores induzidas pelo actual sistema VoD.

Os sinais recolhidos neste sistema são utilizados para a identificação do modelo. Depois de filtragem apropriada, em particular para a remoção de variações de alta frequência, os modelos estáticos da mina, descritos acima, são identificados a partir de um simples método de ajuste por mínimos quadrados. Representa-se em →4 uma avaliação simples de dois desses modelos. Um dos

modelos foi identificado a partir dos dados medidos representados na figura (“Estimados”), e o outro (“Avaliação cruzada”) foi identificado a partir de um conjunto de dados completamente diferente.

O optimizador dos ventiladores, baseado nos modelos identificados, foi testado no decurso de dois dias durante os quais a ventilação dos níveis de produção foi controlada pelo optimizador. O resultado, registado durante o ensaio por um System 800xA da ABB, está representado em →5. O diagrama mostra como, em resposta a uma variação em degrau nos caudais desejados, o sistema ajusta os caudais de ar no primeiro nível (curva cinzenta) e no segundo nível (curva laranja escuro) dos três níveis da mina.

Apesar da natureza evolutiva da mina, não há quebra nas eficiências de que beneficia.

Representa-se em →6 outro registo da operação, onde se observa a redução substancial de potência conseguida pelo optimizador mantendo os caudais desejados. Os ensaios mostraram a viabilidade de uma redução de potência de 30 a 50 por cento relativamente ao sistema existente, mantendo os mesmos valores de caudal.

Conclusões

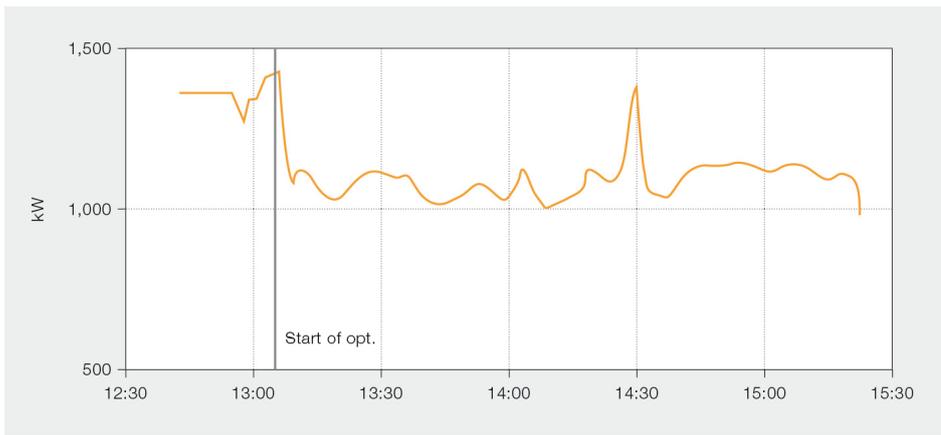
Os ensaios de campo indicam que a aplicação de um simples modelo empírico ao sistema de ventilação de uma mina subterrânea pode conseguir:

- Controlo automático de um ambiente de trabalho saudável numa mina, ajus-

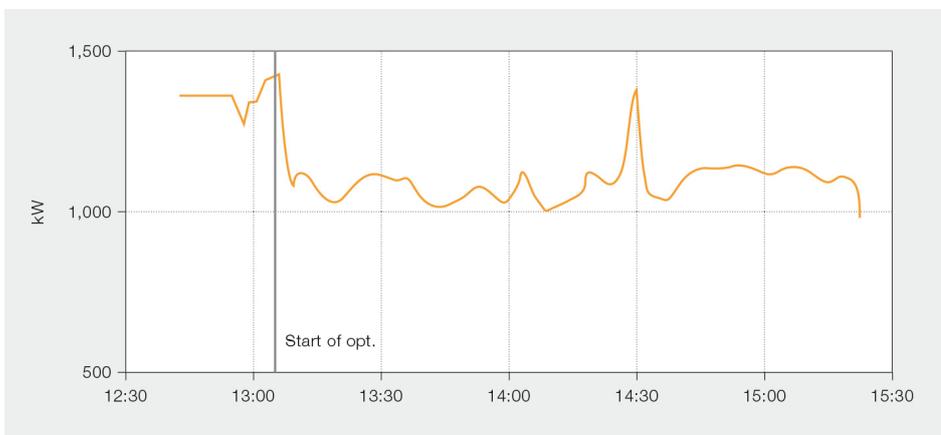
6 Diagrama da operação do modelo mostrando a redução da potência utilizada



6a Potência total dos ventiladores



6b Caudais nas células



6c Caudais nas rampas de acesso

tado aos padrões actuais de qualidade do ar

- Ajuste automático a novas condições de trabalho decorrentes da evolução da mina
- Reduções significativas da potência despendida pelos ventiladores, através da optimização da carga distribuída nos ventiladores existentes
- Ventilação automatizada robusta e fiável através do controlo de feedback

A aplicação aos sistemas de ventilação de minas destes modelos dinâmicos empíricos traz múltiplos benefícios. Não

só o proprietário ou o operador da mina beneficiam de custos de exploração mais baixos, mas também o ambiente de trabalho beneficia por receber os caudais de ar optimizados que melhor se adaptem à actividade nesse local específico. O modelo dinâmico consegue acompanhar a natureza evolutiva da mina, assegurando uma optimização contínua dos caudais de ar e dos ventiladores. Isto significa também que não há quebra nas eficiências de que a mina beneficia, mesmo nos ambientes de operação mais hostis e remotos.

O ambiente de trabalho beneficia por receber os caudais de ar optimizados que melhor se adaptem à actividade nesse local específico.

Michael Lundh

Jan Nyqvist

Mats Molander

ABB Corporate R&D

Västerås, Suécia

Comunicação Corporativa

comunicacao-corporativa@pt.abb.com

Referências

[1] Qin, S. J., and T. A. Badgwell, (2003), A survey of industrial model predictive control technology, *Control Engineering Practice* 11 (2003), p. 733–764.

[2] Ljung, L. (1999) *System Identification – Theory for the user*, Prentice Hall