

O FORNO ELÉTRICO A ARCO DE HOJE E DE AMANHÃ ⁽¹⁾ ⁽³⁾

MARVIN MAY ⁽²⁾

O forno elétrico a arco, assim como outras ferramentas industriais, passou por grande número de modificações nos últimos anos. Estas mudanças incluíram tanto os parâmetros mecânicos do forno como os elétricos. Requisitos de produção demandaram maiores capacidades e, em decorrência desse fato, tornaram-se comuns fornos de 100 até 250 t.

Os aços ligados impuseram aumentos de 100 a 200% na capacidade dos fornos, em comparação aos da década de 40. O porte das corridas de aço-carbono demandaram capacidades sempre crescentes que popularizaram os fornos de 150 a 250 t.

Os fornos maiores, assim como acontece com muitos dos aparelhos de produção de grande porte, são mais eficientes do que os fornos pequenos e isto também ajudou a aumentar a sua popularidade.

Quando estávamos considerando a instalação de nossos fornos para uma usina destinada a fundir aço ligado, a capacidade do transformador foi dimensionada em cerca de 250 kVA/t de metal fundido. Potências desta ordem permitiam uma velocidade de fusão ou de produção aceitável, considerando que a potência total só era usada para a fusão, que ocupava aproximadamente 40 a 50% do tempo de força ligada, sendo o tempo restante usado para "trabalhar" a carga. A potência necessária para trabalhar a carga poderia variar entre 40 e 60% da capacidade do transformador.

Uma corrida de aço carbono usa a prática de uma única escória e requer um tempo relativamente curto para ajuste de composição. Assim, tornou-se prático e desejável aumentar os kVA do transformador para diminuir o tempo de produção, que é, em sua maior parte, usado para

fusão. Para este tipo de corrida, a potência máxima disponível seria usada durante cerca de 65% do tempo em que o forno estivesse ligado; durante os restantes 35% desse tempo, a potência fornecida seria 70% da máxima. A capacidade de transformador para esse tipo de produção tem sido de aproximadamente 375 kVA/t de metal fundido.

A última aplicação de potência ao forno elétrico a arco deve ser considerada como alto fornecimento de potência, quando se considera a utilização de fornos Swindell-Dressler.

Maiores potências fornecidas por tonelada de metal fundido seriam, em nosso ponto de vista, consideradas como ultra-altas potências, exigindo considerações sobre construção e prática de operação de forno, diferentes da atual. Dois pontos de importância são: um meio externo de resfriamento de refratários (preferivelmente um líquido) e os suportes para os condutores de corrente elétrica.

O aumento de fornecimento de potência obrigou uma mudança nas voltagens de distribuição consideradas para transmissão. Estão atualmente em operação algumas instalações em que os transformadores estão ligados diretamente ao sistema de 138 kV da companhia de eletricidade e então a tensão é reduzida e regulada de modo a se obterem as baixas voltagens necessárias à operação do forno. Tensões de 69 e 34,5 kV também têm sido utilizadas.

Os fornos de maior capacidade requerem sistemas de maior capacidade a fim de se reduzir o efeito das flutuações de voltagem nos circuitos de distribuição de potência que suprem cargas elétricas outras que o forno a arco somente.

Os fornos de maior potência estão empregando controles de nível de voltagem sob carga, que permitem algumas vantagens operacionais em relação à mudança de "tap" sem carga. Uma das vantagens é a facilidade com que o fornecimento de potência pode ser ajustado por um limitador de demanda, de forma a utilizar a po-

(1) Apresentado ao Simpósio sobre Eletrosiderurgia; Salvador, BA.; setembro de 1968.

(2) Senior Staff Engineer; Divisão de Equipamento da Swindell-Dressler Company; Pittsburgh Pa. EE.UU.

(3) Tradução do Eng.º Cláudio L. Mariotto.

tência máxima sem exceder o limite de demanda. Uma outra vantagem é que o fornecimento de potência pode ser mudado pela regulagem da tensão ao invés da corrente, o que permite um arco mais eficiente, sob o ponto de vista de transferência de calor, assim como menor erosão de refratários.

Os contrôles de limitação de demanda de potência têm sido aplicados à maior parte das instalações recentes de grande capacidade. Os limitadores de demanda podem computar e comparar várias leituras de diferentes dispositivos e fontes de potência e, portanto, controlar melhor sua utilização. Um grande número desses limitadores são usados para registrar dados estatísticos concernentes à operação do forno e aos materiais que constituem a corrida. Isto poderá levar, eventualmente, ao controle automático da operação do forno.

Chaves a vácuo, para desativar o circuito de potência do forno, estão sendo cada vez mais aplicadas. A capacidade de condução de corrente dessas chaves tem limitado seu uso às menores capacidades, mas os fabricantes desses dispositivos têm projetado chaves para correntes mais altas, fato que extenderá sua aplicação a transformadores maiores.

Os reguladores rotativos de eletrodos estão sendo substituídos por tipos totalmente estáticos para permitir operação mais eficiente dos contrôles de eletrodos do forno, além de menor manutenção. Esses reguladores proporcionam a máxima resposta possível ao comando do eletrodo juntamente com maior flexibilidade de operação. Para a movimentação dos eletrodos, estão sendo mais largamente aceitos os motores com mínima inércia possível de rotor.

Estes são os tipos industriais de motores de corrente contínua. As últimas aplicações incluem motores com magnetos permanentes.

*

Ensaio recentes indicaram que a potência total disponível pode ser aumentada e utilizada, desde que se providencie um sistema de condutores do secundário projetado de forma adequada e compatível para esses transformadores.

As companhias produtoras de aço e os fabricantes dos componentes principais têm dispendido tempo e esforços consideráveis para obter dados precisos a respeito deste conceito relativamente novo de fusão com alta potência. Os cálculos teóricos dos circuitos dos fornos têm sido comparados com os resultados práticos. As teorias anteriores a respeito de circuitos elétricos, características de arco e práticas de operação de fornos têm sido revistas e correlacionadas aos problemas atuais.

Alguns fabricantes de aço aumentaram as capacidades dos transformadores e observaram

os resultados, num esforço para verificar se o aumento da capacidade do transformador daria uma operação mais eficiente e se seria possível utilizar a potência disponível. As práticas de operação eram observadas e, a seguir, modificadas na tentativa de alcançar melhores rendimentos.

Ao mesmo tempo, os fabricantes de equipamentos conduziam ensaios de curto-circuito para estabelecer os parâmetros dos circuitos elétricos. Observavam, também eles, as práticas de operação, procurando meios que permitissem ao aço absorver maior quantidade do calor gerado.

Os objetivos desses ensaios eram variados: desde a determinação dos parâmetros dos circuitos elétricos, até pesquisar qual seria a quantidade de potência que um recipiente de determinado tamanho poderia receber.

As informações compiladas a partir desses ensaios estão provocando a modificação dos métodos operacionais dos usuários dos fornos, assim como dos projetos de partes do próprio forno a arco. Um dos resultados desses ensaios, e as discussões que o seguiram, indicaram que seria desejável desenvolver um circuito de secundário que não somente tivesse iguais impedâncias nas três fases, mas que, de preferência, fôsse a somatória de resistências e reatâncias iguais. Estabeleceu-se também, que a meta do projeto seria conseguir a mínima impedância possível.

Todo este trabalho estava apontado na direção de um objetivo: aquele de tentar estabelecer um aparelho mais eficiente e de menor custo para a fabricação de aço. Quando ficou determinado que os fornos de alta potência mostravam-se promissores como um conceito moderno de fabricação de aço, várias discussões se sucederam entre os fabricantes de equipamentos e os produtores de aço que pensavam em expansões de suas aciarias ou que consideravam a possibilidade de instalação de fornos a arco. Muitas questões foram propostas, tais como:

- Qual será o efeito sobre o sistema das companhias de distribuição de energia em relação à regulagem, capacidade, etc.?
- De que forma as voltagens de operação irão influenciar os novos níveis de potência?
- O que acontecerá aos pontos quentes do forno — eles se tornarão mais severos, ou serão eliminados ou minimizados?
- É viável um projeto prático de circuito do secundário tendo em vista as altas correntes necessárias à geração da potência desejada?

É fato conhecido que as instalações de fornos existentes são afetadas pela regulagem da tensão no primário, o que certamente exerce um efeito sobre a potência que pode ser desenvolvida. Isto deveria ser considerado na própria seleção dos níveis de tensão no secundário. É importante

que o sistema seja calculado como um todo, primário e secundário, de modo a poder estabelecer uma compatibilidade entre todos os componentes da instalação do forno.

Com respeito ao transformador do forno, e devido à regulagem no sistema do primário, deve-se-ia prever um certo grau de flexibilidade na seleção dos níveis de voltagem de operação. Esta flexibilidade é também desejável do ponto de vista de compensação das diferenças entre os parâmetros teóricos e os reais do circuito do secundário do forno. Além disso, a variação da potência das cargas numa aciaria com vários fornos influenciará a regulagem da voltagem e exercerá efeito direto sobre a capacidade de desenvolver potência.

No tocante à severidade dos pontos quentes, as práticas operacionais indicaram que um arco curto de alta corrente permitirá maior fornecimento de potência a um forno de um dado tamanho do que um arco de voltagem relativamente mais alta e menor corrente. O arco curto não apenas introduzirá no banho maior quantidade do calor gerado, como também menor radiação será dirigida às paredes laterais. Entretanto, para que se consiga manter um arco curto, de baixa voltagem e alta corrente, é necessário desenvolver uma impedância de secundário tão baixa quanto possível e, ainda assim, manter um recipiente mecânico prático para fundir o aço.

O último ponto de discussão referia-se à questão do projeto de um circuito de secundário que fosse prático o suficiente para permitir desenvolver os altos níveis de potência desejados — com as vantagens inerentes de operações mais eficientes. Dando ênfase primordial aos aspectos elétricos do forno a arco, desenvolveu-se um arranjo para os condutores do secundário que é não apenas teoricamente correto, mas também de aplicação prática. Durante anos, os condutores do secundário foram colocados sobre o forno e, também, junto à extremidade da abóbada, num plano paralelo à plataforma de carga. Os ensaios de curto-circuito demonstram que a impedância das três fases varia consideravelmente, o que significa que as características de cada arco são muito diferentes. As condições de fusão no forno e também de erosão das paredes, indicam que esses arcos diferentes produzem problemas indesejáveis de operação.

Desejam-se, portanto, características de arco e fornecimento de potência iguais em cada fase, para boa operação de um forno a arco. Isto permitirá uma fusão mais homogênea de sucata e poderá possibilitar ao operador melhor controle sobre o fornecimento de potência.

A triangulação do sistema de tubos condutores do secundário parece ser um método que permite melhor equalização das características dos arcos do que a configuração plana. Esta última apresenta decidido desbalanceamento da

impedância nas várias fases, com os resultantes efeitos sobre o arco. Embora os condutores triangulados possam não dar os mais baixos valores de reatância para o circuito desejado, é provável que se consiga equalizar a potência desenvolvida no forno.

Tornou-se, então, óbvio que enquanto os problemas de desbalanceamento eram resolvidos pela triangulação do circuito do secundário, a impedância média do circuito poderia simultaneamente aumentar. Isto apresentava uma condição indesejável para uma fusão eficiente. A base, portanto, para reprojeter o sistema secundário seria não somente desenvolver um circuito de secundário balanceado, mas também de baixa impedância, de modo que se pudessem atingir os requisitos de potência para as velocidades de produção desejadas.

Para efeito de análise, o circuito secundário foi dividido em quatro seções: barras condutoras e terminais de parede, cabos flexíveis, tubos condutores, e os eletrodos e seus suportes.

Cada seção foi estudada separadamente e arranjada numa forma física que levasse a resistência à passagem de corrente alternada e a reatância a um mínimo, efetuando ao mesmo tempo o balanceamento dos dois parâmetros elétricos através de uma triangulação do circuito.

As barras condutoras necessárias à ligação dos bornes do transformador aos terminais de parede são muito mais pesadas para suportar as altas correntes atualmente usadas nos circuitos de alta potência. As forças magnéticas são também maiores devidas às altas correntes. A instalação se torna mais dificultosa, desde que o peso e, na maior parte dos casos, o número de barras é maior. São necessários suportes mais sofisticados para facilitar a instalação das barras e mantê-las em posição durante a operação.

O aumento da seção transversal de cobre para o transporte da corrente adicional foi feito por intermédio de barras adicionais, que fornecem as melhores características elétricas para que se tenha baixa impedância. As barras são então apoiadas em suportes não magnéticos isolados.

Os terminais de parede também precisam ser maiores, para a transmissão de maior corrente. Isto implica em maior peso e, novamente, num problema de sustentação. A triangulação neste ponto apresenta a fase central elevada, tornando-se agora necessário revisar o espaçamento convencional com a extremidade da abóbada, de modo a proporcionar suporte vertical para esta fase. De fato, a fase central se torna mais comprida e se estende mais que as externas em direção ao forno. O terminal na extremidade do cabo para esta fase requer um suporte trabalhando à tração, para garantir o seu posicionamento sob condições de operação.

Embora não se tenham estudado especificamente os componentes da sustentação do edifício e o material de reforço, para determinar o seu efeito direto sobre o circuito, são deixadas as máximas folgas possíveis entre os suportes magnéticos e o sistema de condutores de alta corrente na área da abóbada.

A secção flexível do circuito elétrico, (i. e., os cabos flexíveis) é a parte mais longa do sistema condutor do secundário. Apresenta maior dificuldade em controlar ou predizer a sua impedância do que qualquer dos outros três grupos. Entretanto, foi estabelecida uma série de condições para estes condutores e procedeu-se à sua verificação.

Os cabos foram triangulados, procurando assim balancear a resistência e a reatância em cada fase. Usaram-se cabos resfriados a água em lugar de resfriados a ar, por causa do volume do material necessário para a transmissão da corrente e também devido à proximidade dos condutores das três fases. Durante a operação, os cabos flexíveis das diferentes fases entram em contato físico e, se não houver bom isolamento, pode se desenvolver um arco na região de contato. Assim, torna-se prático considerar a eventualidade de usar resfriamento a água onde fôr necessário envolver os cabos com um tubo que contenha a água de resfriamento. O tubo também tem propriedades isolantes suficientes para evitar curto-circuito entre os condutores, quando as diferentes fases entrarem em contato durante a operação. Pode-se conseguir mínima reatância constituindo o condutor de corrente de cada uma das fases por um grupo de mais de dois cabos em paralelo.

Igualmente importante é a configuração dos tubos condutores sobre o forno, os quais têm sofrido uma revisão geral, no sentido de conseguir impedância tão baixa quanto possível no circuito do secundário. Esses condutores, situados nos braços de sustentação dos eletrodos, têm consistido tradicionalmente de dois tubos de cobre em paralelo, refrigerados a água e locados geralmente de tal maneira que seguem a direção do braço do eletrodo, desde seu suporte até o terminal do cabo.

Numa configuração plana, a fase central tem o menor comprimento, e também, a menor impedância por unidade de comprimento. Esta fase era também a que fornecia maior potência.

Quando os condutores são triangulados, a fase central se torna praticamente igual em comprimento às fases externas.

Estando os condutores de tôdas as três fases num mesmo plano, pode-se calcular o valor da impedância. Se forem mantidas as mesmas linhas de centro dos condutores, exceção feita à fase central que é elevada de modo que o espaçamento entre os condutores forme um triângulo equilátero, o valor da impedância para o mesmo

comprimento de condutores será maior. Portanto, desde que se deseje reduzir a impedância do circuito, torna-se necessário dispor em sucessão os condutores que compõe o grupo de cada fase, de modo a aumentar a dispersão geométrica em cada fase. Isto têm sido feito colocando três ou quatro condutores em paralelo. E então, com a finalidade de reduzir a impedância ainda mais, é necessário que as fases sejam colocadas tão próximas umas das outras quanto possível. Isto significa que os condutores não podem mais seguir a direção dos braços, ao menos para as fases externas, mas devem ser deslocados para junto da fase central. Evidentemente, eles não poderão ficar tão próximos a ponto de interferir com a livre movimentação da fase central.

As maiores proporções dos tubos condutores implicam em suportes maiores do que os utilizados anteriormente. Os problemas de projeto não são muito severos, mas esse fato deve ser levado em conta pois soma-se à quantidade de material que deve ficar suspenso.

O suporte de eletrodo recebeu novo projeto, para que os pontas dos tubos condutores não tivessem que ser dobradas excessivamente.

O diâmetro da circunferência que contém os centros dos eletrodos não foi modificado em relação ao existente nos fornos antigos. Os resultados de operação serão avaliados antes de se considerar a modificação desse parâmetro.

Através desse tipo de projeto, o fornecimento de potência deverá ser bastante bem balanceado, resultando dessa forma numa fusão homogênea de sucata nas proximidades dos três eletrodos. Isto é particularmente desejável quando se tem necessidade de reduzir o fornecimento de potência ao se obter um banho plano ou, ao menos, quando a sucata não protege as paredes refratárias laterais contra os efeitos de um arco longo.

O aço, durante a fusão, pode absorver elevada quantidade de calor. Isto é verdadeiro não somente quando todo o recipiente está cheio de sucata, mas também quando se têm grandes pedaços imersos num banho incipiente. Portanto, é de se desejar uma alta taxa de fornecimento de calor mesmo depois de toda a sucata ter descido, deixando desprotegidas as paredes laterais. A única maneira de se fazer isso, é através de arcos os mais curtos possíveis.

Outra vantagem que o arco de alta corrente parece estar apresentando é o fato de proporcionar ao banho uma agitação mais violenta, que resulta em transferência de calor mais eficiente e melhor contato com a escória. Esta pode ser uma vantagem decisiva ao se fazer corridas de aço inoxidável.

*

O forno elétrico a arco através dos anos tem progredido da condição de produtor de ligas para

a de uma ferramenta altamente versátil na manufatura do aço; êsse progresso foi possibilitado e, ao mesmo tempo, causado pelos desenvolvimentos aqui discutidos. A redução do custo da sucata acelerou o avanço do forno a arco em direção ao segundo posto em produção de aço, posição que êle alcançará, segundo as previsões, nesta geração.

Entretanto, a sucata apresenta algumas dificuldades, no seu uso como matéria-prima para fabricação de aço, devidas à falta de conhecimento prévio sobre sua composição. Isto resulta no aparecimento de elementos residuais indesejáveis, difíceis de se eliminar numa corrida.

Recentemente o ferro esponja tem sido reconhecido como nova fonte de matéria-prima para fusão. Êste material, produzido por redução direta de minério de ferro, tem análise notavelmente previsível e mínimo teor de residuais, desde que o minério esteja livre destes.

Êste desenvolvimento muito interessante e economicamente importante na siderurgia a arco elétrico está ressaltado no projeto da usina siderúrgica integrada da USIBA, na qual o material para fusão será proporcionado pela redução direta de minério de ferro brasileiro.

*

Concluindo, a tendência do forno a arco hoje em dia é para maiores fornos e maiores capacidades de transformadores. A meta atual é a de trabalhar com fornos maiores, para produzir todos os tipos de aço, que tenham, de maneira geral, a capacidade dos maiores fornos hoje usados para a fabricação de aço ao carbono.

As capacidades dos transformadores para cada tamanho de forno também têm aumentado, usando-se mais kVA nos fornos produtores de aço ao carbono.

Um circuito elétrico de baixa impedância permite a obtenção de arcos de maior potência com baixas voltagens e altas correntes. Êsse tipo de arco permite minimizar o desgaste de refratários e proporcionar a desejável agitação do banho, necessária para ótima operação. Esta característica de arco, juntamente com as vantagens que lhe seguem, é altamente desejável para um forno fundindo ferro esponja.

Melhorias e refinamentos no forno a arco decorrerão não somente dos fabricantes de fornos, mas surgirão também de práticas de operação aperfeiçoadas pelos fabricantes de aço, além de pesquisas e desenvolvimento por parte de fornecedores de outros equipamentos.

Os fornos de maior capacidade exigirão mudanças nos atuais conceitos de projeto. Um exemplo pode ser a aplicação de potência para fusão através de seis eletrodos ao invés de três, que é o caso geral agora. Outro exemplo seria o uso

de um recipiente estacionário, em lugar do tipo basculante atual.

Quaisquer que sejam os tipos de conceitos que os projetos futuros sigam ou as mudanças que advenham nas práticas de operação, o forno a arco continuará sendo uma das ferramentas mais versáteis na indústria do aço.

DISCUSSÃO

CLÁUDIO MUNIZ BRAGA (1) — Em nome da USIBA, agradeço as referências que no trabalho de Mr. May foram feitas a essa empresa. Mais uma vez, penso, podemos congratular-nos por ter a USIBA se salientado numa tendência que, na tecnologia moderna, se evidencia como o caminho correto: as altas potências, os fornos de grande capacidade e a utilização de matérias-primas como ferro esponja, que apresenta vantagens sobre a sucata, desde que partindo ou fabricada dos minérios convenientes, como felizmente é o que pretendemos usar e que dá origem a uma operação que tem a maior produtividade e o mais baixo custo.

JACK MILLER (2) — (Traduzido pela mesa) — Qual o critério estabelecido na adoção do valor de 375 kVA/t de aço líquido representativo das novas tendências dos fornos elétricos, referentes às altas potências? Quais os principais problemas que envolvem o aproveitamento adequado da produtividade destes fornos, decorrentes das elevadas potências utilizadas, ou particularmente no que se refere às instalações elétricas necessárias para o perfeito atendimento da operação?

MARVIN MAY (3) — (Traduzido pela mesa) — O valor de 375 kVA/t de aço líquido, representa uma média característica de uma operação moderna de forno elétrico na produção de aço. Quanto à outra pergunta, pode-se dizer que a complexidade das instalações elétricas para atender adequadamente uma operação de um forno elétrico de alta potência, cresce com o aumento da capacidade de fornos. Nos fornos de 30 até 50 t de capacidade os problemas oriundos de altas potências não são tão importantes como nos fornos de maior capacidade.

MARCO ANTÔNIO SATTAMINI (4) — Quais os custos de investimentos fixos para duas instalações que dariam, teoricamente, a mesma produção, uma com duas unidades menores em capacidade e potência e outra, com uma só unidade de maior capacidade e potência?

W. M. MATHIAS (5) — (Traduzido pela mesa) — Não se tem ainda estudos conclusivos sobre esta questão, mas pode-se estimar que a instalação com um forno de maior capacidade e potência envolva um investimento da ordem de 2/3 a 3/4 do investimento correspondente à instalação de dois fornos de menor capacidade e potência.

M. A. SATTAMINI — Existe hoje uma tendência de instalar, para determinado forno, um transformador de maior capacidade que a considerada necessária, obtendo-se uma operação mais segura quanto à potência do transformador e também, com maior produtividade.

(1) Membro da ABM e Orientador dos debates; Engenheiro Civil; Diretor Superintendente de Projetos da USIBA; Rio de Janeiro, GB.

(2) Membro da ABM. Engenheiro Civil e Eletricista; Senior Technical Adviser Process and Physical Metallurgy; Battelle Memorial Institute; EE.UU.

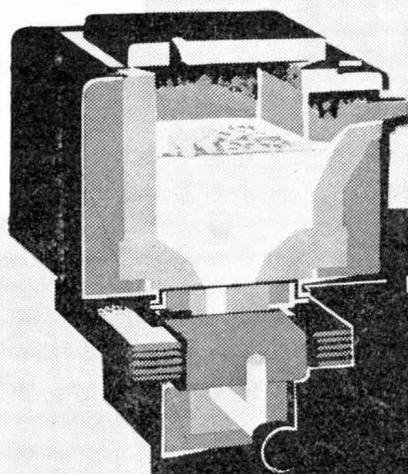
(3) Autor do trabalho; Senior Staff Engineer; Swindell-Dressler; EE.UU.

(4) Membro da ABM. Engenheiro Industrial Mecânico; Gerente de Pesquisas e Desenvolvimento da Cia. Brasileira de Metalurgia e Mineração; Rio de Janeiro, GB.

(5) Director of International Project Sales da Swindell-Dressler; EE.UU.

ASEA ELÉTRICA S/A coloca
à disposição da indústria
brasileira sua moderna
linha de fornos para fusão,
acumulação, aquecimento
e equipamentos afins.

FORNOS A ARCO



FORNOS DE INDUÇÃO
TIPO CANAL



FORNOS DE INDUÇÃO
TIPO CADINHO



ASEA
ELÉTRICA S/A

Via Monteiro Lobato, 3285 - Guarulhos
Caixa Postal 30488 - São Paulo

Filiais em:
São Paulo - Rio de Janeiro - Belo Horizonte
Pôrto Alegre - Recife