

Capítulo XI

Aumento de fator de carga industrial com redistribuição de cargas e restrição de forno elétrico

Por Cesar Augusto Portolann e Andrei Bordignon*

No Brasil, bem como em outros países, verifica-se um consumo de energia elétrica (EE), que cresce a uma taxa maior do que aquela de investimentos na geração, transmissão e distribuição, o que pode conduzir a problemas de fornecimento, principalmente no horário de ponta da curva de carga. Os novos investimentos necessários na geração e na rede apresentam custo e tempo de retorno de investimento grande em comparação com muitas alternativas de eficiência energética.

Para as indústrias, o uso mais eficiente da energia elétrica, traduzido no aumento do fator de carga (FC), diminui ou adia a necessidade de investimentos para ampliação de instalações, ou de geração/aquisição de energia nova para atender ao crescimento da demanda, ajudando a manter a sua receita.

Com base nesse potencial de eficiência energética, foram propostas duas ações para aumento do fator de carga de certa indústria. Uma destas medidas tem o objetivo de reduzir o fator de utilização de fornos elétricos ou, em outras palavras, restringir temporariamente a sua potência máxima. Os fornos elétricos à resistência tem a propriedade de permitirem uma fácil modulação da sua demanda. Essa limitação automática da demanda é feita sem perder de vista a necessidade da produção.

Para modulação da demanda de fornos, algumas

alternativas podem ser utilizadas, diferindo no modo de operação e no resultado obtido.

Fator de carga como indicador de eficiência

O preço médio da energia elétrica versus fator de carga

A preocupação de uma indústria com o fator de carga é justificada pela sua limitação na capacidade de atendimento das cargas, que, por sua vez, é função da potência instalada da empresa. O fator de carga está relacionado intimamente com isso, pois ele é o índice obtido através da relação entre a demanda média e a demanda máxima, observada durante um intervalo de tempo definido, podendo ser expresso pela seguinte e conhecida expressão, em que D_m e D_{max} são, respectivamente, as demandas média e máxima.

$$FC = \frac{D_m}{D_{max}} \quad (1)$$

A eficiência energética traduzida na melhoria do fator de carga ajuda a indústria a evitar custos desnecessários e preservar a sua receita porque o preço médio da energia elétrica gerada ou adquirida passa a ser menor, conforme regido por (2). A título de exemplo, admite-se que certa indústria pertencente ao subgrupo A4, paga uma tarifa de consumo (TC)

de 0,19911 R\$/kWh e uma tarifa de demanda (TD) de 35,06 R\$/kW. O preço médio da energia é ilustrado na Figura 1, onde é evidente que ele cai com o incremento do fator de carga.

$$P_m = TC + \left(\frac{TD}{730 FC} \right) \text{ R\$/kWh} \quad (2)$$

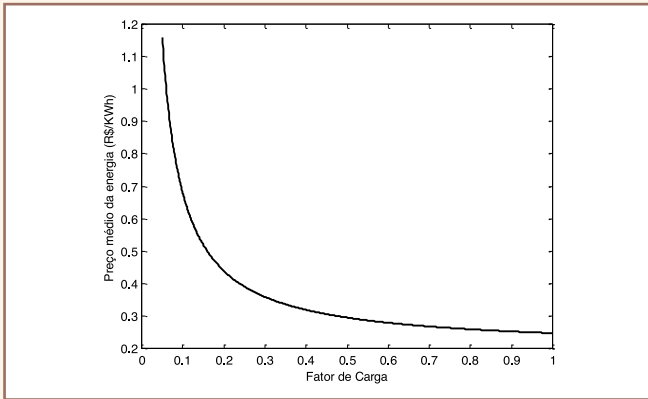


Figura 1 – Preço médio da EE x FC.

Incremento do fator de carga com a restrição parcial e temporária da demanda de forno elétrico

A melhoria do fator de carga por meio da redistribuição de cargas, nos períodos de trabalho, é uma prática comum

em sistemas elétricos industriais. Ela visa reduzir a demanda máxima, sem alterar o consumo. Por outro lado, o controle direto de carga também contribui para reduzir a demanda máxima, da instalação, restringindo total ou parcialmente determinadas cargas. A Figura 2 ilustra a ação de uma medida que reduz automaticamente a demanda para 1/3 da potência máxima de um forno elétrico, durante o horário programado, e que naturalmente contribui para a redução da demanda máxima da instalação elétrica da indústria considerada, aumentando o seu fator de carga global.

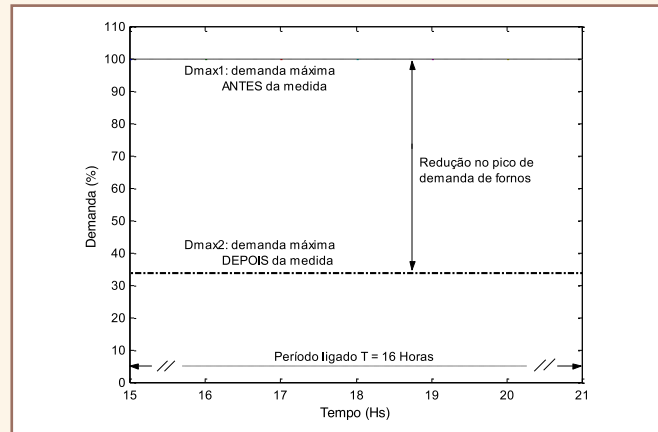


Figura 2 – Corte do pico de demanda de forno elétrico.

Conforme descrito, o potencial de melhoria do fator de carga da instalação elétrica está relacionado com a redução da demanda na ponta, que, no caso, a modulação da potência do forno tem grande impacto nessa tarefa. A redução de demanda na ponta (RDP) pode ser regida pela seguinte expressão:

$$RDP = P_{\text{redis}} + \frac{NF P_{\text{for}}}{FD} 10^{-3} \text{ (kW)} \quad (3)$$

Em que P_{redis} é a potência reduzida através da redistribuição de cargas (kW), NF é o número de fornos atendidos, P_{for} é a potência média reduzida por forno, através de controle direto (kW) e FD é o fator de diversidade de fornos.

No caso em estudo, considera-se que o consumo de energia evitado na ponta vai ser compensado em um horário extra; assim, a demanda média da instalação elétrica depois da ação (D_{m2}) é praticamente a mesma que antes (D_{m1}), conforme (4):

$$D_{m1} = \frac{\text{kWh}}{24} = D_{m2} = D_m \quad (4)$$

Em que kWh é o consumo diário.

Dessa forma, os fatores de carga original (antes da ação) e novo (depois da medida implantada), são respectivamente dados por (5) e (6).

$$FC_1 = \frac{D_m}{D_{\text{max}1}} \quad (5)$$

$$FC_2 = \frac{D_m}{D_{\text{max}2}} \quad (6)$$

Considerando (4) e também que $D_{\text{max}2} = (D_{\text{max}1} - RDP)$, obtém-se para o novo fator de carga:

$$FC_2 = \frac{FC_1 D_{\text{max}1}}{(D_{\text{max}1} - RDP)} \quad (7)$$

Que, rearranjada, fica:

$$FC_2 = \frac{FC_1 D_{\text{max}1}}{D_{\text{max}1} \left(1 - \frac{RDP}{D_{\text{max}1}}\right)} \quad (8)$$

Se a relação $RDP/D_{\text{max}1}$ for denominada de “p”, resulta para o novo fator de carga:

$$FC_2 = \frac{FC_1}{(1 - p)} \quad (9)$$

Em outras palavras, “p” é o coeficiente previsto de redução da demanda, sendo um número adimensional que varia de 0 a 1. Esta expressão reflete o novo fator de carga da indústria e dá origem ao diagrama da Figura 3, que ilustra o incremento do fator de carga com a redução da demanda.

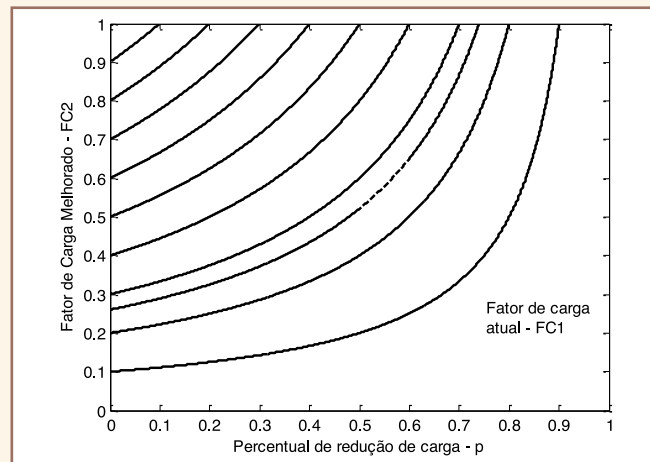


Figura 3 – Curvas de fatores de carga.

Controle direto de fornos para melhorar o FC Generalidades

O controle direto de cargas pode ser utilizado para melhorar o fator de carga de uma instalação elétrica porque ele limita a potência demandada das cargas que estão sob seu comando, de modo total ou parcial, conforme seja requerido e isso naturalmente reflete na redução do pico da curva de carga da instalação.

No caso, o equipamento escolhido para ter a potência limitada, durante os períodos que a demanda contratada seria ultrapassada, foi o forno elétrico. Ele requer uma potência grande, com relação às outras cargas e, como é baseado em resistências elétricas, permite a modulação da potência por tempos indefinidos. Serão discutidos vários circuitos que caracterizam equipamentos para efetuar a redução parcial de potência máxima de fornos. Na discussão a seguir, P_1 significa a potência nominal máxima do forno existente e P_2 a sua nova potência máxima.

Ligação delta-ipsilon ($\Delta - Y$)

Uma opção para melhorar o fator de carga da instalação industrial é implantar um esquema delta-ipsilon para operação automática durante o período de ponta, cujo efeito é reduzir a potência máxima do aquecedor para 1/3 da nominal, conforme mostra (10).

$$P_2 \cong \begin{cases} P_1 & \text{(operação normal)} \\ \frac{1}{3} P_1 & \text{(operação restrita)} \end{cases} \quad (10)$$

Isso pode ser mostrado calculando a potência absorvida em função da tensão de linha (V_L) e da resistência por fase do forno (R). Para a ligação Δ , a tensão de fase (V_f) e a corrente de fase (I_f) são:

$$V_f = V_L \quad (11)$$

$$I_f = \frac{V_f}{R} = \frac{V_L}{R} \quad (12)$$

Calculando a potência monofásica ($P_{1\phi}$):

$$P_{1\phi} = V_f I_f = \frac{V_L^2}{R} \quad (13)$$

E a potência trifásica ($P_{3\phi}$):

$$P_{3\phi} = \frac{3V_L^2}{R} \quad (14)$$

Já para a ligação Y:

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$I_f = \frac{V_f}{R} = \frac{V_L}{\sqrt{3}R} \quad (16)$$

$$P_{1\phi} = V_f I_f = \frac{V_L^2}{3R} \quad (17)$$

$$P_{3\phi} = \frac{V_L^2}{R} \quad (18)$$

A diferença entre (14) e (18) caracteriza a redução de 1/3 da potência absorvida com a mudança da ligação em Δ para a ligação em Y.

O diagrama de força para realizar a alteração de Δ para Y é mostrado na Figura 4, em que os contatores K2 e K3 não podem ser acionados simultaneamente. É necessário um circuito de comando que faça a comutação entre as ligações nos períodos requeridos, através da utilização de um relógio programável, fazendo com que o forno opere na ligação Y e tenha sua potência temporariamente reduzida.

Este esquema apresenta fácil implementação e custo reduzido, porém, a redução para 1/3 da potência pode ser demasiada para determinados processos, sendo necessário adotar outro esquema.

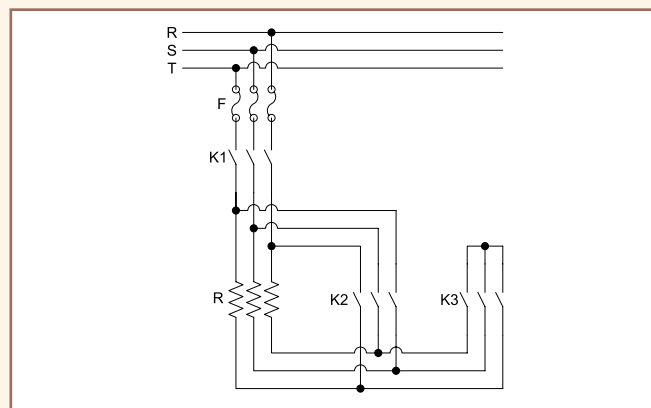


Figura 4 – Ligação Δ - Y (diagrama de força).

Ligação delta-ipsilon com diodos retificadores nas fases e retorno pelo neutro (Δ - Y')

A ligação em Y com retificadores é pouco comum e pode ser melhor entendida observando-se a Figura 5. Como só haverá corrente nas fases durante o semiciclo positivo, esta cairá pela metade em comparação com a ligação Y normal, como em (19).

$$I_f = \frac{V_f}{2R} = \frac{V_L}{2\sqrt{3}R} \quad (19)$$

O que resulta, para a ligação Y', em uma redução de seis vezes na potência absorvida pela ligação Δ . Assim a potência trifásica na nova ligação será:

$$P_{3\phi} = \frac{V_L^2}{2R} \quad (20)$$

O diagrama de força para fazer a mudança de ligações é mostrado na Figura 5.

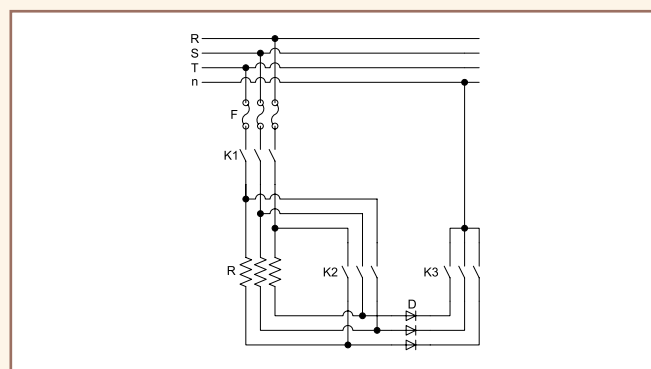


Figura 5 – Ligação Δ - Y' (diagrama de força).

O esquema de ligação Y' também é de fácil implementação, mas requer diodos retificadores robustos, capazes de suportar correntes elevadas, além do que haverá corrente circulante no neutro, pela junção das correntes nas fases, podendo

causar problemas na instalação caso o condutor do neutro não seja capaz de suportar essa corrente excedente. Devido à defasagem entre as correntes nas fases, o valor máximo da corrente no neutro será o mesmo das fases.

Ligação delta-delta com diodos retificadores nas fases ($\Delta - \Delta'$)

De modo semelhante ao exposto no item anterior, a ligação Δ' contém diodos em série com as resistências das fases, como pode ser visto na Figura 6. Da mesma forma, a corrente circulando pelas resistências cairá pela metade daquela da ligação Δ normal.

$$I_f = \frac{V_f}{2R} = \frac{V_L}{2R} \quad (21)$$

Obtendo uma redução pela metade na potência trifásica absorvida:

$$P_{3\phi} = \frac{3V_L^2}{2R} \quad (22)$$

O diagrama de força para esta topologia de ligação pode ser visualizado na Figura 6.

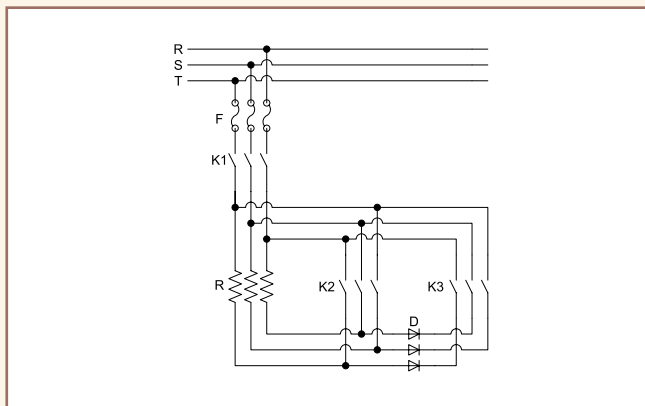


Figura 6 – Ligação $\Delta - \Delta'$ (diagrama de força).

A ligação Δ' , por reduzir pela metade a potência entregue à carga, pode ser uma boa opção em relação às anteriores, por influenciar menos no processo aplicado, e também não possui ligação com o neutro.

Outras medidas

As ligações $\Delta - Y$, $\Delta - Y'$ e $\Delta - \Delta'$ limitam a nova potência máxima de fornos elétricos em 1/3, 1/6 e 1/2 da nominal, respectivamente. Caso seja deduzido que estes valores são inadequados, pode-se utilizar o gradador de tensão

ou controlador de tensão alternada (CA), e limitar a nova potência máxima, por exemplo, em 2/3 da nominal, ajustando adequadamente o ângulo de disparo α para o período requerido. Uma variante desse circuito é o retificador controlado.

Os equipamentos construídos com base nesses dispositivos eletrônicos, apesar de efetivos no que se refere ao controle de potência, tem inconvenientes como a alta emissão de harmônicas, a relativa complexidade do circuito de comando e custo considerável para implementação.

Para o gradador de tensão, a expressão seguinte e o diagrama da Figura 7 ilustram a potência P_2 variando com o ângulo α . Foi considerada uma resistência com potência nominal $P_1 = 4600$ W. A Figura 8 contém o diagrama de força.

$$P_2 = P_1 \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2\pi} \sin(2\alpha) \right) \right] \quad (23)$$

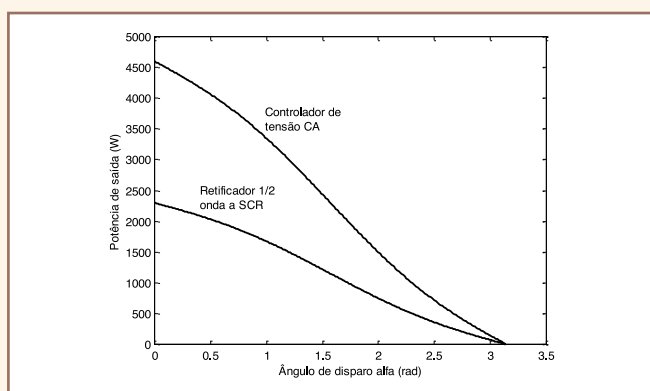


Figura 7 – Variação da potência com o ângulo α .

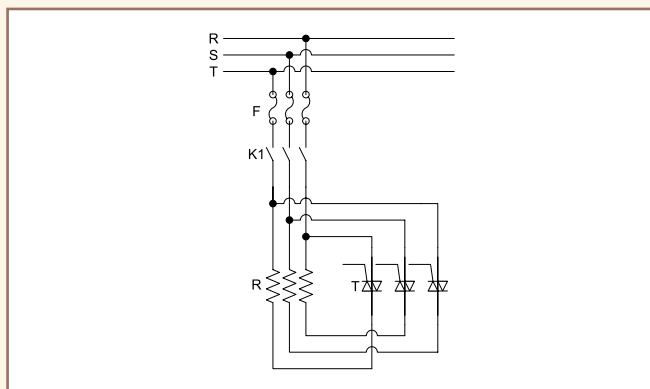


Figura 8 – Gradador de tensão (diagrama de força).

Para evitar uma grande emissão de harmônicas, como no caso do gradador e do retificador, pode-se adotar o controle de tensão CA por ciclos inteiros, cuja expressão básica para a nova demanda máxima é:

$$P_2 \cong \begin{cases} P_1 & \text{(operação normal)} \\ \frac{C_{on}}{C} P_1 & \text{(operação restrita)} \end{cases} \quad (24)$$

C_{on} é a fração de ciclos da onda de tensão, com relação ao número de ciclos total (C), dentro de um período instituído.

Resultados

Situação anterior à ampliação da indústria

As práticas de redistribuição de cargas e restrição de forno usando a ligação Δ -Y foram aplicadas no sistema elétrico de uma pequena indústria de produção de biscoitos. A produção industrial antes da ampliação requerida tinha uma demanda contratada de 100 kW, e estava condicionada às cargas listadas na Tabela I e aos horários de funcionamento mostrados na Tabela II. Isto está sintetizado na curva de carga, representada na Fig. 9. Neste caso o fator de carga é 0,2628.

TABELA I – AS CARGAS DA INDÚSTRIA

ITEM	CARGA	kW
1	ESCRITÓRIO	2,5
2	ILUMINAÇÃO	4
3	BOMBA D'ÁGUA (5 CV)	3,5
4	MISTURADOR MASSA BÁSICA (20 CV)	14
5	MISTURADOR RECHEIO 1 (5 CV)	3,5
6	MISTURADOR RECHEIO 2 (5 CV)	3,5
7	ESTEIRA (5 CV)	3,5
8	FORNO ELÉTRICO (12 RESISTÊNCIAS DE 5 kW)	60
9	OUTRAS CARGAS	4
CARGA INSTALADA		98,5

TABELA II – QUADRO HORÁRIO DAS CARGAS

ITEM	HORAS							
	8-9	9-10	10-11	11-12	14-15	15-16	16-17	17-18
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*				*			
4	*	*	*		*	*	*	
5	*	*	*		*	*	*	
6	*	*	*		*	*	*	
7		*	*	*		*	*	*
8		*	*	*		*	*	*
9	*				*			
kW	35	91	91	70	35	91	91	70

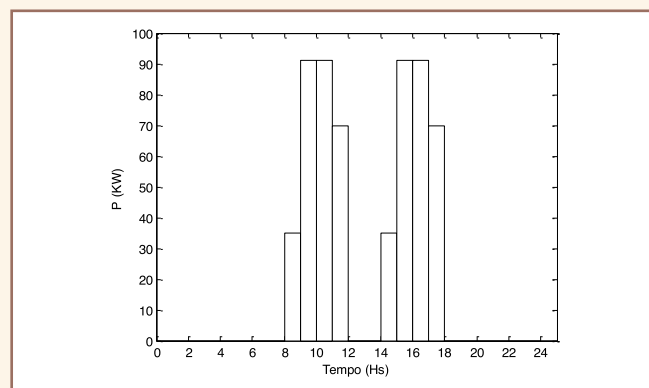


Figura 9 – Curva de carga atual.

Ampliação da produção da indústria

O novo setor de produção requerido consiste de um misturador de massa básica e dois misturadores para elaboração de recheios de biscoitos, iguais aos que estavam em operação. A curva de carga relativa a essa nova situação é ilustrada na Figura 10. O fator de carga nesta situação é 0,2604.

Pode ser visto que em quatro períodos de trabalho a demanda máxima de 112 kW (que seria registrada) ultrapassa a demanda contratada de 100 kW, o que naturalmente inviabiliza a operação. A solução para isto será tratada no item C.

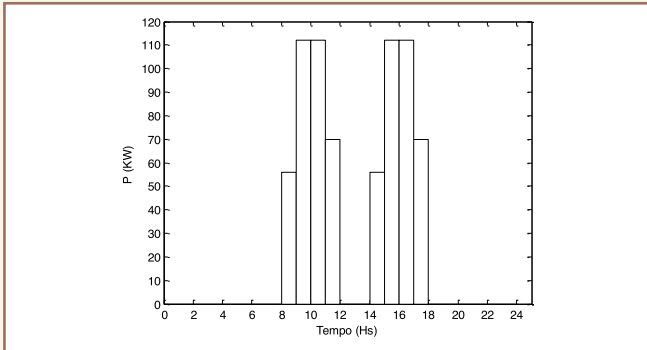


Figura 10 – Curva de carga depois do novo setor.

Redistribuição e restrição de cargas

Resultados de estudos econômicos da indústria

em questão apontaram que uma premissa para a implementação do novo setor é a manutenção da demanda contratada. Em contrapartida, indica-se a possibilidade de criação de um horário extra das 13h às 14h, que antes não era considerado, utilizando apenas parte dos funcionários, o que viabiliza a distribuição das cargas, mantendo o consumo e também aproximadamente a mesma demanda média da situação anterior.

TABELA III – QUADRO HORÁRIO COM AS CARGAS REDISTRIBUÍDAS

ITEM	HORAS									
	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
1	*	*	*	*		*	*	*	*	*
2	*	*	*	*		*	*	*	*	*
3	*				*					
4	*	*				*	*	*	*	
5	*	*				*	*	*	*	
6	*	*				*	*	*	*	
7		*	*	*		*	*	*	*	*
8	1/3	*	*	*		*	1/3	1/3	1/3	*
9	*						*			
10	*		*	*			*	*	*	
11	*		*	*			*	*	*	
12	*		*	*			*	*	*	
kW	76	91	72	91	3,5	91	76	72	72	70

Dessa forma, os novos horários de operação de cada carga estão mostrados na Tabela III, com as respectivas demandas de potência. A curva de carga resultante das ações discutidas e relativa à situação final é ilustrada na Figura 11. As cargas correspondentes à ampliação estão nos itens 10, 11 e 12.

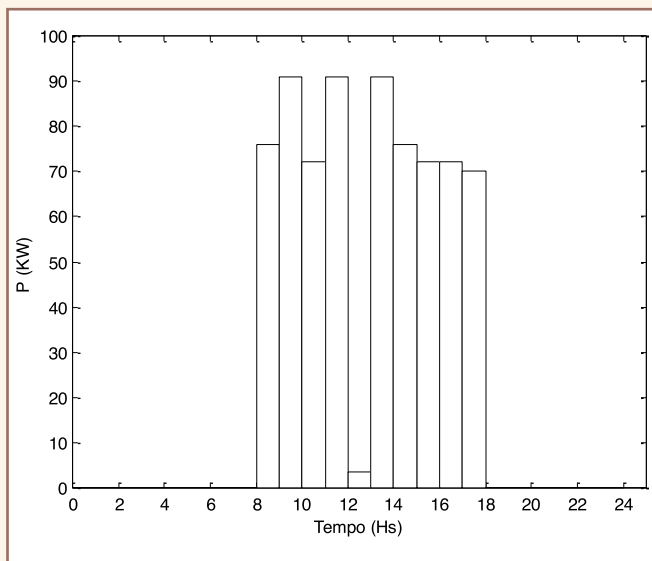


Figura 11 – Curva de carga com redistribuição de cargas e restrição parcial do forno.

Apesar de conduzir a um número menor de fornadas diárias, foi incrementada a produção, pelo fato de se carregar plenamente o forno que outrora operava com carga parcial.

Fator de carga resultante das alterações

A seguir é ilustrado numericamente como o fator de carga da empresa pôde ser melhorado, pela redistribuição de carga e pela contribuição da redução da demanda do forno durante períodos de ponta.

Em determinados períodos o corte do pico de demanda deu-se pela redistribuição de cargas, como entre 9h e 10h, já em outros horários o forno é restringido, à 1/3 da potência nominal, como entre 10h e 11h. A demanda máxima da instalação nessas condições é de 91 kW.

Considerando que o fator de carga original é:

$$FC_1 = \frac{29,17 \text{ kW}}{112 \text{ kW}} = 0,2604 \quad (25)$$

Considerando que a nova demanda média é 29,77 kW, o novo fator de carga será, então:

$$FC_2 = \frac{29,77 \text{ kW}}{91 \text{ kW}} = 0,3271 \quad (26)$$

Este resultado poderia ser também obtido através do uso de (9) e do diagrama da Figura 3, em que o coeficiente de redução de carga é:

$$p = \frac{21 \text{ kW}}{112 \text{ kW}} = 0,1875 \quad (27)$$

$$FC_2 = \frac{0,2604}{1 - 0,1875} = 0,3205 \quad (28)$$

O resultado é ligeiramente diferente daquele obtido por (26), devido à demanda média, que, depois das ações propostas, ficou um pouco maior. De qualquer forma, para utilizar o diagrama da Figura 3, é traçada uma reta vertical a partir de $p = 0,1875$ até atingir um ponto da curva relacionada ao fator de carga atual de 0,2604 (linha tracejada). Desse ponto, é traçada uma reta horizontal até o eixo dos fatores de carga melhorados, cujo valor verificado será então de 0,3205. De outra maneira, se é desejado alcançar determinado fator de carga, faz-se o caminho contrário e encontra-se o coeficiente de redução de carga necessário para tal melhoria.

A melhoria do fator de carga, para o caso considerado, conforme descrito acima, representa a liberação garantida de uma potência (ou redução da demanda de ponta) de 21 kW, que evita a aquisição de energia nova e possibilita ainda uma redução no contrato de demanda em até 9 kW em relação ao contrato anterior à ampliação da indústria.

Conclusões

Foram tecidas considerações pertinentes à melhoria de fator de carga pela redução da potência, com base na restrição parcial da demanda máxima de fornos, no sentido de complementar a medida de redistribuição de cargas. Para isto, optou-se pela utilização da comutação automática da ligação Δ para Y , em períodos pré-estabelecidos.

Com as medidas adotadas foi possível evitar um novo contrato de demanda e assegurar mínimas despesas mensais com energia elétrica. A introdução de um controle automático direto de carga, para a modulação ótima do forno, permitiu que a instalação elétrica da indústria trabalhasse adequadamente, considerando que os valores de demanda contratada, registrada e faturada são próximos e a empresa estará pagando por aquilo que realmente necessita.

O fator de carga, representando uma melhoria da eficiência energética, aumentou de 0,2604 para 0,3271.

Para efeitos de estudo e comparação é possível fazer a mesma análise utilizando os outros tipos de ligações, observando as vantagens e desvantagens para cada escolha no ambiente da aplicação.

Com relação à produção, pode-se estimar que a influência das ações na sua redução temporária, é compensada pelo fato de tornar pequeno o custo inicial do investimento no novo setor da indústria, já que não foi necessária a contratação de energia nova junto à concessionária.

Estas medidas se constituem em oportunidades para aproveitar melhor a disponibilidade de energia, por parte da empresa, e também por outras organizações que se encontrem em situação semelhante.

Trata-se então de uma oportunidade clara, que, se devidamente aplicada, pensando na melhor forma de reestruturação do processo industrial, com relação aos horários em que as cargas devam entrar em operação e na forma de modulação adequada, pode trazer benefícios imediatos para as empresas. Esses benefícios são, principalmente, economia na fatura de energia elétrica e melhor utilização da instalação, que não precisa suportar picos elevados de demanda.

O trabalho não tem a intenção de esgotar as soluções para melhorar o FC da empresa, mas contribuir para aumentar as opções de investimentos em eficiência energética e, além disso, ajudar no desenvolvimento do setor elétrico nacional.

Referências

- Alvarez, A. L. M., “Uso Racional e Eficiente de Energia Elétrica: Metodologia para a Determinação dos Potenciais de Conservação dos Usos Finais em Instalações de Ensino e Similares”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1998.
- Panesi, A. R. Q., “Fundamentos de Eficiência Energética – Industrial, Comercial e Residencial”, Livro, Ed. Ensino Profissional, São Paulo, 2006.
- Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Manual para Elaboração do programa de eficiência energética - Resolução normativa nº 300”, Brasília, DF, 2008.
- Portolann, C. A., Lafay, J-M. S., Kolzer, J. F., Silva, J., Slongo, B. L., “Aumento do Fator de Carga de Distribuidoras Restringindo o Uso de Chuveiros Elétricos”, Congreso Internacional de Distribución Eléctrica – CIDEL Argentina 2010, Buenos Aires, 27-29 Sept. 2010.
- Barbi, I, *Eletrônica de Potência*, Livro, Ed. da UFSC, Florianópolis, 1986.

*CÉSAR AUGUSTO PORTOLANN, ANDREI BORDIGNON SÃO DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – UTFPR (CAMPUS PATO BRANCO)

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osestoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br