

UM SENSOR ELETRÔNICO PARA MEDIÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

H. P. Amorim Jr., e A. C. O. Lombardi

amorim@cepel.br

Associação Educacional Dom Bosco

RESUMO

O fator de potência é um parâmetro muito importante na rede elétrica e deve ser medido e controlado, pois o consumo de potências reativas além do permitido é cobrado ao consumidor. É uma preocupação da concessionária em fiscalizá-lo através de medições, e das indústrias em controlá-lo. Um sistema elétrico é dito bem aproveitado se o parâmetro fator de potência estiver bem próximo da unidade, caso contrário vários inconvenientes são causados ao sistema, que implicam principalmente em consumo de energia sem gerar trabalho e por consequência em perdas econômicas. A idéia do trabalho foi desenvolver um sensor para medição do fator de potência, sendo este um circuito eletrônico discreto capaz de converter a defasagem entre os sinais de entrada de tensão e de corrente de uma rede 60 Hz em sinais digitais. O circuito é um conversor A/D que disponibiliza na saída uma palavra de 3 bits e sua seqüência de combinações dessas possíveis palavras é proporcional ao fator de potência. Esse circuito também indica se a rede é indutiva ou capacitiva, tem um bit de alarme que indica quando o valor ultrapassar de $\cos \varphi = 0,92$ e um outro bit que indica que o sensor não é mais capaz de medir quando o $\cos \varphi$ for menor que 0,67.

Palavras-Chaves:

Fator de Potência e Sensor Digital para Medição;

1. INTRODUÇÃO

O fator de potência foi sempre motivo de preocupação dos engenheiros encarregados do projeto e estudo dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O baixo fator de potência proveniente do excesso de energia reativa no sistema elétrico causa sérios problemas entre eles: sobrecarga nos cabos e transformadores, crescimento da queda de tensão, redução do nível de iluminação e por consequência aumento das contas de luz e força. [1]

Através da resolução nº 456 de 29 de novembro de 2000 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foi estabelecido por lei que o fator de potência mínimo deve ser 0,92. Sendo assim, todos os usuários de energia elétrica proveniente da rede elétrica de sua localidade, terão sua energia e/ou demanda reativa excedente cobradas em conta. No intuito de evitar o aumento dos custos com dimensionamento de instalação e multas, é fundamental realizar um controle com precisão do fator de potência e para garantir essa precisão, deve-se contar com um sistema de medição de alta confiabilidade [2]. Neste trabalho ora apresentado, a medição da defasagem entre os sinais de tensão e corrente da rede elétrica utilizada como suprimento de energia por uma indústria é feita em tempo real, obtendo-se diretamente uma “palavra” de três bits informando, de maneira digital, o fator de potência medido.

Embora os harmônicos gerados na linha influenciam o cálculo do fator de potência total, a técnica utilizada no trabalho para medir o fator de potência é essencialmente para a correção do $\cos \varphi$ e não é influenciado pela distorção harmônica da linha [1].

2. DEFINIÇÃO

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem. Os sinais variantes no tempo devem ser periódicos e de mesma frequência [7].

Os principais fatores que contribuem para o baixo fator de potência podem ser citados como: Motores e transformadores operando "em vazio" ou com pequenas cargas, Motores e transformadores superdimensionados, Máquinas de solda, Lâmpadas de descarga, Excesso de energia reativa capacitiva.

A máxima potência ativa absorvível da rede é fortemente limitada pelo FP, além disso os harmônicos de corrente exigem um sobre dimensionamento da instalação elétrica e dos transformadores, além de aumentar as perdas. Sobre os harmônicos, eles podem excitar ressonâncias no sistema de potência, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados à linha.

3. MODELAGEM

O princípio do funcionamento do sistema desenvolvido está na análise do atraso entre os sinais de tensão e corrente e cada detalhe deste circuito é comentado a seguir. É importante que o leitor acompanhe a descrição do funcionamento com os diagramas elétricos a seguir que demonstram o sensor para medir fator de potência – Figura 1 e Figura 2.

O princípio do funcionamento está na capacidade de análise que o circuito faz do atraso entre as duas unidades elétricas (tensão e corrente). As amostras de tensão e corrente são retificadas em meia onda e transformadas em sinais quadrados.

A análise dos dois sinais tem quatro tempos quando existe defasagem entre eles:

- (1°) O primeiro sobe e o outro ainda está baixo;
- (2°) O primeiro está alto e o outro sobe;
- (3°) O primeiro abaixa e o outro está alto e;
- (4°) O primeiro está baixo e o segundo abaixa.

No primeiro tempo, é acionado um circuito de dois bits antagônicos travando a indicação do sinal que subiu primeiro e informa se a rede é indutiva ou capacitiva. Esses dois sinais vão para

o circuito sample and hold. Ao mesmo tempo inicia-se a formação de uma rampa de tensão com função temporal, que é exposta também a um outro circuito sample and hold, indo diretamente para o conversor analógico digital.

No segundo tempo, a função da rampa é interrompida caindo a zero. No terceiro tempo é gerado um bit de permissão de leitura e os circuitos sample and hold permanecem com as seguintes indicações: a tensão de final da rampa qual mantém o conversor analógico digital de três bits atualizado e o bit de rede capacitiva ou indutiva. Os bits de alarme são decorrentes de arranjos no conversor analógico digital.

No quarto tempo todos os sinais do circuito sample and hold vão para zero volts.

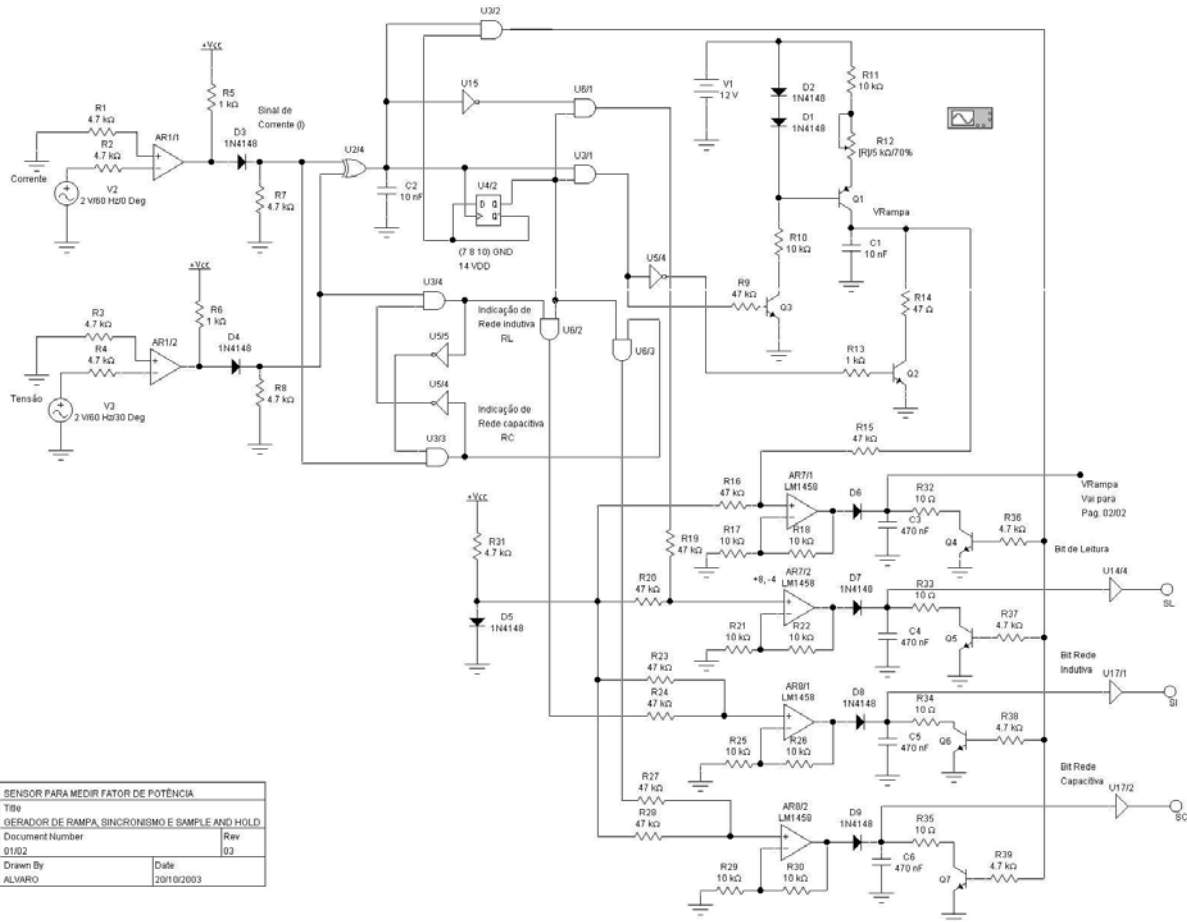


Figura 1 – Circuito Gerador de Rampa

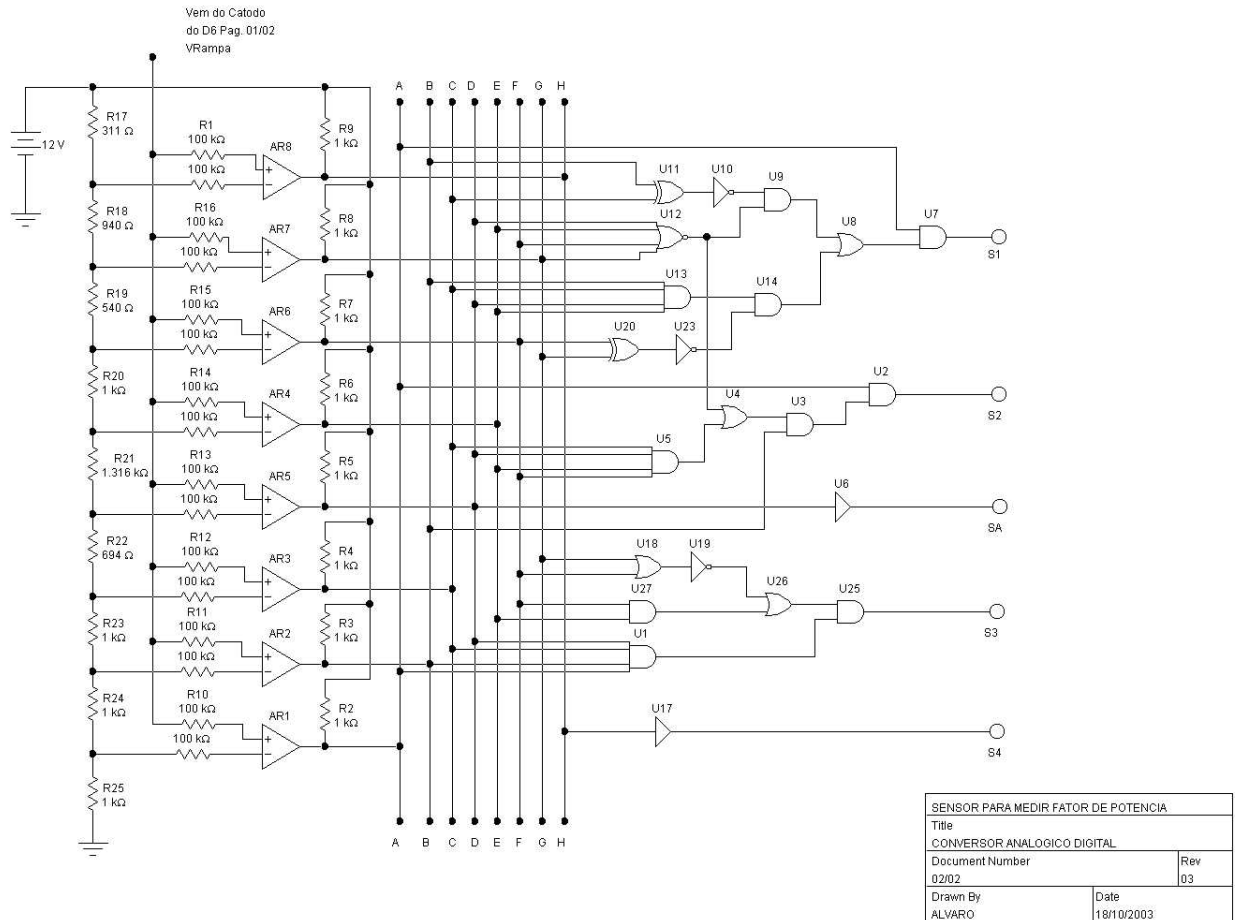


Figura 2 – Conversor Analógico Digital

De maneira resumida o sistema pode ser interpretado conforme Figura 3 a seguir.

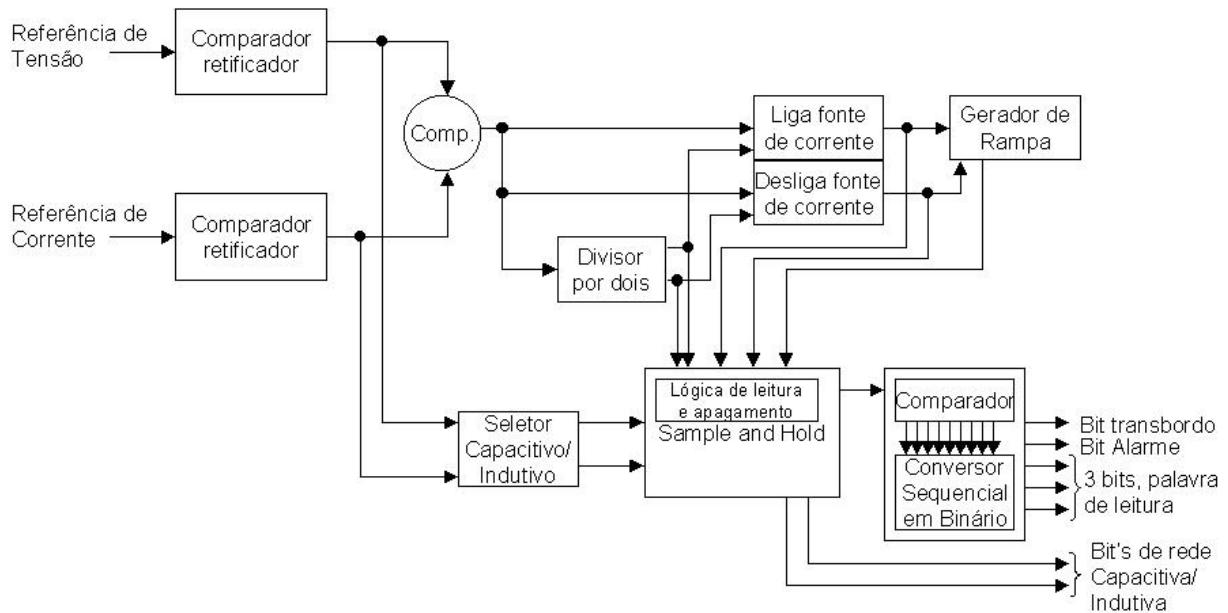


Figura 3 – Sistema de Medição de Fator de Potência

3.1. Características Técnicas do Sensor de Medição de Fator de Potência

Como dados técnicos do projeto apresentado pode-se destacar:

Entradas:

- Referência de tensão da rede de 60 Hz;
- Referência de corrente da rede de 60 Hz;

Alimentação:

- 220 / 127 Vac, 60 Hz.

Saídas:

- 3 Bits, palavra de leitura oito posições (S1, S2, S3);
- 1 Bit de leitura (SL);
- 1 Bit indicando rede indutiva (SI);
- 1 Bit indicando rede capacitiva (SC);
- 1 Bit de alarme, fator de potência < 0,92 (SA);
- 1 Bit indicando transbordo de leitura com fator de potência < 0,67.(S4)

Faixa de Valores:

A tabela 1 mostra a faixa de valores em que o sensor pode trabalhar.

Tabela 1 – Saída digital relacionada à faixa de valores dos ângulos e seus cossenos bem como o intervalo de ângulos.

Decimal	Binário				Intervalo de $\cos \varphi$	Intervalo de ângulo φ (Graus)	Diferença de graus Δ°
	S4	S3	S2	S1			
0	0	0	0	0	1 → 0,9937	0 → 6,43	6,43
1	0	0	0	1	0,9937 → 0,975	6,43 → 12,86	6,43
2	0	0	1	0	0,975 → 0,943	12,86 → 19,29	6,43
3	0	0	1	1	0,943 → 0,92	19,29 → 23,7	4,14
4	0	1	0	0	0,92 → 0,846	23,7 → 32,14	8,44
5	0	1	0	1	0,846 → 0,7818	32,14 → 38,57	6,43
6	0	1	1	0	0,7818 → 0,707	38,57 → 45	6,43
7	0	1	1	1	0,707 → 0,669	45 → 48	3,00
8	1	0	0	0	< 0,67	> 48	

Aceitação de distorção harmônica na rede:

O circuito trabalha bem sem 1/3 (um terço) do 3º harmônico ou sem 1/5 (um quinto) do 5º harmônico de acordo com os gráficos 13 e 14. Pela observação do gráfico 15, quando o sistema tem distorções de 3º e 5º harmônicos juntos, os níveis de tensão são capazes de inverter a polaridade dentro dos semi ciclos, portanto mascarando a leitura do sensor.

4. ESTUDO DE CASOS

Um exemplo demonstrando em números o quanto que uma instalação paga de multa é apresentado a seguir. Como ficou evidenciado anteriormente, é de suma importância para planta industrial manter o fator de potência de sua instalação dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Método Analítico é uma forma de calcular o Banco de Capacitores necessário numa indústria, numa Rede distribuição ou até mesmo na Rede de transmissão.

P_{at} = Potência Ativa

φ_1 – Ângulo do fator de potência original

φ_2 – Ângulo do fator de potência desejado, no caso da legislação brasileira é $\arccos 0,92$ que é igual a 23,07°.

$$P_C = P_{at} \times (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)$$

Avaliação Mensal do fator potência

Para os consumidores pertencentes ao sistema tarifário convencional, o faturamento de energia reativa pode ser feito através das fórmulas a seguir:

$$F_{dr} = \left(D_{am} \times \frac{0,92}{F_p} - D_t \right) \times T_{da}$$

$$F_{er} = \left(C_{am} \times \frac{0,92}{F_p} - D_t \right) \times T_{ea}$$

$$F_{ar} = \left(C_{am} \times \frac{0,92}{F_p} - C_f \right) \times T_{ab}$$

$$F_p = \frac{C_{am}}{\sqrt{C_{am}^2 + C_{rm}^2}}$$

F_{dr} – Faturamento da demanda de energia reativa excedente, em UM (Unidade Monetária);

F_{er} – Faturamento do consumo de energia reativa excedente, em UM;

D_{am} – Demanda de potência ativa máxima registrada no mês, em kW;

C_{am} – Consumo de energia ativa registrada no mês, em kWh;

C_f – Consumo de energia ativa faturamento no mês em kWh;

D_t – Demanda de potência ativa faturável no mês, em kW;

T_{da} – Tarifa de demanda de potência ativa no segmento convencional, em UM/kW;

T_{ea} – Tarifa de energia ativa no segmento convencional, em UM/kWh;

F_p – Fator de potência médio mensal, calculado de acordo com a equação, abaixo:

C_{rm} – Consumo de energia reativa registrado no mês, em kVArh.

Considere uma instalação industrial de pequeno porte, que tem a alimentação de 6,9 kV e cuja conta de energia na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Discriminação de uma conta elétrica industrial

Ultima Leitura (kWh)	178	Leitura atual (kWh)	230	Leitura Atual (kVArh)	190
FMM	720	Leitura anterior (kWh)	120	Leitura anterior (kVArh)	65
Demanda Registrada	200	Diferencia	110	Diferencia	125
Demanda. Contratada	170	FMM	720	FMM	720
85% Dmax	196	Consumo (kWh)	79.200	Consumo (kVArh)	90.000
Demanda Incluída		Consumo incluído		Fator de Potência	0,66

Consumo de energia ativa:

$$C_{am} = (\text{leitura atual} - \text{leitura anterior}) \times \text{FMM}$$

FMM – fator de multiplicação do medidor

$$C_{am} = (203-120) \times 720 = 79,200 \text{ kWh}$$

Consumo de energia reativa

$$C_{rm} = (\text{leitura atual} - \text{leitura anterior}) \times \text{FMM}$$

$$C_{rm} = (190-65) \times 720 = 90.000 \text{ kVArh}$$

$$T_{da} = \text{US\$ } 5,84/\text{kW (valor considerado)}$$

$$T_{ea} = \text{US\$ } 0,051185/\text{kWh (valor considerado)}$$

Desta forma:

$$F_p = \frac{C_{am}}{\sqrt{C_{am}^2 + C_{rm}^2}} \quad \text{logo} \quad F_p = \frac{79.200}{\sqrt{79.200^2 + 90.000^2}} = 0,66$$

$$D_f = 170 \text{ kW}$$

O cálculo do faturamento de energia reativa excedente é realizado da seguinte forma.

$$D_{dph} = \left(200 \times \left(\frac{0,92}{0,66} - 1 \right) \right) \times 5,84 = 78,79 \text{ kW}$$

$$F_{erph} = \left(79.200 \times \left(\frac{0,92}{0,66} - 1 \right) \right) \times 0,05185 = \text{UM } 1.617,72$$

Fatura total mês

$$F_{tot} = F_{dam} + F_{eam} + F_{ar} + F_{er}$$

F_{dam} – faturamento de demanda de potência ativa mensal, em UM

F_{eam} – faturamento de consumo de energia ativa mensal, em UM.

$$F_{tot} = [(200 + 78,79) \times 5,84] + [(79200 + 3108) \times 0,5185]$$

$$F_{tot} = 1628,12 + 578,85$$

$$F_{tot} = \text{UM } 7.345,39$$

Os capacitores são normalmente designados pela sua potência nominal reativa, contrariamente aos demais equipamentos, cuja característica principal é a potência nominal aparente. A potência nominal de um capacitor em kVAR é aquela absorvida do sistema quando este está submetido a uma tensão e frequências nominais a uma temperatura ambiente não superior a 20° C (ABNT). Conhecida a potência nominal do capacitor, pode-se facilmente calcular a sua capacitância, através da equação

$$C = \frac{1.000 \times P_C}{2 \times \pi \times F \times V_n^2}$$

P_C – frequência nominal do capacitor, em kVAR

F – frequência nominal, Hz

V_n – tensão nominal, em kV

C – capacidade, em μF .

Para o dimensionamento dos capacitores é necessário calcular o valor total do capacitor suficiente para anular a potência reativa e dividi-los em sucessivos bancos com pesos de 1, 2 e 4. Analisando a potência reativa do exemplo e assumindo a potência reativa máxima do sistema = 90.15 kVAR, calcula-se o banco de capacitores necessário para anular totalmente a potência reativa indutiva, em outras palavras, colocar o $\cos\phi = 1$.

Sendo o valor do capacitor de 5,023 μF deve-se dividir por 7 de onde se encontra o valor do banco de capacitor de peso 1 como segue abaixo.

$$C_1 = \frac{5,023}{7} = 0,717 \mu\text{F}$$

$$C_1 = 0,717 \mu\text{F}$$

$$P_{C1} = \frac{C \times 2 \times \pi \times f \times V_n^2}{1000} = \frac{0,717 \times 2 \times \pi \times 6,9^2}{1000} = 12,87 \text{ kVAR}$$

O 2º banco de capacitor vai ter peso 2, bastando multiplicar o valor do banco 1 por 2.

$$C_2 = 2 \times C_1$$

$$C_2 = 2 \times 0,717 \mu F$$

$$C_2 = 1,435 \mu F$$

$$P_{C2} = 2 \times P_{C1}$$

$$P_{C2} = 25,74 kVAr$$

O 3º banco de capacitor vai ter peso 4, bastando multiplicar o valor do banco 1 por 4 ou o 2º por 2.

$$C_4 = 4 \times C_1$$

$$C_4 = 4 \times 0,717 \mu F$$

$$C_4 = 2,87 \mu F$$

$$P_{C4} = P_{C2} \times 2 = 2 \times 25,74$$

$$P_{C4} = 51,48 kVAr$$

A potência total do banco de capacitor é a soma e $P_{C1}+P_{C2}+P_{C4}=90,09$ kVAr. Desta forma as variações de cargas reativas indutivas influenciarão no $\cos\varphi$ da linha e o sensor detectando essa variação, enviará a nova leitura para o sistema de correção que atuará permitindo que os bancos de capacitores se permutem dinamicamente de forma a manter o $\cos\varphi$ como foi previamente estipulado.

Suponha que para uma potência reativa do sistema igual a 50 KVar, o sistema tem o $\cos\varphi=0,8456$ e que o $\cos\varphi$ estipulado seja de 0,945. Então o sistema precisa de um capacitor com o valor de 1,186 μF ou 21,27 kVAr para manter hipoteticamente o $\cos\varphi$ igual 0,945, para isso basta que o sistema organize os bancos de capacitores da seguinte forma, conforme Tabela 3:

Tabela 3 – Tabela de valores dos bancos de capacitores

Banco de Capacitor (μF)	Potência (kVAr)	Porta	Ação
C3	2,87	S3	
C2	1,435	S2	X
C1	0,717	S1	
Total (μF)	5,022		1,435

Nesse caso os bancos de capacitores com o **X** entrariam em ação. Como o valor desse banco é maior do que o necessário, o novo $\cos\varphi$ passaria a ser 0,9564 e a partir desse valor basta consultar a Tabela 1 para localizar o valor comparativo entre 0,945 e 0,9564. E o resultado entre o requerido e o ajustado, está situado dentro do mesmo intervalo de $\cos\varphi$ na posição 3 entre 0,975 e 0,943 e como consequência sistema fica estabilizado.

O exemplo foi realizado tomando como base uma planta usando tensão de entrada de 6,9 kV. Uma outra aplicação muito vantajosa e mais refinada seria usar o sistema para monitorar e corrigir as várias seções da planta em baixa tensão, pois comutar chaves em baixa tensão é muito menos complicado do que em média tensão, usar capacitores com dielétrico para baixa tensão tem o valor de aquisição bem menor e a sub divisão de circuitos torna o valor de capacitância do banco menor, sendo assim, pode-se fazer investimento em médio prazo. Como o controle é multi-seccionado, cada seção faz a correção individualmente tornando o sistema mais sensível e controlável.

5. CONCLUSÃO.

O circuito foi todo emulado no EWB (Electronic WorkBench) e na prática, os circuitos gerador de rampa, o seletor de linha indutiva e capacitiva e toda lógica pertinente conforme o simulado no EWB. O circuito é eficiente para diversas aplicações, pois consegue acionar banco de capacitores discretos ou converter níveis de tensão capaz de ser injetado no enrolamento de campo de um motor síncrono para controlar o fator de potência da rede de uma planta industrial.

Se for utilizado um controle através de banco discreto de capacitores, o circuito poderá ser aplicado fase a fase inclusive recomendado quando o fator potência for desbalanceado por fase. Cada um dos três circuitos será fonte para fazer um controle distinto por fase o que levará o circuito a ser independente por fase.

Outra aplicação do sensor pode ser somente para executar uma leitura da rede através de display ou monitor de um computador, pois as saídas permitem a análise da rede em tempo real com indicação do valor do fator de potência nos intervalos descritos na especificação técnica do circuito. Permite ainda a indicação se o fator de potência ultrapassou o permitido além de indicar se a carga tem reatância indutiva ou capacitiva.

O sensor para medição do fator de potência é um circuito que pode ser aplicado na prática, o perfil acadêmico do projeto é de boa precisão, porém sugere que se trabalhe ainda mais na exatidão de leitura. Como trabalho acadêmico não foi enfatizada a exatidão do sensor que para isso, necessitaria de aumentar o número de bits de saídas e como consequência aumentar em potência de dois os comparadores e em proporção exponencial os arranjos das portas lógicas para decodificar as saídas dos comparadores. Para aumentar a exatidão basta, na prática, usar um conversor A/D (Analogico para Digital), com grande sucesso até porque existem conversores A/D com muitos bits de saída que daria uma excelente exatidão ao projeto.

Uma outra aplicação para o projeto é o desenvolvimento num circuito integrado dedicado para a aplicação como sensor de corrente, pois integrar uma grande quantidade de componentes em larga escala (VLSI) de forma que todo o projeto se transforme em um só componente e que possa fazer parte de um sistema que controle o fator de potência de uma planta elétrica qualquer.

Como trabalhos futuros, embora, o sensor seja capaz de monitorar as variações da defasagem entre a tensão e a corrente da rede, ele também poderá gerar informações para um sistema de controle qual se destinará a corrigir o $\cos\phi$ da rede mantendo-o no valor desejado. O controlador é um trabalho que pode ser desenvolvido a partir das informações geradas pelo sensor. Aplicando o que há de mais avançado e interessante para sistemas de controle para malhas fechadas, podemos citar a lógica Fuzzy [13]. O sistema de controle implementado com esses recursos passa ter robustez e muita confiabilidade, pois a características dessa tecnologia assim o permite .

Como cada planta tem características de cargas, demandas e horários de consumos diferentes. Essas condições geram a oportunidade de desenvolvimento para um estudo econômico customizado onde poderá saber pelo histórico das faturas e o sistema implantado, quanto tempo se paga, inclusive com dimensionamento de instalação superior ao atual necessário de modo que possa planejar uma expansão na rede e ainda o sistema implantado possa corrigir a planta sem que o controle saia de sua faixa dinâmica.

Sabe-se que além do $\cos\phi$, a distorção harmônica é um fator que influencia no fator de potência, porém a parcela do fator de potência influenciado pela distorção harmônica, não é possível corrigir com o uso de capacitores, portanto é necessário monitorar qualitativa ou quantitativamente o quanto a distorção harmônica influencia no fator de potência de modo a saber quando um novo equipamento instalado pode influenciar no fator de potência da planta seja ele reativo ou distorsivo. O incremento no sensor deverá ser feito de modo que o circuito acuse o valor total do fator de potência e também discrimine o $\cos\phi$ e a parcela potência influenciada pela potência distorsiva.

Um futuro trabalho poderá ser a continuidade do trabalho na parte prática, testando e montando-o com desenvolvimento do lay-out e a confecção da placa de circuito impresso invólucro para poder alojar o circuito. Uma vez montado e testado, o circuito poderá ser aplicado na prática ou didaticamente.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Creder, H. - Instalações Elétricas. Editora LTC, 2000.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000.
- [3] Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr, C. e Kursko, A. - Máquinas Elétricas. Editora MacGraw – Hill, 1978.
- [4] Mamed Filho, J. - Instalações Elétricas Industriais. Editora LTC, 2002.
- [5] www.din.uem.br/ia/precursos/zadeh.html
- [6] www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/harmo.html
- [7] www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pfp.html
- [8] www.engecomp.com.br
- [9] www.generalcablecelcat.com
- [10] www.letronet.com.br
- [11] www.light.com.br
- [12] www.sobraep.org.br/crise/lampadas.pdf
- [13] www.tecnident.com.br
- [14] www.questlink.com