

Análise da Viabilidade Técnico-Econômica para a Instalação de Condicionadores de QEE

Bruna R. P. Conrado* Danilo I. Brandão*
Eduardo V. Liberado**
Wesley A. Souza*** Alexandre C. Moreira****

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, CEP 31270-901 (e-mail: brunarconrado@ufmg.br, dibrandao@ufmg.br).

** Campus Experimental de Rosana, Universidade Estadual Paulista, Rosana -SP, CEP 19274-000 (e-mail: verri.liberado@unesp.br)

*** Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba -SP, CEP 18052-780 (e-mail: wesleyangelino@ieee.org)

**** Núcleo de Inovação, Pesquisa e Ensino em Mecatrônica – NIPEM, Universidade Federal de São João del Rei, Ouro Branco - MG, CEP 36420-000 (e-mail: amoreira@ufsj.edu.br)

Abstract: This paper presents a cost-benefit analysis of investment on installation of power quality conditioners. For this, it is considered the economic feasibility indices, such as net present value (NPV), internal rate of return (IRR), simple payback and equity payback. To evaluate the proposed method, two case studies of industrial consumers are implemented in PSCAD. Thus, considering a monthly debt interest rate of 1.2%, the total cost of the suggested power conditioning solution is compared to the annual savings of the exceeding reactive energy reduction. Moreover, the economic indices are computed and analyzed to determine the investment feasibility.

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo propor uma ferramenta para realizar a análise custo *versus* benefício, utilizando indicadores de viabilidade econômica como valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback* simples e descontado, para o investimento na possível instalação de equipamentos condicionadores de distúrbios de qualidade de energia. Como forma de avaliar o método proposto, foram implementados dois estudos de caso para um consumidor industrial, com o auxílio do software PSCAD. O custo da implantação da solução de compensação, considerando um financiamento bancário com uma taxa de juros de 1,2% a.m., foi comparado com a economia advinda da redução dos valores anuais do consumo de energia reativa excedente. A partir disso, foi possível realizar o cálculo e análise dos indicadores, visando indicar a viabilidade do investimento.

Keywords: cost; exceeding reactive energy; power factor; power quality; economic feasibility.

Palavras-chaves: custo; energia reativa excedente; fator de potência; qualidade da energia elétrica; viabilidade econômica.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as preocupações com os diversos temas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) têm sido cada vez mais comuns entre as concessionárias de energia e aos consumidores em geral (Dugan et al., 2012). Tal preocupação decorre em parte da obrigatoriedade da observação de normas e legislações que regem o mercado de energia elétrica. No cenário nacional, com a vigência do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia) – Módulo 8 (ANEEL, 2018), que trata exclusivamente dos indicadores de QEE, vários requisitos estão sendo exigidos, visando melhorar a qualidade da energia no sistema elétrico.

No sistema elétrico, de modo geral, os efeitos produzidos pelo conteúdo harmônico na tensão e corrente são considerados nocivos ao sistema de potência, aumentando as perdas, criando vibrações, erros de medidas e falhas de controle. Para minimizar o conteúdo harmônico, recorre-se a filtragem da tensão ou da corrente. Os filtros podem ser do tipo passivo ou ativo (d'Ávila Filho et al., 2008).

Em relação à compensação de potência reativa, um maior grau de flexibilidade em termos de dispositivos que atendam tal demanda pode ser obtido utilizando, por exemplo, os Compensadores Estáticos de Reativos (do inglês, *Static Var Compensator* – SVC). Nestes sistemas, a impedância dos elementos armazenadores de energia pode variar no tempo dentro de um intervalo específico. Os elementos

básicos dos SVCs são os Capacitores Chaveados a Tiristor (TSC) (Miller, 1982) e os Reatores Controlados a Tiristor (Das et al., 2018). Tendo em vista o exposto, existem várias opções para a compensação da circulação de potência reativa, harmônicos e desbalanço de carga. Além disso, é possível realizar combinações entre essas soluções.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é propor uma ferramenta para análise do custo *versus* benefício de algumas soluções, e suas associações de compensação propostas pelo algoritmo desenvolvido em Moreira (2017); Moreira et al. (2018), verificando os benefícios econômicos da instalação do compensador e a atratividade financeira de sua implantação. Por exemplo, uma indústria que em determinados momentos do dia ou da semana viola o fator de potência e que, por consequência, é tarifada pelo consumo de energia reativa excedente. Ao aplicar esta ferramenta, o consumidor deverá ser informado, se em um determinado período de tempo a melhor solução é o pagamento do consumo de energia reativa excedente na conta de energia elétrica ou se é realizar investimentos em compensação.

O artigo está dividido em quatro seções. A Seção 2 apresenta a ferramenta proposta para análise e avaliação da viabilidade técnico-econômica de implantação de condicionadores de distúrbio da QEE. Na Seção 3 são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta, por fim, na Seção 4, as considerações finais deste trabalho.

2. FERRAMENTA DE ANÁLISE PROPOSTA

A Figura 1 ilustra o diagrama de blocos da ferramenta proposta neste trabalho, apresentada ao longo desta seção.

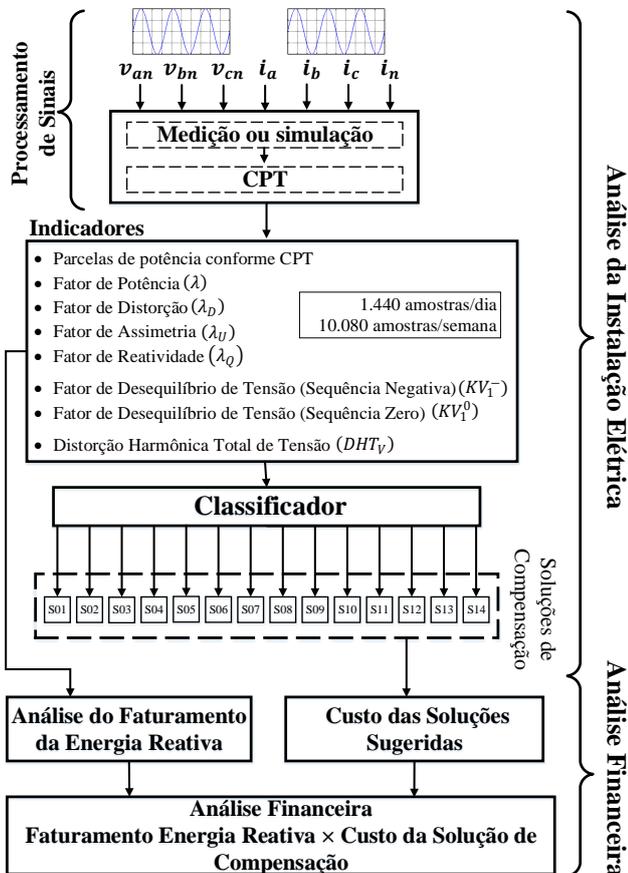


Figura 1. Diagrama de blocos da ferramenta proposta.

2.1 Análise da Instalação Elétrica

A análise da instalação elétrica se baseia na medição das tensões e correntes instantâneas no PAC (Ponto de Acoplamento Comum). Em seguida, é realizada a decomposição das parcelas de potência conforme proposto pela Teoria de Potência Conservativa (do inglês, *Conservative Power Theory - CPT*) (Tenti et al., 2011b,a), no cálculo dos fatores de conformidade da carga (Paredes et al., 2012) e outros indicadores de QEE, tais como fator de desequilíbrio e distorção harmônica total de tensão. Tais indicadores e parcelas de potência são as variáveis de entrada do algoritmo classificador desenvolvido em Moreira et al. (2018). A CPT se torna um diferencial neste trabalho por permitir o cálculo da "energia reativa" (W_r), conceito que pode ajudar na identificação do comportamento da carga como fonte de tensão ou fonte de corrente harmônica (Tenti et al., 2011a). Além disso, os fatores de conformidade de carga permitem identificar distúrbios que condizem às características da carga, como não-linearidades, reatividade e desbalanço (em carga trifásica), independentemente das condições da tensão de alimentação (senoidal ou não senoidal) (Marafão et al., 2015).

Em aprendizado de máquina, o classificador é um algoritmo responsável por identificar a qual categoria (rótulo ou classe) pertence uma nova amostra, com base em treinamento sobre um conjunto de dados com atributos e diversas instâncias rotuladas, ou seja, sendo anteriormente categorizadas por um especialista. Os classificadores são utilizados em diversas áreas e aplicações, como na identificação de "spam" ou "não-spam" (Silva et al., 2013), diagnóstico a um paciente com base em atributos clínicos (pressão arterial, presença ou ausência de certos sintomas, etc.) (Verde et al., 2018) ou em aplicações em sistemas de energia (Moreira et al., 2018; Souza et al., 2018). Na literatura, um classificador também é conhecido como algoritmo de reconhecimento de padrões (Souza et al., 2018).

Em Moreira (2017); Moreira et al. (2018), utilizou-se o método de classificação supervisionado. Para a fase de treinamento e de construção do modelo de classificação, uma base de dados foi empregada com amostras previamente rotuladas por um especialista e, para a fase de classificação com novas medições no ponto de medição, os indicadores são calculados e o algoritmo retorna a estratégia de compensação (categoria) recomendada para a medição. O modelo classificador desenvolvido, portanto, analisa os indicadores medidos e, através de técnicas de reconhecimento de padrões, propõe a melhor solução técnica dentre as quatorze possíveis soluções de compensação (Condicionadores de distúrbios de QEE). Para uma resposta confiável a respeito da solução de compensação, é necessário um período de observação de no mínimo uma semana completa (sete dias consecutivos), de forma a retratar com precisão o perfil de carga de uma indústria.

2.2 Análise do Faturamento da Energia Reativa

Como previamente dito, o classificador é responsável por identificar a solução técnica mais adequada para compensação do distúrbio. O Fator de Potência (FP ou λ) é um índice global de utilização de energia, contabilizando a razão entre potência ativa e distúrbios eletromagnéticos.

Desta forma, deseja-se garantir um valor próximo ao unitário para esse quantificador. Uma vez identificada uma

solução para correção do FP através do classificador, a etapa seguinte consiste na realização de uma análise do consumo de energia reativa excedente. O objetivo desta etapa é confrontar o custo da solução indicada com o custo a ser pago devido ao excesso de reativos na instalação.

Segundo a Resolução Normativa nº 414, art. 76 da ANEEL (2010), o fator de potência da unidade consumidora, para fins de cobrança, deve ser verificado pela distribuidora por meio de medição permanente, de forma obrigatória para o grupo A. O art. 95 determina que o fator de potência de referência (f_R), indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92. Na mesma resolução, os art. 96 e 97 estabelecem que aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativos que excederem o limite permitido, aplicam-se as cobranças estabelecidas na resolução, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A (ANEEL, 2012).

Os consumidores do grupo A são classificados nas modalidades tarifárias azul, verde ou convencional binômia, de acordo com o consumo de energia e demanda de potência ativa. Neste estudo, considera-se a modalidade tarifária horária verde, de acordo com as seguintes condições:

- I Tarifa única para demanda de potência (R\$/kW);
- II Para o consumo de energia (R\$/MWh):
 - Tarifa única para posto tarifário ponta (R\$/MWh);
 - Tarifa única para posto tarifário fora de ponta (R\$/MWh).

Os valores de energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são apurados conforme (1) e (2).

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^{n_1} \left[EEAM_T \times \left(\frac{f_R}{f_T} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE} \quad (1)$$

em que, E_{RE} é o valor correspondente à energia elétrica reativa excedente a quantidade permitida pelo fator de potência de referência f_R , no período de faturamento, em reais. $EEAM_T$ é o montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo T de uma hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora. f_R é o fator de potência de referência igual 0,92. f_T é o fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo T de uma hora, durante o período de faturamento. n_1 é o número de intervalos de integralização T do período de faturamento para os postos tarifários ponta e fora de ponta. VR_{ERE} é o valor de referência equivalente à tarifa de energia em reais por megawatt-hora.

$$D_{RE}(p) = \left[MAX_{T=1}^{n_2} \left(PAM_T \times \frac{f_R}{f_T} \right) - PAF(p) \right] \times VR_{DRE} \quad (2)$$

em que, $D_{RE}(p)$ é o valor correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência no período de faturamento, em reais. PAM_T é a demanda de potência ativa medida no intervalo de uma hora T , durante o período de faturamento, em quilowatt. $PAF(p)$ é a demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário (p) no período de faturamento, em quilowatt. VR_{DRE} é o valor de referência equivalente às tarifas de demanda de potência para o posto tarifário fora de ponta das tarifas de fornecimento aplicáveis aos subgrupos do grupo A para a modalidade tarifária horária azul. n_2 é o número de intervalos de

integralização T , por posto tarifário p no período de faturamento. MAX identifica o valor máximo da equação em cada posto horário. T indica o intervalo de uma hora no período de faturamento. p indica posto tarifário ponta ou fora de ponta para as modalidades tarifárias horárias ou período de faturamento para a modalidade tarifária convencional binômia.

Além disso, em (1) e (2) deve-se considerar (ANEEL, 2010):

- I O período de seis horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre 23h30min e 6h30min, apenas fatores de potência f_T inferiores a 0,92 capacitivo, verificados a cada intervalo de uma hora, T ;
- II O período complementar ao definido no inciso I, apenas fatores de potência f_T inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de uma hora.

Por fim, em (1) e (2) pode-se verificar que todas as parcelas de consumo de energia ativa e reativa contribuem para o ônus final na conta de energia elétrica.

2.3 Análise Financeira Entre Excesso de Reativo e Solução de Compensação

Após o levantamento do custo da solução de compensação e do faturamento de energia reativa, o método deve realizar a análise e indicar qual das opções possui o menor custo. O investimento na aquisição e implantação de uma solução de compensação pode resultar em um adiamento de investimentos de grande porte, bem como redirecionamento ou readequação de recursos para obras que apresentem um grau de prioridade mais elevado. Para evitar isto, considera-se um financiamento para Pessoa Jurídica (PJ) via aquisição de máquinas e equipamentos. Nesta modalidade, o valor financiável corresponde a 90% do valor do bem, carência de 03–12 meses e prazo de pagamento (p) em até 180 meses.

Para o cálculo do financiamento, utilizou-se o Sistema de Amortização Constante (SAC), ou também conhecido como Método Hamburguês, na qual a parcela de amortização da dívida é calculada tomando por base o total da dívida (saldo devedor) dividido pelo prazo do financiamento, como um percentual fixo da dívida; desta forma, considera-se um sistema linear. À medida que a dívida começa a ser amortizada, a parcela dos juros e conseqüentemente a prestação como um todo tende a decrescer, uma vez que o próprio saldo devedor se reduz. O valor do saldo devedor inicial, ou seja, durante o período de carência, é calculado como indicado em (3).

$$SD_0 = vf \times VB \quad (3)$$

em que, vf é a parte que será financiada, em % e VB é o valor do bem, em R\$.

O valor do saldo devedor após o período de carência, é:

$$SD_p = SD_{p-1} - A \quad (4)$$

A amortização indica um processo de extinção de uma dívida através de pagamentos periódicos, calculado por (5), que são realizados em função de um planejamento, de modo que cada prestação corresponde à soma do reembolso do capital ou do pagamento dos juros do saldo devedor.

$$A = \frac{SD_0}{p} \quad (5)$$

em que, A é o valor a ser amortizado constantemente após o período de carência, em R\$ e p é o número de parcelas a ser considerada no financiamento.

O cálculo dos juros no período p é dado por (6),

$$J_p = i \times \sum_{p=1}^k (SD_p \times n) \quad (6)$$

tal que, i é a taxa de juros proporcional ao período, em %. SD_p é o saldo devedor no período p , em R\$ e n é o número de parcelas que o saldo permanece inalterado.

O valor da prestação, calculado por (7), é resultado da soma da parcela de capital (amortização) e encargos financeiros (juros), os quais são determinados pela incidência da taxa efetiva periódica sobre o saldo devedor anterior (Sandrini, 2008).

$$PMT_p = J_p + A \quad (7)$$

sendo que, PMT_p é o valor da parcela no período p após a carência, em R\$.

O valor a ser pago durante o período de carência pode ser encontrado em (8).

$$C = i \times SD_0 \quad (8)$$

no qual C é o valor a ser pago no período de carência, em R\$.

Após, calcula-se o fluxo de caixa anual. O cálculo das despesas é o somatório das parcelas do financiamento e da manutenção anual do equipamento. O valor da manutenção do equipamento é baseado na sua depreciação e na sua vida útil, sendo,

$$D = \frac{(VB - R)}{v} \quad (9)$$

em que, D é o valor da depreciação anual do equipamento, em R\$. R é o valor residual, em R\$ e v é a vida útil do equipamento, em anos.

O custo de manutenção do equipamento é calculado por:

$$CM_a = \{VB - [D \times (a - 1)]\} \times m \quad (10)$$

onde, CM_a é o custo da manutenção do equipamento por ano, em R\$. a é o ano, $a = 1, 2, 3, 4, \dots, k$ e m é a taxa de manutenção do equipamento, em %. Resultando em,

$$despesa = \sum_{a=1}^k (PMT_a + CM_a) \quad (11)$$

As receitas foram compostas pelo consumo de reativo, ou seja, o consumo foi considerado como uma componente positiva no fluxo de caixa. No instante zero, i.e, na instalação da solução de compensação, o valor pago na conta de energia pelo consumo de energia reativa excedente deixará de ser uma despesa.

Investimento é toda ação da qual se espera obter benefícios futuros (Oliveira et al., 2018) e, por haver a questão temporal, deve ser considerado o conceito de variação do valor do dinheiro no tempo. Para uma correta análise e decisão da viabilidade econômica de um investimento é necessário calcular e analisar os indicadores de viabilidade. Entre os mais tradicionais estão o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o *Payback* Simples e o *Payback* Descontado. Não existe o melhor

indicador, mas aquele que se adequa às expectativas do tomador de decisão, que podem variar de acordo com o tipo de investimento (Oliveira et al., 2018).

Taxa Mínima de Atratividade (TMA) É uma taxa de juros que ao se fazer um investimento, o investidor espera um retorno pelo menos igual a essa taxa. A TMA é única para cada investidor e não existe fórmula matemática para calculá-la, pois ela pode variar com o tempo (Oliveira et al., 2018).

Valor Presente Líquido (VPL) É um indicador que calcula o valor presente (ou valor atualizado) de movimentos financeiros futuros, descontados a uma taxa de juros, considerando o investimento inicial (Diniz et al., 2016), indicando o potencial de geração de valor. O critério de análise do VPL é:

- Se $VPL > 0$ deve-se aceitar o investimento;
- Se $VPL = 0$ é indiferente aceitar ou rejeitar o investimento;
- Se $VPL < 0$ não se deve aceitar o investimento.

Pode-se equacionar o VPL conforme apresentado em (12).

$$VPL = -SD_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (12)$$

onde, VPL é o valor presente líquido, em R\$. FC é o fluxo de caixa líquido, em R\$. t é o período, em anos e n : vida útil do projeto, em anos.

Taxa Interna de Retorno (TIR) A TIR, também conhecida como taxa de desconto do fluxo de caixa, é a taxa de juros obtida quando se iguala o VPL (12) a zero. Caso seja positivo, indica que o retorno recebido pelo investimento é superior ao capital investido inicialmente. De maneira geral, deve-se aceitar o projeto se a TIR for superior a TMA. Caso contrário, rejeita-se. Se a $TIR = TMA$, isso significa que é indiferente aceitar ou rejeitar o projeto. O cálculo é dado por:

$$TIR = -SD_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} = 0 \quad (13)$$

Payback Simples Uma importante etapa da avaliação de um investimento é determinar o tempo necessário para recuperação do capital investido a partir do fluxo de caixa estimado no projeto, pois o aprofundamento desse estudo só deve ser realizado quando o prazo indicado esteja dentro do esperado pelo investidor. O tempo necessário para recuperar o capital investido é denominado *payback* (PB). Ao analisá-lo, a melhor alternativa de investimento é aquela onde o tempo de retorno do investimento é menor.

$$PB_S = \frac{SD_0}{FC} \quad (14)$$

tal que, PB é o *payback* simples, em anos.

Payback Descontado O *payback* descontado é o período de tempo necessário para recuperar o investimento, avaliando-se os fluxos de caixa descontados, ou seja, considerando o valor do dinheiro no tempo. De maneira geral, deve-se encontrar o tempo t que satisfaça (13).

2.4 Análise de Duas ou Mais Soluções de Compensação
Como citado na subseção 2.2, para uma resposta confiável do classificador, é necessário um período de observação

de, no mínimo, uma semana completa. Dependendo do comportamento da carga ou do tipo de instalação sob análise, o classificador pode, em alguns casos, sugerir mais de uma solução de compensação. Nestes casos, a ferramenta proposta deve realizar uma análise do custo de cada compensador em conjunto com o faturamento de energia reativa, de forma a selecionar qual proposta é mais atrativa financeiramente para então prosseguir para a etapa seguinte. Por exemplo, para uma determinada instalação industrial que apresenta desequilíbrio de corrente e o fator potência em determinados momentos encontra-se abaixo de 0,92, o modelo proposto então sugere a instalação de bancos de capacitores ou SVC. Após o levantamento do custo de cada compensador e do faturamento de energia reativa, a ferramenta deve comparar qual proposta onera em menos custo para a indústria, ou seja, instalação do banco somado ao pagamento de uma parcela de energia reativa ou instalação do SVC.

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com o objetivo de avaliar a ferramenta de análise proposta neste trabalho, é apresentada nesta seção a sua aplicabilidade através de um consumidor industrial do grupo A, subgrupo A4 e com nível de tensão de 11,9 kV. Na modalidade tarifária, enquadra-se na categoria horo-sazonal verde, com uma demanda contratada de 750 kW. Neste trabalho, o estudo é realizado através de simulações computacionais de dois casos com auxílio do software PSCAD; no entanto, também é possível realizar a análise de dados obtidos através de medições em campo. Para a indústria em análise, será considerado o horário de funcionamento das 06h às 21h, de segunda a sexta-feira. Os dados das tensões de alimentação, equivalente de rede, os parâmetros do transformador, cargas e horário de funcionamento foram obtidos junto à uma indústria metalúrgica localizada no interior do estado de São Paulo. A Figura 2 apresenta o sistema elétrico simulado.

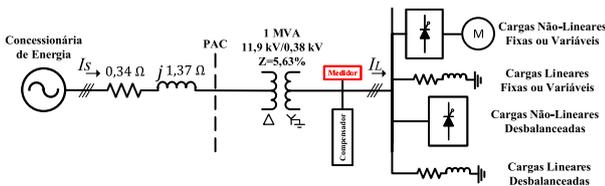


Figura 2. Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado.

3.1 Caso 1

Este caso representa o sistema elétrico da Figura 2 alimentando uma carga linear e balanceada. Assim como em uma instalação industrial em situação real de operação, o consumo de energia e o fator de potência sofrem variações ao longo do dia. Neste caso, como pode-se observar na Figura 3(a), ao longo do dia o fator de potência (λ) é violado entre 6h às 16h e 20h às 21h. Os dados de consumo foram extraídos através de simulação da indústria em operação.

Através da ferramenta proposta, foi possível estimar os valores pagos pelo excedente de energia reativa (E_{RE}) em horário de ponta, fora de ponta e demanda de potência reativa (D_{RE}). As tarifas foram retiradas de faturas referentes ao ano de 2019 da concessionária de energia ENEL Brasil Distribuição São Paulo. O horário de ponta é compreendido entre 17h e 20h. A concessionária admite que [(leitura atual - leitura anterior) \times constante de medição]

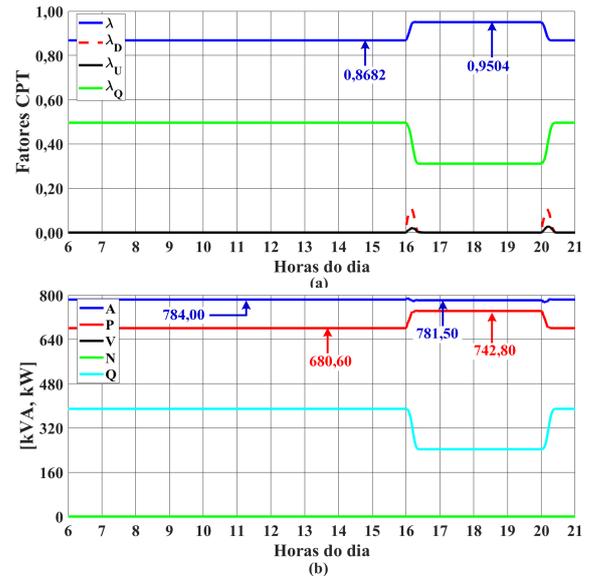


Figura 3. Evolução dos indicadores antes da compensação para o caso 1 (a) fatores de conformidade da carga (b) parcelas de potência.

será a leitura considerada para o faturamento. As tarifas e constantes de medição adotadas estão apresentadas na Tabela 1. O faturamento da energia reativa excedente durante o período de um ano é apresentado na Tabela 2.

Tabela 1. Tarifas adotadas para faturamento.

Especificação	Constante de medição	Tarifa
Demanda de potência reativa excedente	0,42	54,6531 R\$/kvar
Energia reativa excedente - horário de ponta	10,5	0,46215 R\$/kvarh
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	0,105	0,46214 R\$/kvarh

Tabela 2. Faturamento para o caso 1.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 5.725,18
Total	R\$ 5.725,18

A potência reativa do banco de capacitores a ser instalado é de 97kvar. Para tanto, foram cotados três orçamentos em empresas especializadas no fornecimento e instalação de dois bancos de capacitores, sendo um de 30kvar e outro de 70kvar com 380V de tensão, com vida útil de 100.000h, ou seja, 11 anos. O valor mais atrativo obtido foi de R\$42.990,00. Em seguida, a ferramenta proposta simulou o financiamento da solução de compensação, apresentado na Tabela 3. Foi considerado um período de 36 meses, ou seja, 33 parcelas e carência de 3 meses, totalizando um período de 3 anos, com juros de 1,2% a.m. O valor máximo permitido para financiamento corresponde a 90% do valor do bem, ou seja, R\$38.691,00. No primeiro mês os juros foram de R\$464,29 e no último, R\$14,07. O valor financiado sofre amortização mensal, totalizando ao final do período um valor de R\$47.976,84.

Tabela 3. Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 38.691,00
Parcelas	33
Amortização	R\$ 1.172,45
Carência	R\$ 464,29

Por fim, a ferramenta proposta calculou os indicadores para análise da viabilidade econômica. Para a TMA adotou-se a média da taxa SELIC no ano de 2019, ou seja, $TMA = 6,19\%$ a.a. Além disso, no cálculo do fluxo de caixa, na simulação da receita durante o período de 3 anos, levou-se em consideração a média de reajuste tarifário de $5,57\%$ a.a. (Veloso e Camargo, 2017) no faturamento da energia reativa excedente. Nas despesas, foram incluídos os gastos com juros e amortização do financiamento, além da manutenção do equipamento. Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do banco de capacitores, a indústria deixou de gastar a quantia de R\$18.149,99. O cálculo do VPL resultou em -R\$70.508,96. Neste caso, como descrito na subseção 2.3.2, recomenda-se rejeitar o investimento, ou seja, não é economicamente viável o investimento em uma solução de compensação.

3.2 Caso 2

O caso 2 é um exemplo de como a violação do fator de potência em determinados horários do dia irá interferir na sugestão do compensador através da ferramenta proposta. Neste caso, o fator de potência é violado durante o período das 16h às 20h, Figura 4(a). Assim como no caso 1, os dados de consumo de energia reativa foram extraídos através de simulação da indústria em operação. As tarifas e constantes de medição estão apresentadas na Tabela 1. Para este caso, o faturamento da energia reativa excedente durante o período de um ano é apresentado na Tabela 4.

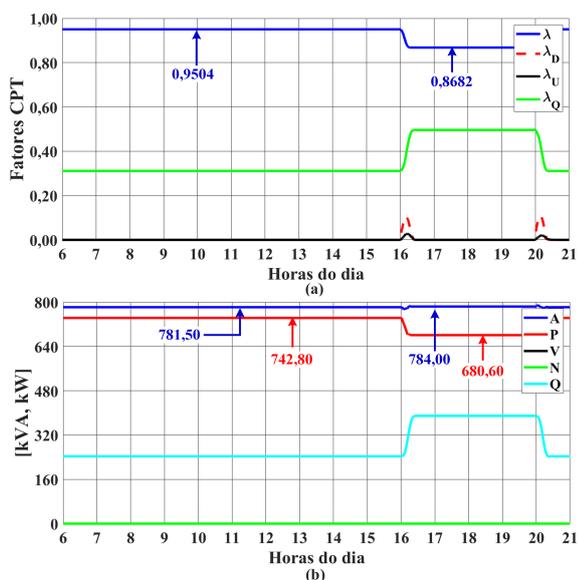


Figura 4. Evolução dos indicadores antes da compensação para o Caso 2: (a) fatores de conformidade da carga (b) parcelas de potência.

Para este caso, a potência reativa do banco de capacitores a ser instalado é a mesma do caso 1, portanto o preço dos bancos é o mesmo. O valor mais atrativo obtido foi

de R\$42.990,00. A simulação de financiamento é a mesma apresentada na Tabela 3. A Figura 5 ilustra a evolução dos indicadores depois da instalação do banco de capacitores.

Tabela 4. Faturamento para o caso 2.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 156.144,72
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 520,44
Total	R\$ 156.665,16

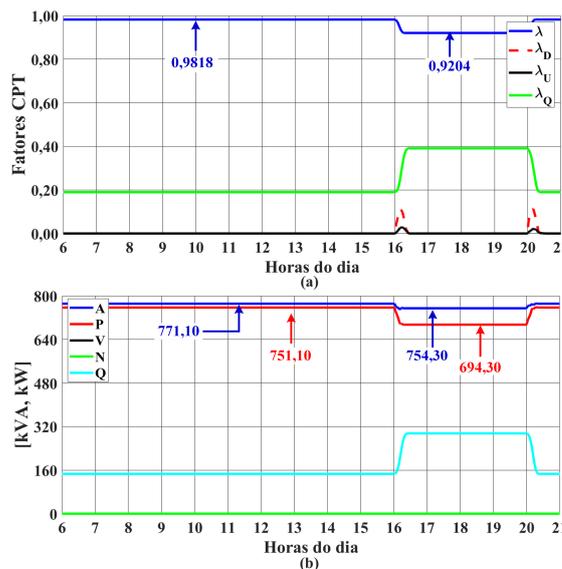


Figura 5. Evolução dos indicadores depois da compensação (a) fatores de conformidade da carga (b) parcelas de potência.

Novamente, calculou-se os indicadores para análise da viabilidade econômica. Adotou-se o mesmo valor para a TMA, ou seja, $6,19\%$ a.a. Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do banco de capacitores, a indústria deixou de gastar a quantia de R\$339.517,03. Os resultados da análise da viabilidade econômica estão apresentados na Tabela 5. Como pode-se observar a TIR foi superior a TMA e o VPL foi positivo, recomenda-se aceitar o investimento. O *payback* simples e descontado indicam que o investimento teria um retorno em aproximadamente quatro meses, ou seja, ainda no primeiro ano.

Tabela 5. Indicadores de viabilidade econômica para o caso 2.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 353.464,70
TIR	360,32%
Payback simples	3 meses e 13 dias
Payback descontado	3 meses e 16 dias

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma ferramenta para análise técnico-econômica da instalação ou não de equipamentos condicionadores de distúrbios de QEE em função dos dados obtidos através de medição em uma determinada instalação industrial. Verifica-se que a ferramenta neste trabalho é bastante promissora, pois pode ser aplicada a sinais de

tensão e corrente não senoidais ou desequilibrados, realiza a tomada de decisão a respeito da solução de compensação do distúrbio de QEE de forma automática, além de fornecer ao usuário ou especialista responsável uma análise financeira a respeito das soluções propostas, seja para identificação de distúrbios, atribuição de responsabilidades ou sugestão de compensadores. Além disso, pode ser facilmente adaptada em função de novas legislações ou de interesses da concessionária ou de seus clientes, por exemplo, através da manipulação dos limites estabelecidos.

Dos estudos de caso apresentados, a ferramenta foi capaz de apresentar as soluções de compensação, bem como realizar para o usuário a simulação do financiamento da instalação da solução, fornecendo os indicadores econômicos, visando indicar a viabilidade econômica do projeto, para o qual adotou-se a taxa SELIC como TMA. No primeiro caso, o fator de potência (λ) é violado entre 6h às 16h e 20h às 21h. Na análise dos indicadores econômicos, o VPL foi negativo, indicando a não aceitação do investimento. No segundo caso, o fator de potência foi violado durante o período das 16h às 20h. Os indicadores econômicos foram positivos, sendo o retorno financeiro obtido em aproximadamente quatro meses, recomendando-se a instalação do compensador. Caso o consumidor não aplique essa decisão, durante o período de vida útil do banco de capacitor (11 anos), deverá ter um prejuízo em torno de R\$ 1.244.895,74. É importante ressaltar que por se tratar do valor monetário no tempo e por depender de algumas variáveis que sofrem alterações no decorrer dos meses (como a taxa SELIC, valor do compensador e tempo de financiamento), os valores apresentados neste trabalho podem sofrer variações.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processos 431944/2018-0.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2010). Resolução normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. Relatório técnico, ANEEL.
- ANEEL (2012). Resolução normativa nº 479, de 3 de abril de 2012. Relatório técnico, ANEEL.
- ANEEL (2018). Procedimentos de distribuição de energia, módulo 8—qualidade da energia elétrica. *Agência Nacional de Energia Elétrica—ANEEL*.
- Das, S., Chatterjee, D., e Goswami, S.K. (2018). A reactive power compensation scheme for unbalanced four-wire system using virtual y-tcr model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 3210–3219. doi:10.1109/TIE.2017.2758720.
- Diniz, J., Uturbey, W., Cardoso, E.N., e Lopes, B.M. (2016). Análise de risco para o investimento em geração distribuída fotovoltaica. Em *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 1–8.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., e Beaty, H.W. (2012). *Electrical power systems quality. 3rd Edition, New York, NY: McGraw-Hill, | c1996*.
- d'Ávila Filho, R.C., Braga, M.F., e Silva, S.M. (2008). Aplicação de filtros ativos e passivos de potência: Estudo de caso. Em *Anais da Conferência Internacional de Aplicações Industriais*.
- Marafão, F.P., Brandão, D.I., Costabeber, A., e Paredes, H.K.M. (2015). Multi-task control strategy for grid-tied inverters based on conservative power theory. *IET Renewable Power Generation*, 9(2), 154–165. doi:10.1049/iet-rpg.2014.0065.
- Miller, T.J.E. (1982). *Reactive power control in electric systems*. Wiley.
- Moreira, A.C., Paredes, H.K.M., de Souza, W.A., Marafão, F.P., e da Silva, L.C.P. (2018). Intelligent expert system for power quality improvement under distorted and unbalanced conditions in three-phase ac microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6951–6960. doi:10.1109/TSG.2017.2771146.
- Moreira, A.C. (2017). *Definition of Compensation Solutions for Electric Power Distribution System by Means of Load Characterization*. Tese de doutorado, University of Campinas.
- Oliveira, I.C., Rosa, A.C.C.F., Bonatto, B.D., Arango, H., Pereira, J.L.R., e Ribeiro, P.F. (2018). Analysis of economic return of the installation of photovoltaic panels at the campus of the federal university of itajubá. Em *Anais do Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 1–6. doi:10.1109/SBSE.2018.8395702.
- Paredes, H.K.M., Marafão, F.P., Mattavelli, P., e Tenti, P. (2012). Application of conservative power theory to load and line characterization and revenue metering. Em *Proceedings of the IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems*, 1–6. doi:10.1109/AMPS.2012.6343993.
- Sandrini, J.C. (2008). *Sistemas de amortização de empréstimos e a capitalização de juros: análise dos impactos financeiros e patrimoniais*. Dissertação de mestrado, Federal University of Parana.
- Silva, R.M., Vaz, A., Almeida, T.A., e Yamakami, A. (2013). Avaliação de desempenho de métodos de classificação aplicados na identificação de spam hosts. *Revista Brasileira de Sistemas de Informação*, 5(1).
- Souza, W.A., Marafão, F.P., Liberado, E.V., Simões, M.G., e Da Silva, L.C.P. (2018). A nilm dataset for cognitive meters based on conservative power theory and pattern recognition techniques. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29(6), 742–755. doi:10.1007/s40313-018-0417-4.
- Tenti, P., Paredes, H.K.M., Marafao, F.P., e Mattavelli, P. (2011a). Accountability in smart microgrids based on conservative power theory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(9), 3058–3069. doi:10.1109/TIM.2011.2162351.
- Tenti, P., Paredes, H.K.M., e Mattavelli, P. (2011b). Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 664–673. doi:10.1109/TPEL.2010.2093153.
- Veloso, G. e Camargo, M.P. (2017). Viabilidade econômica da implantação de um banco de capacitores em unidade armazenadora de grãos. *Revista Ipecege*, 3(3), 28–39. doi:10.22167/r.ipecege.2017.3.28.
- Verde, L., De Pietro, G., e Sannino, G. (2018). Voice disorder identification by using machine learning techniques. *IEEE Access*, 6, 16246–16255. doi:10.1109/ACCESS.2018.2816338.