



ANÁLISE COMPARATIVA PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA SOB CONDIÇÕES NÃO SENOIDAIS DE OPERAÇÃO

Vinícius Henrique Farias Brito*¹, Adrian Ribeiro Ferreira¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – A medição da potência elétrica em condições não senoidais é tema de diversos estudos na comunidade científica, todavia, ainda não existe um consenso sobre a metodologia mais adequada para cálculo da potência, sobretudo, da parcela reativa. Somado a isso, deve-se ainda reconhecer que os medidores comerciais utilizam diferentes métodos de medição da potência elétrica. Esses fatores contribuem para uma divergência na medição da potência reativa e do fator de potência em circuitos com chaveamento eletrônico. Dessa forma, esse trabalho visa avaliar duas metodologias para o cálculo da potência elétrica, uma primeira utilizada em medidores de faturamento de energia na qual é denominada de método do triângulo de potências, e uma segunda baseada na publicação IEEE Std. 1459-2010. Para isso, são simulados três distintos circuitos elétricos com elevado conteúdo harmônico. Ao final do trabalho, com os resultados apresentados, poderá se concluir que, a depender da metodologia utilizada, a distorção de tensão e/ou corrente pode influenciar significativamente na potência reativa e no fator de potência calculados.

Palavras-Chave - Distorção harmônica, Fator de Potência, Medição de potência elétrica, Potência Reativa.

COMPARATIVE ANALYSIS FOR THE CALCULATION OF ELECTRIC POWER UNDER NON-SENOIDAL CONDITIONS OF OPERATION

Abstract - Electrical power measurements under non-sinusoidal conditions are the subject of several studies in the scientific community. However, there is still no consensus on the most appropriate methodology for calculating power, especially regarding the reactive portion. In addition, it should be recognized that commercial meters use different methods for measuring electrical power. These factors contribute to a mismatch in the measurement of reactive power and power factor in circuits with electronic switching. Thus, this work aims to evaluate two methodologies for calculating electrical power, the first, used in energy billing meters, is called the

power triangle method, and the second one based on the IEEE Standard 1459-2010. To do so, three different electrical circuits with high harmonic content are simulated. Therefore, from the results presented, it can be concluded that, depending on the methodology used, the voltage and/or current distortion may influence significantly the calculated reactive power and power factor.

Keywords – Harmonic distortion, Power factor, Electrical Power Measurement, Reactive Power.

I. INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos, o acelerado desenvolvimento tecnológico e os avanços da eletrônica de potência acarretaram em uma inserção acentuada de cargas com características não lineares em todos os níveis do sistema elétrico. A conexão acentuada de dispositivos que contribuem para a geração de harmônicos na rede resulta em um aumento expressivo nos níveis de distorção de tensão nos barramentos do sistema elétrico. Essa condição impacta diretamente o desempenho de diversos equipamentos, podendo causar: sobreaquecimentos, sobrecargas, aumento das perdas, entre outros problemas [1].

Dentre os efeitos que a conexão das cargas não lineares proporciona, pode-se mencionar ainda sua influência na medição e no faturamento da energia elétrica. De fato, o custo da energia elétrica para consumidores de média tensão é baseado não somente na energia/potência ativa, mas também na reativa [2] e no fator de potência. Todavia, para condições de sinais distorcidos de tensão e/ou corrente elétrica, não existe um consenso na literatura sobre a metodologia adequada para o cálculo da energia/potência reativa [3]. Nessa perspectiva, várias teorias de potência foram desenvolvidas com o intuito de apresentar um melhor significado físico a respeito de cada parcela de potência. Entre as definições existentes, as formulações abordadas na IEEE Std. 1459-2010 [4], as quais têm como referência os estudos desenvolvidos por Alexander Emanuel [5], têm uma aceitação significativa da comunidade científica [2]. Dessa forma, esta publicação apresenta uma abordagem física e matemática para as medições de potência elétrica, sobretudo da parcela reativa, em condições de sinais desequilibrados e na presença de harmônicos [6].

*viniciushfb2@gmail.com.br

Como não existe uma concordância a respeito da metodologia de cálculo da energia/potência para sinais não senoidais, então os equipamentos de medição comercialmente disponíveis também utilizam diferentes métodos para aferição das parcelas ativa e reativa da potência elétrica. Assim, em situações ideais de operação (tensões e correntes senoidais e equilibradas), percebe-se uma congruência nos resultados de medição para os diferentes dispositivos, em que pese sua classe de precisão [7]. Contudo, uma vez estabelecida uma condição de distorção harmônica, os resultados apresentados para medidores com distintos métodos de cálculo de potência, podem apresentar desvios nos valores mensurados [2].

Portanto, essa incongruência apresentada pelos medidores, pode ser traduzida em prejuízos financeiros, seja para a unidade consumidora, seja para a concessionária de energia. Dessa forma, percebe-se a importância de uma padronização entre os medidores de energia elétrica, de forma que os resultados de medição sejam isonômicos.

Nessa conjuntura, encontra-se o assunto tratado nesse trabalho, cujo objetivo é de realizar medições da potência elétrica e do fator de potência em ambiente computacional de vários circuitos que utilizam chaves eletrônicas, ou seja, com comportamento não linear. Assim, são avaliadas e comparadas duas metodologias para determinação da potência elétrica e do fator de potência dos circuitos em questão, a primeira é baseada no método de triângulo de potências, cuja aplicação é encontrada em diversos medidores comercialmente disponíveis, a segunda metodologia tem como referência as definições propostas pela IEEE Std. 1459-2010 [4]. Os resultados obtidos são essenciais para avaliar se as medições realizadas para fins de faturamento de energia elétrica estão de acordo com os conceitos físicos aceitos pela comunidade científica.

Para alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho apresenta na seção II os cálculos utilizados pelos medidores que têm como premissa o método de triângulo de potências, indicando as equações para obtenção das potências aparente, ativa e reativa, e do fator de potência. Posteriormente, na seção III, são expostos os conceitos e definições estabelecidos por Alexander E. Emanuel e presentes na IEEE Std. 1459-2010 [4] para a determinação da potência elétrica, e as parcelas referentes à potência aparente, ativa, reativa e de distorção. Tendo, pois, estabelecido as bases teóricas do artigo, a seção IV apresenta os circuitos implementados no software Simulink MATLAB, que são objeto de análise, sendo um retificador de meia onda, um circuito com tiristores e diferentes ângulos de disparo e por fim um circuito com MOSFETs e distintos ângulos de condução. Os resultados da potência elétrica e fator de potência para cada um dos circuitos são expostos na seção V, tanto para o método do triângulo de potências, quanto considerando as definições estabelecidas pela IEEE Std. 1459-2010 [4]. Por fim, são feitas as conclusões sobre os resultados obtidos, comentando, sobretudo, o impacto das componentes harmônicas na variação da potência reativa e do fator de potência.

II. MÉTODO DO TRIÂNGULO DE POTÊNCIAS

Entre as metodologias comumente utilizadas em medidores de faturamento, encontra-se o método do triângulo de

potências [2]. Assim, os equacionamentos propostos por esse método são apresentados no decorrer dessa seção.

Para o cálculo da parcela referente à potência aparente (S), utiliza-se os valores de tensão eficaz (V_{rms}) e corrente eficaz (I_{rms}). A estratégia realizada pelos medidores, para cálculo dos valores eficazes das grandezas elétricas, considera que as amostras dos sinais que representam os valores instantâneos estão discretizados, como indicado por (1) e (2).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n^2} \quad (1)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2} \quad (2)$$

O produto da tensão e corrente eficaz resulta, então, na potência aparente (S), que pode ser descrita de acordo com (3).

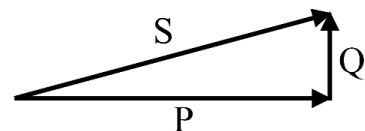
$$S^2 = V_1^2 I_1^2 + V_1^2 \cdot \left(\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2 \right) + \left(\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2 \right) \cdot I_1^2 + \left(\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2 \right) \cdot \left(\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2 \right) \text{ [VA]} \quad (3)$$

Para obtenção da potência ativa, utilizam-se os valores de tensão e corrente para cada ordem harmônica e o cosseno do ângulo de defasagem (θ), esse ângulo é correspondente ao defasamento angular entre os ângulos de tensão e corrente para cada ordem harmônica, como apresentado em (4).

$$P = V_1 I_1 \cos(\theta_1) + \sum_{h=2}^{h \max} V_h I_h \cos(\theta_h) \text{ [W]} \quad (4)$$

Uma vez encontradas as potências aparente e ativa, determina-se a potência reativa (Q) por meio do triângulo de potências, como mostra a Figura 1. Como pode-se notar, para esse método em específico, a potência aparente é dividida apenas em uma parcela ativa e outra reativa. Dessa forma, o valor e Q é determinado de acordo com (5).

Figura 1: Triângulo de potências.



$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ [var]} \quad (5)$$

Por fim, o fator de potência é estabelecido pela razão entre a potência ativa e a potência aparente, como mostrado em (6).

$$fp_{\Delta} = \frac{P}{S} \quad (6)$$

III. REVISÃO TEÓRICA CONFORME IEEE STD. 1459-2010

Os trabalhos realizados na IEEE Std. 1459-2010 [4] apresentaram conceitos relacionados com teoria de potência tendo como base os estudos feitos por Alexander E. Emanuel. Essa publicação resultou em contribuições significativas para o cálculo da potência elétrica, sobretudo em condições de distorção e desequilíbrio. Assim, tais estudos possibilitam um avanço no entendimento físico e matemáticos sobre o efeito dos harmônicos na medição das potências aparente, ativa, reativa e de distorção.

Portanto, é reconhecido que a tensão e corrente instantâneas, desconsiderando a componente contínua, podem ser descritas de acordo com (7) e (8), ou seja, decomposta em uma parcela referente à frequência fundamental e as demais componentes harmônicas. Com a multiplicação da tensão e corrente eficaz, encontra-se a potência aparente total, como indicado em (9).

$$V_{rms}^2 = V_1^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad (7)$$

$$I_{rms}^2 = I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (8)$$

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad (9)$$

A potência aparente total (S) é dividida entre a potência aparente fundamental (S₁) e não fundamental (S_N). As equações (10), (11) e (12) mostram o equacionamento de cada variável mencionada.

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (10)$$

$$S_1^2 = (V_1 I_1)^2 \quad (11)$$

$$S_N^2 = \left(V_1 \times \sum_{h \neq 1} I_h \right)^2 + \left(I_1 \times \sum_{h \neq 1} V_h \right)^2 + \left(\sum_{h \neq 1} V_h \times \sum_{h \neq 1} I_h \right)^2 \quad (12)$$

A potência aparente para a frequência fundamental (S₁) é constituída de duas parcelas, a potência ativa (P₁) e reativa (Q₁), como indicado em (13). Nesse particular, o cálculo das potências ativa e reativa consideram somente as componentes de tensão e corrente na frequência fundamental, além da defasagem entre essas duas grandezas (Ø₁). As formulações para cálculo de P₁ e Q₁ estão detalhadas em (14) e (15).

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 \text{ [VA]} \quad (13)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\phi_1) \text{ [W]} \quad (14)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\phi_1) \text{ [var]} \quad (15)$$

Como indicado em (16), a potência não fundamental (S_N) é separada em três partes: a potência de distorção de corrente (D_I), a potência de distorção de tensão (D_V) e a potência aparente harmônica (S_H), cujas as equações estão apresentadas em (17), (18) e (19), respectivamente.

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \text{ [VA]} \quad (16)$$

$$D_I = V_1 \times \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2} \text{ [var]} \quad (17)$$

$$D_V = I_1 \times \sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2} \text{ [var]} \quad (18)$$

$$S_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2} \times \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2} \text{ [VA]} \quad (19)$$

Por fim, a potência aparente harmônica é composta de uma componente denominada potência ativa harmônica (P_H), como mostrado em (20) e outra com a denominação de potência reativa harmônica (Q_H), conforme (21).

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\phi_h) \text{ [W]} \quad (20)$$

$$Q_H = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \sin(\phi_h) \text{ [var]} \quad (21)$$

IV. CIRCUITOS SIMULADOS

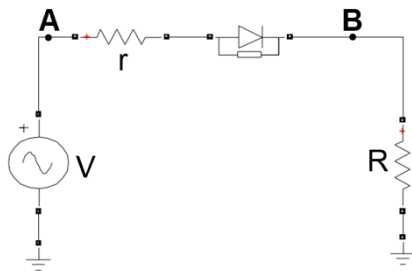
Para a avaliação e comparação entre as duas metodologias de cálculo da potência elétrica, mencionadas nas seções II e III, são considerados três circuitos simulados no software Simulink MATLAB. Para cada circuito, as medições são realizadas em dois pontos distintos (Ponto A e B).

Destaca-se, ainda, que a forma de onda da fonte de alimentação dos circuitos é puramente senoidal, portanto, as distorções harmônicas no sistema são advindas apenas das cargas conectadas. Além do mais, vale ressaltar que todos circuitos possuem a seguinte parametrização: tensão da fonte V = 100 V_{rms}, r = 0,2Ω e R = 5 Ω.

A. Retificador de meia onda

O primeiro circuito a ser avaliado está ilustrado na Figura 2, o qual compreende um retificador de meia onda. Assim, o diodo série presente faz com que o fluxo de corrente aconteça apenas no semiciclo positivo da tensão.

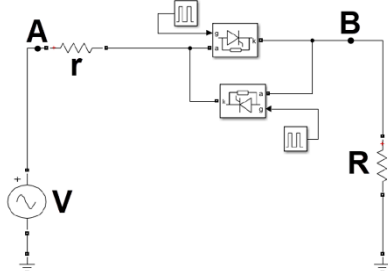
Figura 2: Circuito Retificador de Meia Onda implementado no Simulink.



B. Circuito com tiristor

O próximo circuito a ser analisado está indicado na Figura 3, que mostra um diagrama com dois tiristores em anti-paralelo. Para que aconteça a condução do tiristor, este deve estar diretamente polarizado e também deve receber um pulso. Para a avaliação dos resultados, o circuito em questão será simulado com três diferentes ângulos de disparo. Sendo de 45°, 90° e 135°.

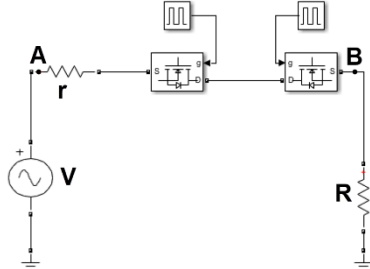
Figura 3: Circuito com tiristores implementado no Simulink.



C. Circuito com MOSFETs

O último circuito simulado é composto por MOSFETs, de acordo com a Figura 4. Assim, o MOSFET sempre conduz em um semiciclo, enquanto no outro semiciclo, ele conduz enquanto houver um sinal aplicado ao seu terminal de disparo. Novamente, são considerados três ângulos de condução: 45°, 90° e 135°.

Figura 4: Circuito com Mosfets implementado no Simulink.



Além dos circuitos apresentados, deve-se mencionar que para o cálculo das potências elétricas foi desenvolvido um código no MATLAB, dessa forma tem-se a obtenção dos sinais de tensão e corrente discretizados, e a aplicação das equações para determinação de cada parcela de potência das duas metodologias em estudo.

V. RESULTADOS

A seguir são apresentados uma série de dados obtidos com base nas metodologias de cálculo de potência elétrica estabelecidas nas seções II e III. Primeiramente, foram calculados os valores de potência ativa e reativa considerando o método do triângulo de potências para cada circuito em análise, sendo que os dois últimos têm o ângulo de disparo/condução alternado entre 45°, 90° e 135°. A Tabela 1 indica que para o Ponto B, a potência reativa é consideravelmente menor em comparação com a potência ativa para os casos estudados. Todavia, quando a medição é realizada no Ponto A, percebe-se que a potência reativa atinge valores significativamente elevados, sendo que em alguns casos, o valor de Q ultrapassa P. De fato, é possível concluir que a potência reativa encontrada para o método do triângulo de potências, para condições não lineares, é diretamente influenciada pelas distorções harmônicas.

Tabela 1: Valores das potências elétricas para o método do triângulo de potências

Circuito	Ponto de Med.	P [W]	Q [var]
Retificador	Ponto A	947,05	945,46
	Ponto B	908,06	0
Tiristor (45°)	Ponto A	1708,05	581,76
	Ponto B	1620,70	184,25
Tiristor (90°)	Ponto A	918,03	967,55
	Ponto B	860,55	189,93
Tiristor (135°)	Ponto A	157,12	539,74
	Ponto B	139,96	53
Mosfet (45°)	Ponto A	184,68	538,32
	Ponto B	164,12	0
Mosfet (90°)	Ponto A	963,57	911,14
	Ponto B	892,74	0
Mosfet (135°)	Ponto A	1713,25	495,03
	Ponto B	1603,95	0

Os resultados presentes nas próximas tabelas são baseados nas formulações da IEEE Std. 1459-2010 [4]. Assim, são determinados os valores das potências elétricas dos circuitos em estudo. É importante reforçar que todos os dados de potência ativa estão em Watts, e os dados de Potência Reativa estão em var.

Na Tabela 2 estão presentes os dados referentes ao retificador de meia onda. Percebe-se que, para o ponto A, a principal potência encontrada é P1, sendo as demais com valores bastante reduzidos. Já para o ponto B, o conteúdo harmônico interfere diretamente no valor da potência ativa, todavia, como esse ponto de medição se trata de uma carga resistiva, então a potência reativa Q1 e QH são significativamente menores.

Tabela 2: Valores Obtidos para o Retificador de Meia Onda.

	P1	PH	P Total
Ponto A	947,05	0	947,05
	Q1	QH	Q Total
	-0,46	0	-0,46
Ponto B	P1	PH	P Total
	Q1	QH	Q Total
	0	-81,03	-81,03

Na Tabela 3 são apresentados os resultados referentes às potências de distorção de corrente (D_i) e de tensão (D_v). Nota-

se que, para o ponto A, existe somente a presença de D_I , uma vez que para esse ponto de medição, a tensão é totalmente senoidal. Enquanto que, para o Ponto B, há os dois tipos de potências, e, ambas com os mesmos valores.

Tabela 3: D_I e D_V para o Retificador de Meia Onda

Ponto de Med.	D_I	D_V
Ponto A	954,38	0
Ponto B	455,45	455,45

Para a simulação do circuito com o tiristor, identifica-se uma determinada similaridade com os resultados para o circuito do retificador (Tabela 2). Como mostra a Tabela 4, as potências PH e QH no Ponto A são nulas, haja vista que, para esse ponto, a tensão possui apenas a parcela da frequência fundamental. Dessa forma, as equações (20) e (21) têm um valor numericamente igual a zero. Ademais, fica evidenciado que a potência reativa Q1 e QH no ponto B também possui um valor significativamente menor em comparação com P1 e PH.

Tabela 4: Valores Obtidos para o circuito com Tiristor

		Ponto	P_1	PH	P Total
Tiristor (45°)	A		1708,05	0	1708,05
			Q1	QH	Q Total
	B		312,75	0	312,75
			P1	PH	P Total
			1520,17	100,53	1620,7
			Q1	QH	Q Total
Tiristor (90°)	A		918,03	0	918,03
			Q1	QH	Q Total
	B		599,17	0	599,17
			P1	PH	P Total
			608,41	252,14	860,55
			Q1	QH	Q Total
Tiristor (135°)	A		157,12	0	157,12
			Q1	QH	Q Total
	B		282,84	0	282,84
			P1	PH	P Total
			53,58	86,38	139,96
			Q1	QH	Q Total
	-0,35	0,35	0		

Em relação aos dados das potências de distorção de corrente e tensão para o circuito com tiristores, os resultados estão apresentados na Tabela 5. Observa-se que, assim como no caso anterior (Tabela 3), para o ponto A existe somente a potência de distorção de corrente, enquanto que, para o ponto B, existe a distorção de tensão e corrente.

Tabela 5: D_I e D_V para o circuito com Tiristores

Circuito	Ponto de Med.	D_I	D_V
Tiristor (45°)	Ponto A	448,1	0
	Ponto B	392,87	392,87
Tiristor (90°)	Ponto A	707,45	0
	Ponto B	390,8	390,8
Tiristor (135°)	Ponto A	416,17	0
	Ponto B	67,85	67,85

Os resultados da simulação do circuito utilizando os MOSFETs são apresentados os dados da Tabela 6. Mais uma vez, ao aplicar as definições de potência elétrica de acordo com IEEE Std. 1459-2010 [4], percebe-se uma convergência dos dados com as Tabelas 2 e 4. Isso demonstra que os equacionamentos em questão representam de forma adequada o comportamento dos circuitos analisados.

Tabela 6: Valores obtidos para o circuito com MOSFETs

		Ponto	P_1	PH	P Total
Mosfet (45°)	A		184,68	0	184,68
			Q1	QH	Q Total
	B		-311,75	0	-311,75
			P1	PH	P Total
			66,93	97,19	164,12
			Q1	QH	Q Total
Mosfet (90°)	A		963,57	0	963,57
			Q1	QH	Q Total
	B		-594,3	0	-594,3
			P1	PH	P Total
			648,61	244,13	892,74
			Q1	QH	Q Total
Mosfet (135°)	A		1713,25	0	1713,25
			Q1	QH	Q Total
	B		-282,55	0	-282,55
			P1	PH	P Total
			1519,55	84,4	1603,95
			Q1	QH	Q Total
	3,81	0,34	4,15		

Os valores relacionados às potências de distorção para o circuito com MOSFETs corroboram com a conclusão acerca dos equacionamentos presentes na seção III. Portanto, com um comportamento semelhante aos dois circuitos anteriormente apresentados, percebe-se que D_V é nulo para o Ponto A, já para o Ponto B há um valor considerável de potência de distorção de tensão e corrente.

Tabela 7: D_I e D_V para o circuito com Mosfets

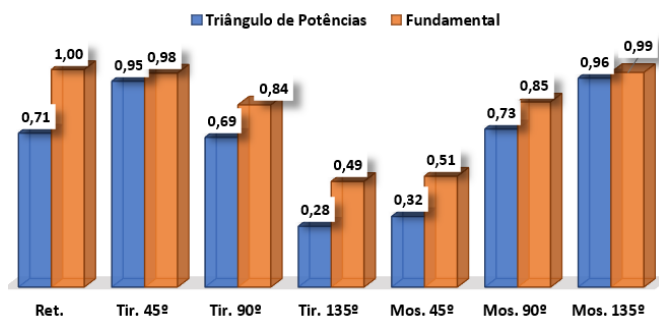
Circuito	Ponto de Med.	D_I	D_V
Mosfet (45°)	Ponto A	441,45	0
	Ponto B	80,6	80,6
Mosfet (90°)	Ponto A	696,14	0
	Ponto B	397,13	397,13
Mosfet (135°)	Ponto A	411,38	0
	Ponto B	359,95	359,95

A última análise realizada, diz respeito ao fator de potência (fp). Assim, para cada circuito, calculou-se o fp para o método do triângulo de potências, de acordo com (6). Além disso, também foi determinado o fp utilizando as parcelas de potência ativa e reativa fundamental, nesse caso só foi utilizada a frequência fundamental para mostrar a influência das ordens harmônicas no valor final do fp quando se compara o valor utilizando-se somente da frequência fundamental com o valor levando-se em consideração as ordens harmônicas, encontradas de acordo com a metodologia da IEEE Std. 1459-2010 [4], conforme (23).

$$fp_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (23)$$

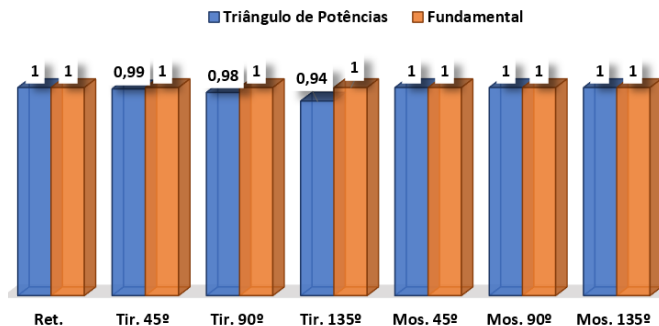
A Figura 5 mostra os resultados dos fatores de potência calculados de acordo com as duas metodologias abordadas. Portanto, percebe-se que, para todos os casos, o fp usando as componentes fundamentais é superior à metodologia do triângulo de potências. A maior discrepância ocorre para o circuito com tiristor com ângulo de disparo de 135°, com uma diferença percentual de 42% entre as duas metodologias.

Figura 5: Fatores de potência para as duas metodologias analisadas – Ponto A.



Para o Ponto B, a Figura 6 indica que os resultados de fator de potência são próximos para as duas metodologias.

Figura 6: Fator de potência para as duas metodologias analisadas – Ponto B.



VI. CONCLUSÕES

As definições relacionadas com a potência elétrica em condições não senoidais, sobretudo da parcela reativa, têm sido alvo de constantes estudos. Nesse contexto, o trabalho ora proposto teve como temática principal a avaliação de duas metodologias para cálculo da potência elétrica, uma primeira usada em medidores comerciais denominada de método do triângulo de potências, e uma segunda baseada nas definições publicadas na IEEE Std. 1459-2010. De fato, os resultados de simulação indicam que a presença de chaves eletrônicas influencia diretamente na potência reativa e no fator de potência para o método do triângulo de potências. Assim, fica evidenciado que, via de regra, a potência reativa calculada pelo método do triângulo de potências apresentou valores superiores em comparação com os valores da potência reativa total obtidos por meio das definições da IEEE Std. 1459-2010 [4]. Da mesma forma, percebe-se também que o fator de

potência determinado a partir das componentes fundamentais (fp1) também apresentou valores maiores quando confrontados com o fp calculado com o método do triângulo de potências.

Portanto, pode-se concluir que, para fins de medição em campo, a depender do método utilizado para cálculo da potência elétrica, podem existir diferenças significativas no fator de potência e na potência reativa devido a presença de cargas não lineares. Consequentemente, o faturamento de energia também pode ser influenciado por essa problemática.

Ademais, os dados obtidos através de simulação mostraram que as definições de potência indicadas pela IEEE Std. 1459-2010 apresentam uma coerência física adequada para os circuitos analisados.

AGRADECIMENTOS (OPCIONAL)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e suporte do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

REFERÊNCIAS

- [1] B. M. Ganesini, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias,” Universidade Federal de Uberlândia, 2020.
- [2] G. L. Xavier *et al.*, “An update on the performance of reactive energy meters under non-sinusoidal conditions,” *Electr. Eng.*, vol. 102, pp. 1881-1891, 2020.
- [3] R. P. B. da Silva, R. Quadros, F. P. Santilio, L. C. P. da Silva, B. C. Carvalho, and A. B. de Vasconcellos, “Effects of Electronic Loads on Electrical Measurements, Power Quality and Billing,” *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 28, no. 5, pp. 654–663, 2017.
- [4] IEEE. Std. 1459-2010 -, “Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.”
- [5] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [6] J. R. Macedo, G. L. Xavier, I. N. Gondin, L. T. S. Oliveira, and R. F. B. de Oliveira, “An update on the performance of active energy meters under non-sinusoidal conditions,” *Electr. Eng.*, vol. 102, no. 3, pp. 1785–1794, 2020.
- [7] A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, “The measurement of reactive energy in polluted distribution power systems: An analysis of the performance of commercial static meters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 3, pp. 1296–1301, 2008.