

Impacto do Furto Monofásico de Energia sobre um Sistema Elétrico Equilibrado

Arango, L.G., Deccache, E., Bonatto, B. D., Arango, H.

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá - CERIn – Centro de Excelência em Redes Inteligentes – Itajubá-MG, Brasil
lucasarango10@yahoo.com.br; elciodeccache@yahoo.com.br; bonatto@unifei.edu.br; hector.arango@uol.com.br;

Vasconcelos, G. F.

Matrix Engenharia em Energia – Rua Purpurina, 287 – Sumarezinho – São Paulo– SP 05435-030, Brasil
gil.vasc@matrixenergia.com.br;

Resumo — O objetivo do artigo é mostrar como o furto de energia elétrica provoca um desequilíbrio de tensão em um sistema equilibrado, através do aumento da carga em uma das fases da rede elétrica. Para representar o aumento de carga, uma análise microeconômica será realizada com o intuito de mostrar como o consumo cresce com o furto. Ainda, como consequência do desequilíbrio de tensão do subsistema analisado, aparece o problema de variação de tensão em regime nas fases do mesmo. Para representar o subsistema estudado, simulações no Matlab-Simulink serão efetuadas para verificar se o furto de energia elétrica na fase C, em diferentes pontos de carga, pode levar a problemas de qualidade que ultrapassam os limites estabelecidos por norma.

Palavras-chaves — Desequilíbrio de Tensão, Furto de Energia Elétrica, Tensão em regime permanente, Sistema Elétrico Equilibrado.

I. INTRODUÇÃO

Segundo [1]-[4], o furto de energia elétrica existe na grande parte dos países do mundo, incluindo países desenvolvidos e países em desenvolvimento. Trata-se de uma modalidade que se engloba dentro das perdas não técnicas ou comerciais e seus índices chegam a ser grandes em alguns países em desenvolvimento, afetando a eficiência operacional das companhias de energia elétrica.

O furto de energia elétrica impacta diretamente na gestão financeira de uma empresa elétrica tendo como consequência uma parcela de receita não faturada pela companhia de eletricidade. Porém, este ato ilícito pode afetar também a qualidade da energia elétrica, promovendo uma energia com menor qualidade para o consumidor e que pode ultrapassar os limites de qualidade estabelecidos por norma [5].

De acordo com [6], o furto de energia elétrica impacta diretamente nos níveis de qualidade de um sistema elétrico [7]-[10], através do aumento de energia consumida, com destaque para as tensões em regime permanente.

O presente artigo busca analisar como o furto de energia elétrica em uma das fases do mesmo, provoca um desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico equilibrado.

A Fig.1 ilustra a proposta do artigo, através de um modelo ou subsistema equilibrado, no qual existe um determinado nível de furto na fase C do mesmo.

Considerando que é mais provável que o furto de energia ocorra na fase C (mais próxima ao solo), a Fig.1 busca

mostrar o efeito do furto de energia em uma das fases de um sistema balanceado.

Assim como em [6], o furto de energia em uma das fases do sistema elétrico, provoca o aumento de energia consumida nesta mesma fase. Isto se deve à propensão dos consumidores a consumir mais energia quando não pagam pela mesma.

INFRAESTRUTURA DE DISTRIBUIÇÃO

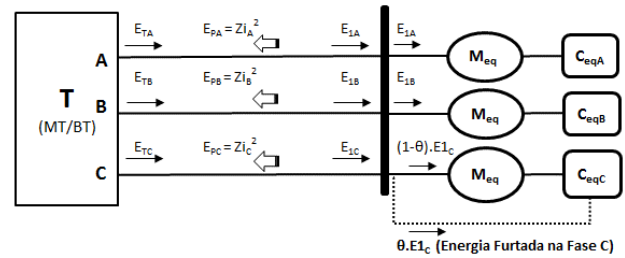


Fig. 1. Esquemático Ilustrativo do Furto de Energia na Fase C.

Como decorrência do desequilíbrio de Tensão entre as fases do sistema, aparece o problema de variação de tensão em regime, com casos de subtensão em umas fases e sobretensão em outras, se tornando mais crítico à medida que o furto numa das fases aumenta.

O artigo foca exclusivamente no furto de energia representando as perdas não técnicas e desta forma outras perdas comerciais não são consideradas no mesmo.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Modelagem econômica do Furto de Energia

A modelagem econômica desta seção está baseada em [6] e [11]-[13]. Assim, a energia consumida no caso da ausência de furto de energia, pode ser modelada pela expressão (1):

$$E_0 = \frac{a - T}{b} \quad (1)$$

A energia E_0 representa a energia faturada pela concessionária de energia.

onde:

E_0 – Energia Total na ausência de Furto.

a – Avidéz dos consumidores.

b – Saciedade dos consumidores.

T – Tarifa da Empresa Elétrica.

Na presença de furto de energia elétrica, a energia consumida passa a ser (2):

$$E_1 = (1 - \theta) \left[\frac{a - T}{b} \right] + \theta \frac{a}{b} = \frac{a - T(1 - \theta)}{b} \quad (2)$$

onde:

E_1 – Energia Total na presença de Furto de Energia.

θ – Percentual de Consumidores que furtam energia.

$(1 - \theta)$ – Percentual de Consumidores que pagam pela energia.

Portanto, o acréscimo de energia no sistema, quando existe a presença de furto é (3):

$$\Delta E\% = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \cdot 100 = \left(\frac{E_1}{E_0} - 1 \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Inserindo (1) e (2) em (3), resulta em (4):

$$\Delta E\% = \left(\frac{\frac{a - T(1 - \theta)}{b}}{\frac{a - T}{b}} - 1 \right) \cdot 100 = \frac{\theta T}{a - T} \cdot 100 \quad (4)$$

Assim, a energia consumida na presença de furto de energia pode ser escrita por (5):

$$E_1 = E_0(1 + \Delta E\%) \quad (5)$$

Dividindo (5) pelo período de fatura, a carga do sistema com furto passa a ser a carga do sistema sem furto mais uma carga adicional representada por (6):

$$P_1 = P_0(1 + \Delta E\%) \quad (6)$$

Sendo a carga adicional representada por (7):

$$\Delta P = P_0 \Delta E\% \quad (7)$$

B. Desequilíbrio de Tensão

Conforme [5], o desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

Uma maneira de se calcular o fator de desequilíbrio de tensão segundo [5] é através de (8):

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (8)$$

Sendo (9):

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (9)$$

Ainda, conforme mesma norma, os limites para o desequilíbrio de tensão podem ser resumidos conforme Tabela I:

TABELA I. LIMITES PARA OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO.		
Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0 %	2,0 %

Onde:

FD - Fator de Desequilíbrio de Tensão.

FD95% - Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

C. Tensão em Regime Permanente

Conforme [5] são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e de registro e os prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores.

Em referência à regulação das tensões de atendimento, seguem as tabelas II e III que classificam as tensões dentro dos limites estabelecidos para os níveis de tensão apresentados, baseado em [5]:

TABELA II. PONTOS DE CONEXÃO EM TENSÃO NOMINAL IGUAL OU INFERIOR A 1 kV (380/220).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)/$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

TABELA III. PONTOS DE CONEXÃO EM TENSÃO NOMINAL SUPERIOR A 1 kV E INFERIOR A 69 kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR \text{ ou } TL > 1,05TR$

III. SIMULAÇÕES

Para analisar o impacto do furto monofásico de energia em um subsistema elétrico equilibrado, serão realizadas simulações utilizando o Matlab-Simulink [14]. Nestas simulações será representado um sistema elétrico equilibrado sem furto de energia e posteriormente um sistema elétrico desequilibrado através do furto de energia na fase C do mesmo. A Fig.2 representa o subsistema elétrico simulado pelo [14]:

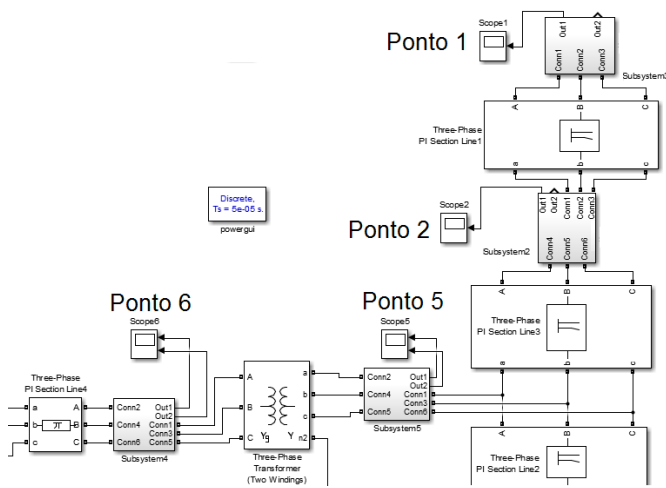


Fig. 2. Parte do Subistema Elétrico simulado no Matlab-Simulink.

A Fig.3 representa o diagrama trifilar mais geral do subsistema simulado. É verificável que o ponto 6 representa a leitura no primário do transformador (T), enquanto o ponto 5 representa a medição no secundário do mesmo. Os pontos 1 e 4 (simétricos), representam a medição das cargas na ponta do subsistema, enquanto os pontos 2 e 3 representam as medições das cargas no início do subsistema.

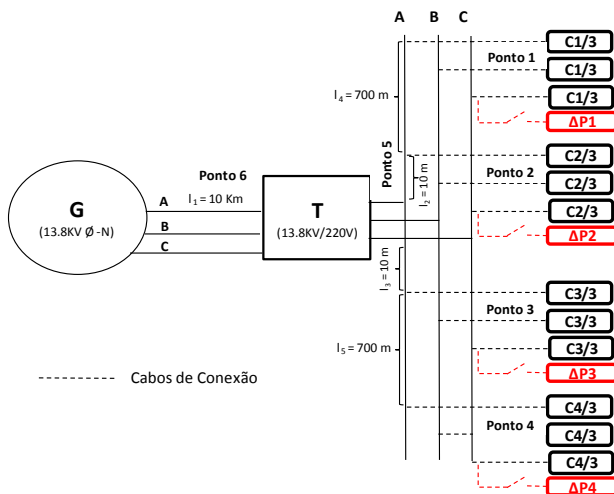


Fig. 3. Diagrama Geral do Subistema Simulado.

A Fig.3 representa um diagrama geral trifilar. Portanto, ao considerar um sistema equilibrado, o valor da carga por fase pode ser representado por (10):

$$C_{\phi} = \frac{C1 + C2 + C3 + C4}{n_{\phi}} \quad (10)$$

Sendo:

C_{ϕ} – Carga Equivalente por Fase.

n_{ϕ} – Número de Fases do Sistema Elétrico.

Pela Fig.3, quando existe o furto de energia na fase C em qualquer uma das cargas, a chave representada em vermelho

se fecha, adicionando uma carga adicional àquela fase representada por ΔP (emulando o efeito do Furto).

As características simuladas do gerador, transformador, cabos e cargas são representados pelas Tabelas IV-VII:

TABELA IV. PARÂMETROS DO GERADOR.

Abreviação	Scc (MVA)	Vn (kV)	f (Hz)
G	∞	13,8	60

TABELA V. PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR.

Abreviação	Sn (kVA)	Vp (kV)	Vs (kV)	R (%)	X (%)	Conexão
T	75	13,8	0,22	0,2	1	Y-Y

TABELA VI. PARÂMETRO DOS CABOS.

Cabos	Abreviação	Mate-rial	R (Ω /Km)	X (μ H/Km)	Tamanho (m)
Cabo 1	L1	Al	0,269	934	10000
Cabo 2	L2	Al	0,269	934	10
Cabo 3	L3	Al	0,269	934	10
Cabo 4	L4	Al	0,269	934	700
Cabo 5	L5	Al	0,269	934	700

Fonte: Baseada no Catálogo [15].

TABELA VII. PARÂMETROS DAS CARGAS.

Cargas	Abreviação	Sn (kVA)	Vn (kV)	fn (Hz)	fp
Carga 1	C1	15	0,22	60	1
Carga 2	C2	15	0,22	60	1
Carga 3	C3	15	0,22	60	1
Carga 4	C4	15	0,22	60	1

Para os cabos de conexão, serão considerados 5 metros de comprimento.

Fazendo o balanceamento de cargas por fase, então as cargas nas 3 fases, utilizando equação (10) ficam de acordo com a Tabela VIII:

TABELA VIII. CARGA EQUIVALENTE POR FASE.

Fase	Carga	Abreviação	Sn (kVA)	Vn (kV)	fn (Hz)	fp
A	Carga em A	CA	20	0,22	60	1
B	Carga em B	CB	20	0,22	60	1
C	Carga em C	CC	20	0,22	60	1

As leituras das tensões do sistema das Fig. 2 e 3 serão executadas nos pontos 1 (representando a ponta do sistema), 2 (representando consumidores próximo ao Transformador), 5 (representando o secundário do Trafo) e 6 (representando o primário do Trafo). Como o sistema apresenta um caráter simétrico, não serão feitas leituras nos pontos 4 e 3, que apresentariam resultados semelhantes aos pontos 1 e 2, respectivamente.

A. Situação 1 – Consumo normal sem furto de Energia (Sistema Equilibrado)

A Tabela IX mostra as tensões por fase nos pontos 1, 2, 5 e 6, na ausência de furto de energia (Chaves abertas – Fig.3). Como é possível de se verificar o sistema se encontra em equilíbrio de fases ou balanceado.

TABELA IX. TENSÃO EFICAZ NOS PONTOS DO SUBSISTEMA.

Pontos	Tensão por Fase (V)	Tensão Nominal (V)	Tensão Estacionária (V)
1	V _A	220	215,388
	V _B	220	215,388
	V _C	220	215,388
2	V _A	220	219,59
	V _B	220	219,59
	V _C	220	219,59
5	V _A	220	219,715
	V _B	220	219,715
	V _C	220	219,715
6	V _A	13800	13829
	V _B	13800	13829
	V _C	13800	13829

Ainda, é possível de se observar que as tensões em regime nas fases do sistema se encontram dentro dos limites adequados como requerido por [5], não apresentando problemas de qualidade de energia.

B. Situação 2 – Condição de Consumo assumindo o furto de energia na fase C

Primeiramente, será realizada uma análise microeconômica para mostrar de que maneira o furto de energia elétrica na fase C de um determinado subsistema contribui para o aumento do consumo de energia na mesma fase.

Posteriormente, será executada uma análise de como este incremento de consumo ou carga em uma das fases impacta na qualidade de um subsistema equilibrado.

1) Modelo Econômico do Furto

Considerando o subsistema das Fig. 2 e 3, a Tabela X mostra os valores de avidez e a tarifa média para este conjunto de consumidores desta região:

TABELA X. PARÂMETROS DE CONSUMO DO SUBSISTEMA.

a	Avidez [R\$/MWh]	800
T	Tarifa Média dos Consumidores Cativos [R\$/MWh]	600

A Tabela XI representa o impacto do furto de energia na fase C do subsistema, em termos de variação de energia e potência para diferentes cenários de furto:

TABELA XI. DIFERENTES CENÁRIOS DE FURTO DE ENERGIA NA FASE C.

Cenário	θ	$\Delta E\%$	P ₀ (kW)	P ₁ (kW)	ΔP (kW)
1	17%	50,0%	20	30	10
2	33%	100,0%	20	40	20
3	50%	150,0%	20	50	30

Analisando a Tabela XI, com três cenários diferentes de furto é possível de se chegar a um incremento de energia na fase C de 50%, 100% e 150%, para os cenários 1, 2 e 3 respectivamente. Em termos de potência absoluta o incremento de carga na fase C é de 10, 20 e 30 [kVA] respectivamente. Estas cargas adicionais provenientes do roubo de energia nos três cenários considerados serão adicionadas em cada ponto de carga do subsistema e o estudo da qualidade do sistema será realizado em termos de desequilíbrio de tensão e variação de tensão em regime permanente.

2) Impacto no Sistema Equilibrado

Para se verificar o impacto do furto de energia na fase C do subsistema elétrico, serão feitas leituras de tensão entre as fases e entre fase-neutro nos pontos 1, 2, 4 e 6, adicionando carga extra (ΔP) nos pontos 1, 2, 3 e 4 para simular situações de furto de energia elétrica. As Tabelas XII-XIX ilustram estas medições:

TABELA XII. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASES NO PONTO 1.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$ $\Delta P = 10$	$\theta = 33\%$ $\Delta P = 20$	$\theta = 50\%$ $\Delta P = 30$
Ponto 1	V _{AB}	372,975	372,975	372,972
	V _{BC}	371,084	369,418	368,061
	V _{CA}	361,76	354,484	349,408
	FD%	1,873287601	3,079582482	3,920119853
Ponto 2	V _{AB}	372,975	372,975	372,972
	V _{BC}	373,383	373,56	373,801
	V _{CA}	371,419	369,878	368,362
	FD%	0,32098227	0,613119038	0,908450297
Ponto 3	V _{AB}	372,975	372,975	372,972
	V _{BC}	373,1	373,614	373,881
	V _{CA}	371,598	370,237	368,895
	FD%	0,258154361	0,555773546	0,822996173
Ponto 4	V _{AB}	372,975	372,975	372,972
	V _{BC}	373,309	373,106	373,081
	V _{CA}	371,849	371,1	370,562
	FD%	0,236884633	0,347689425	0,441266747

Analisando a Tabela XII, na qual a leitura de tensão é feita no ponto 1, o furto de energia teve um maior impacto em relação ao desequilíbrio de tensão quando ocorreu no ponto 1 de carga. É possível de verificar que quando o furto supera o percentual de $\theta = 33\%$, o valor percentual do fator de desequilíbrio supera o limite máximo permitido de 3,0%, conforme Tabela I.

Para os outros pontos de furto de energia, correspondendo a um aumento de carga na fase C do sistema, o valor percentual do fator de desequilíbrio encontra-se dentro do limite permitido.

Ainda, através da Fig. 4 é possível de se verificar para o caso crítico de furto e leitura na ponta do sistema ou ponto 1, como o fator de desequilíbrio varia com o nível de furto ou incremento de carga na fase C do sistema.

Claramente, nota-se que a variação do fator de desequilíbrio não é linear com o incremento de carga, tomando-se a função um caráter côncavo.

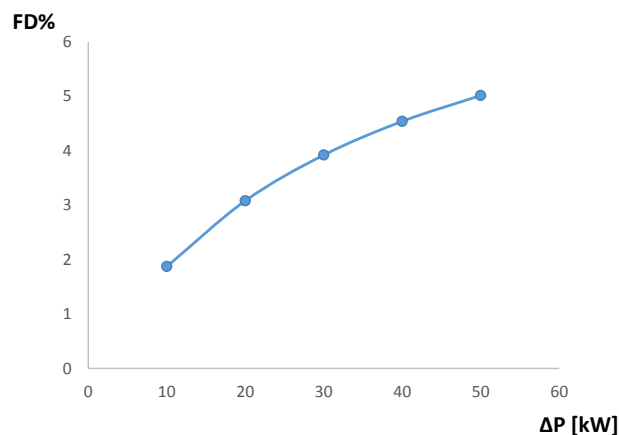


Fig.4. Fator de Desequilíbrio na Ponta do Sistema – Ponto 1.

O problema se torna ainda mais crítico quando é analisada a tensão fase-neutro. É possível de se observar conforme Tabela XIII, casos de sub e sobretensão nas fases devido ao deslocamento do neutro ocorrido pela presença de carga desequilibrada.

TABELA XIII. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASE-NEUTRO NO PONTO 1.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$	$\theta = 33\%$	$\theta = 50\%$
		$\Delta P = 10$	$\Delta P = 20$	$\Delta P = 30$
Ponto 1	V _A	237,584	252,169	262,354
	V _B	237,983	256,069	269,795
	V _C	168,029	137,857	117,006
Ponto 2	V _A	215,62	215,884	216,126
	V _B	215,899	216,46	217,022
	V _C	213,776	212,239	210,717
Ponto 3	V _A	215,217	215,096	214,975
	V _B	215,577	215,816	216,044
	V _C	214,616	213,896	213,174
Ponto 4	V _A	215,1	214,945	214,836
	V _B	215,558	215,691	215,78
	V _C	214,776	214,367	214,063

Conforme Tabela XIII, onde a medição ocorreu no ponto 1, observa-se uma criticidade quando o roubo de energia ou incremento de carga ocorre no ponto 1. É possível de se observar que as fases A, B e C encontram-se fora dos limites da norma [5], piorando o cenário quando o percentual de furto de energia aumenta. Quando o furto ocorre nos pontos 2, 3 e 4, o problema de tensão em regime permanente não ultrapassa os limites permitidos por norma [5].

A Tabela XIV mostra a leitura de tensão entre fases no ponto 2, considerando roubo de energia ou aumento de carga nos pontos 1, 2, 3 e 4 respectivamente. É possível de se constatar que não existem grandes problemas com relação ao desequilíbrio de tensão para este ponto de medição.

TABELA XIV. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASES NO PONTO 2.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$	$\theta = 33\%$	$\theta = 50\%$
		$\Delta P = 10$	$\Delta P = 20$	$\Delta P = 30$
Ponto 1	V _{AB}	380,435	380,344	380,345
	V _{BC}	380,437	380,417	380,36
	V _{CA}	379,057	378,2	377,597
	FD%	0,241799447	0,382691086	0,483567251
Ponto 2	V _{AB}	380,435	380,344	380,345
	V _{BC}	380,663	380,944	381,186
	V _{CA}	378,754	377,19	375,643
	FD%	0,316617021	0,612766009	0,908128924
Ponto 3	V _{AB}	380,344	380,344	380,345
	V _{BC}	380,686	380,996	381,269
	V _{CA}	378,942	377,552	376,181
	FD%	0,280655041	0,555799408	0,823773383
Ponto 4	V _{AB}	380,342	380,344	380,345
	V _{BC}	380,473	380,483	380,454
	V _{CA}	379,2	378,434	377,884
	FD%	0,212663995	0,34785204	0,441655875

Com relação ao problema de variação de tensão em regime permanente, ilustrado através da Tabela XV, o furto de energia não causa grandes problemas no ponto de carga 2 (próximo ao Transformador) e mantém-se dentro dos limites de tensão adequada conforme norma [5].

TABELA XV. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASE-NEUTRO NO PONTO 2.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$	$\theta = 33\%$	$\theta = 50\%$
		$\Delta P = 10$	$\Delta P = 20$	$\Delta P = 30$
Ponto 1	V _A	219,752	219,816	219,845
	V _B	220,069	220,395	220,63
	V _C	218,271	217,374	216,732
Ponto 2	V _A	220,472	221,315	222,118
	V _B	220,166	220,757	221,366
	V _C	217,418	215,278	213,174
Ponto 3	V _A	219,749	219,894	220,034
	V _B	219,718	219,848	219,98
	V _C	218,7	217,812	216,925
Ponto 4	V _A	219,482	219,406	219,351
	V _B	219,777	219,896	219,973
	V _C	218,929	218,449	218,096

A Tabela XIV mostra a leitura de tensão entre fases no ponto 5, considerando roubo de energia ou aumento de carga nos pontos 1, 2, 3 e 4 respectivamente. É possível de se constatar que não existem grandes problemas com relação ao desequilíbrio de tensão para este ponto de medição.

TABELA XVI. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASES NO PONTO 5.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$	$\theta = 33\%$	$\theta = 50\%$
		$\Delta P = 10$	$\Delta P = 20$	$\Delta P = 30$
Ponto 1	V _{AB}	380,555	380,555	380,555
	V _{BC}	380,686	380,692	380,663
	V _{CA}	379,412	378,652	378,109
	FD%	0,212719491	0,346240385	0,438687678
Ponto 2	V _{AB}	380,555	380,555	380,555
	V _{BC}	380,9	381,207	381,484
	V _{CA}	379,151	377,765	376,391
	FD%	0,236378417	0,555145591	0,823877501
Ponto 3	V _{AB}	380,555	380,555	380,555
	V _{BC}	380,9	381,212	381,484
	V _{CA}	379,151	377,763	376,392
	FD%	0,281186301	0,55605628	0,82370439
Ponto 4	V _{AB}	380,555	380,555	380,555
	V _{BC}	380,686	380,696	380,663
	V _{CA}	379,412	378,645	378,095
	FD%	0,212719491	0,347851938	0,740209653

Com relação ao problema de variação de tensão em regime permanente, ilustrado através da Tabela XVII, o furto de energia não causa grandes problemas no ponto 5 (Secundário do Transformador) e mantém-se dentro dos limites de tensão adequada conforme norma [5].

TABELA XVII. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASE-NEUTRO NO PONTO 5.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$	$\theta = 33\%$	$\theta = 50\%$
		$\Delta P = 10$	$\Delta P = 20$	$\Delta P = 30$
Ponto 1	V _A	219,612	219,539	219,483
	V _B	219,9	220,016	220,093
	V _C	219,047	218,567	218,214
Ponto 2	V _A	219,882	220,038	220,188
	V _B	219,887	219,961	220,087
	V _C	218,816	217,924	217,031
Ponto 3	V _A	219,882	220,038	220,188
	V _B	219,837	219,961	220,087
	V _C	218,816	217,924	217,031
Ponto 4	V _A	219,612	219,537	219,483
	V _B	219,9	220,016	220,093
	V _C	219,047	218,567	218,209

A Tabela XVIII mostra a leitura de tensão nas fases no ponto 6, considerando roubo de energia ou aumento de carga nos pontos 1, 2, 3 e 4 respectivamente. É possível de se

constatar que não existem grandes problemas com relação ao desequilíbrio de tensão para este ponto de medição.

TABELA XVIII. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASES NO PONTO 6.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$	$\theta = 33\%$	$\theta = 50\%$
		$\Delta P = 10$	$\Delta P = 20$	$\Delta P = 30$
Ponto 1	V_{AB}	23953	23953	23953
	V_{BC}	23944	23931	23934
	V_{CA}	23944	23938	23934
	FD%	0,025056901	0,054215867	0,052916322
Ponto 2	V_{AB}	23953	23953	23953
	V_{BC}	23942	23931	23920
	V_{CA}	23940	23927	23915
	FD%	0,033758715	0,06754519	0,099658582
Ponto 3	V_{AB}	23953	23953	23953
	V_{BC}	23942	23931	23920
	V_{CA}	23940	23927	23915
	FD%	0,033758715	0,06754519	0,099658582
Ponto 4	V_{AB}	23953	23953	23953
	V_{BC}	23944	23938	23934
	V_{CA}	23944	23938	23934
	FD%	0,025056901	0,041770225	0,052916322

Com relação ao problema de variação de tensão em regime permanente, ilustrado através da Tabela XIX, o furto de energia não causa grandes problemas no ponto 6 (Primário do Transformador) e mantém-se dentro dos limites de tensão adequada conforme norma [5].

TABELA XIX. LEITURA DE TENSÃO ENTRE FASE-NEUTRO NO PONTO 6.

Aplicação da Carga	Grandeza	$\theta = 17\%$	$\theta = 33\%$	$\theta = 50\%$
		$\Delta P = 10$	$\Delta P = 20$	$\Delta P = 30$
Ponto 1	V_A	13833	13834	13835
	V_B	13834	13837	13839
	V_C	13811	13800	13792
Ponto 2	V_A	13840	13851	13860
	V_B	13837	13844	13852
	V_C	13797	13765	13734
Ponto 3	V_A	13840	13851	13860
	V_B	13837	13844	13852
	V_C	13797	13765	13734
Ponto 4	V_A	13833	13834	13835
	V_B	13834	13837	13839
	V_C	13811	13800	13792

IV. CONCLUSÃO

O modelo econômico do furto de energia representa satisfatoriamente um conjunto de consumidores de uma região ou subsistema à medida que o aumento do consumo se relaciona diretamente com os níveis de furto de energia elétrica.

Para os três cenários simulados de furto de energia é possível de se verificar que à medida que o nível de furto na fase C aumenta, maiores são os problemas na qualidade do sistema, relacionados com desequilíbrio de tensão e tensão em regime permanente.

O caso mais crítico de desequilíbrio de tensão e tensão em regime ocorreu quando o furto de energia ou incremento de carga aconteceu na ponta do sistema (Ponto 1). Os consumidores ligados neste ponto sofreram problemas de desequilíbrio de tensão quando o furto supera 33%, que ultrapassam os limites estabelecidos por norma [5]. Com relação à tensão em regime, o nível de tensão neste ponto se caracteriza como crítico através da Tabela II. Para os demais

consumidores do subsistema os níveis de qualidade não ultrapassa os limites estabelecidos pela mesma norma.

Quando o furto de energia na fase C ocorre próximo ao transformador (Ponto 2), o impacto no desequilíbrio de tensão e tensão em regime ocorre de uma maneira mais branda, não excedendo para os consumidores de todo o subsistema, os limites de qualidade estabelecidos por [5]. Este fenômeno pode ser explicado em razão do maior comprimento da impedância da linha nas pontas do sistema do que nos pontos de carga próximo ao transformador, conforme [6].

Deste comportamento da rede, de ser mais sensível aos desequilíbrios nas pontas do sistema, decorre que especial cuidado deve ser dado ao planejamento e expansões da rede.

O fator de desequilíbrio de tensão se comportou de forma não linear com o nível de furto ou incremento de carga, apresentando um comportamento côncavo. Ou seja, incrementos de carga desequilibrada a partir de uma condição equilibrada tem mais efeito que o mesmo incremento feito a partir de uma condição já desequilibrada.

V. REFERÊNCIAS

- [1] C. A. S. Penin, "Combate, Prevenção e Otimização das Perdas Comerciais de Energia Elétrica," Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil, 2008.
- [2] T. B. Smith, *Electricity Theft: A Comparative Analysis*, Energy Policy, Elsevier, 2003.
- [3] S. Amin, G. A. Schwartz, A. A. Cardenas, S. S. Sastry, "Game-theoretic models of electricity theft detection in smart utility networks: Providing new capabilities with advanced metering infrastructure," *IEEE Trans. Control Systems*, pages 66-81, 2015.
- [4] ANEEL, Nota Técnica n° 106/2015 - SGT/SRM/ANEEL, "Metodologia para o Tratamento Regulatório das Perdas não Técnicas de Energia," Brasília-DF, Brasil, Abril, 2015.
- [5] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica," Jan., 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.
- [6] L. G. Arango, E. Deccache, B. Bonatto, H. Arango, P. F. Ribeiro, P. M. Silveira, "Impact of Electricity Theft on Power Quality," in: *IEEE PES ICHQP 2016 - 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil (2016).
- [7] IEEE, "Standard 1159 - IEEE Recommended Practices for Monitoring Electric Power Quality," March, 2009.
- [8] M. H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions," New York, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [9] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality," 2nd. Ed., McGraw-Hill, 2003.
- [10] A. B. I. Baggini, "Handbook of Power Quality," John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- [11] G. A. Jehle, J. P. Reny, "Advanced Microeconomic Theory," 2nd ed., Addison Wesley - Longman, 2000.
- [12] J. D. Martin, J. W. Petty, "Value Based Management," Harvard Business School Press, Boston, 2000.
- [13] H. Arango, J. P. G. Abreu, B. D. Bonatto, B. D., C. M. V. Tahan, N. Kagan, M. R. Gouvea, "Modeling the Influence of Power Quality on the Creation of Market Value". in *Proc.: 13th International Conference on the Quality of Power (ICHQP 2008)*, Wollongong, New South Wales, Australia, Sept. 28 -Oct. 1st, 2008.
- [14] MATLAB version 7.10.0. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.
- [15] General Cable, "Catálogo de Cabos de baixa Tensão," São Paulo-SP, Brasil, Maio, 2016. Disponível em: www.generalcablebrasil.com.