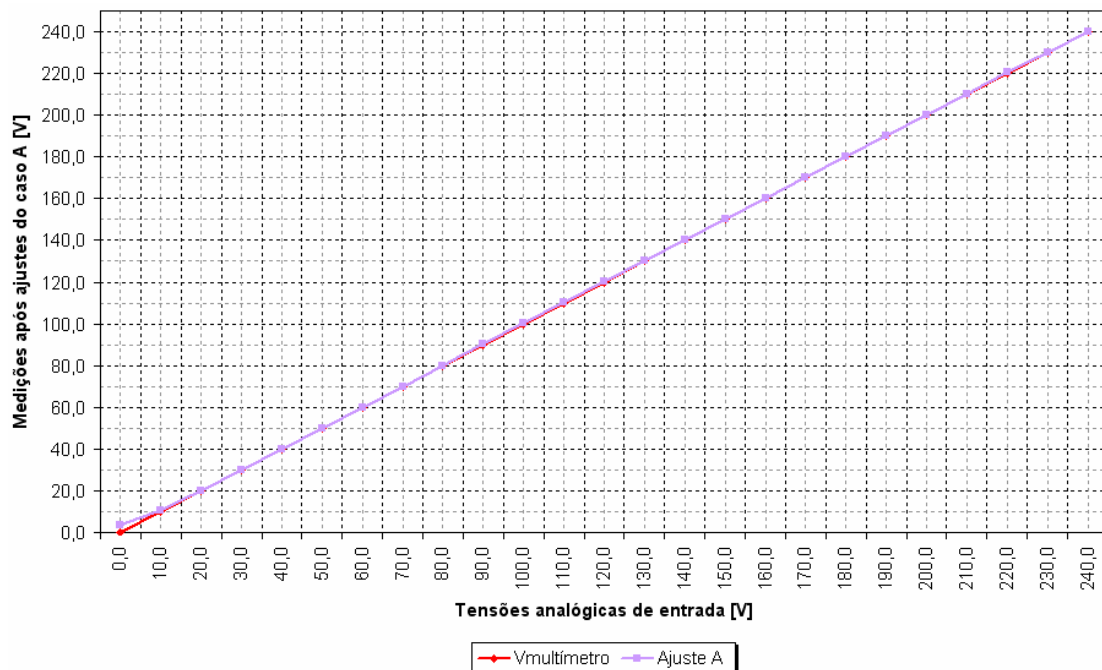


Tabela 3.2 - Leituras do PIC após ajustes do caso A.

v_i [V]	V_{PIC} [V]	$V_{P(A)}$ [V]	Erro A
0,000	0,000	3,636	3,636
10,000	15,000	10,461	0,461
20,000	36,000	20,016	0,016
30,000	58,000	30,026	0,026
40,000	80,000	40,036	0,036
50,000	102,000	50,046	0,046
60,000	124,000	60,056	0,056
70,000	146,000	70,066	0,066
80,000	168,000	80,076	0,076
90,000	190,000	90,086	0,086
100,000	212,000	100,096	0,096
110,000	234,000	110,106	0,106
120,000	256,000	120,116	0,116
130,000	278,000	130,126	0,126
140,000	300,000	140,136	0,136
150,000	322,000	150,146	0,146
160,000	344,000	160,156	0,156
170,000	366,000	170,166	0,166
180,000	388,000	180,176	0,176
190,000	410,000	190,186	0,186
200,000	432,000	200,196	0,196
210,000	454,000	210,206	0,206
220,000	477,000	220,671	0,671
230,000	498,000	230,226	0,226
240,000	520,000	240,236	0,236
Variação média:	21,042	9,574	*****
Erro mínimo:	*****	*****	0,016
Erro máximo:	*****	*****	0,671

**Figura 3.14** - Aproximação entre leituras após ajustes do caso A.

No ajuste B foram tomadas as leituras feitas em 10 V_{RMS}, gerando o seguinte sistema:

$$\begin{cases} 10 = K_1 \cdot 15 + K_2 \\ 240 = K_1 \cdot 520 + K_2 \end{cases}$$

Empregando as equações (3.6) e (3.7), têm-se os valores das constantes:

$$K_1 = 0,455$$

$$K_2 = 3,168$$

De posse das constantes, os ajustes das leituras do PIC foram obtidos e estão listados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Leituras do PIC após ajustes do caso B.

v_i [V]	V_{PIC} [V]	V_{P(B)} [V]	Erro B
0,000	0,000	3,168	3,168
10,000	15,000	9,993	0,007
20,000	36,000	19,548	0,452
30,000	58,000	29,558	0,442
40,000	80,000	39,568	0,432
50,000	102,000	49,578	0,422
60,000	124,000	59,588	0,412
70,000	146,000	69,598	0,402
80,000	168,000	79,608	0,392
90,000	190,000	89,618	0,382
100,000	212,000	99,628	0,372
110,000	234,000	109,638	0,362
120,000	256,000	119,648	0,352
130,000	278,000	129,658	0,342
140,000	300,000	139,668	0,332
150,000	322,000	149,678	0,322
160,000	344,000	159,688	0,312
170,000	366,000	169,698	0,302
180,000	388,000	179,708	0,292
190,000	410,000	189,718	0,282
200,000	432,000	199,728	0,272
210,000	454,000	209,738	0,262
220,000	477,000	220,203	0,203
230,000	498,000	229,758	0,242
240,000	520,000	239,768	0,232
Variação média:	21,042	9,574	*****
Erro mínimo:	*****	*****	0,007
Erro máximo:	*****	*****	0,452

A variação média obtida foi idêntica à anterior. Em contrapartida, os erros máximo e mínimo dos ajustes diminuíram. Mesmo assim, o resultado final, mostrado no gráfico da figura 3.15, revela uma oscilação um pouco maior dos resultados em relação ao caso A.

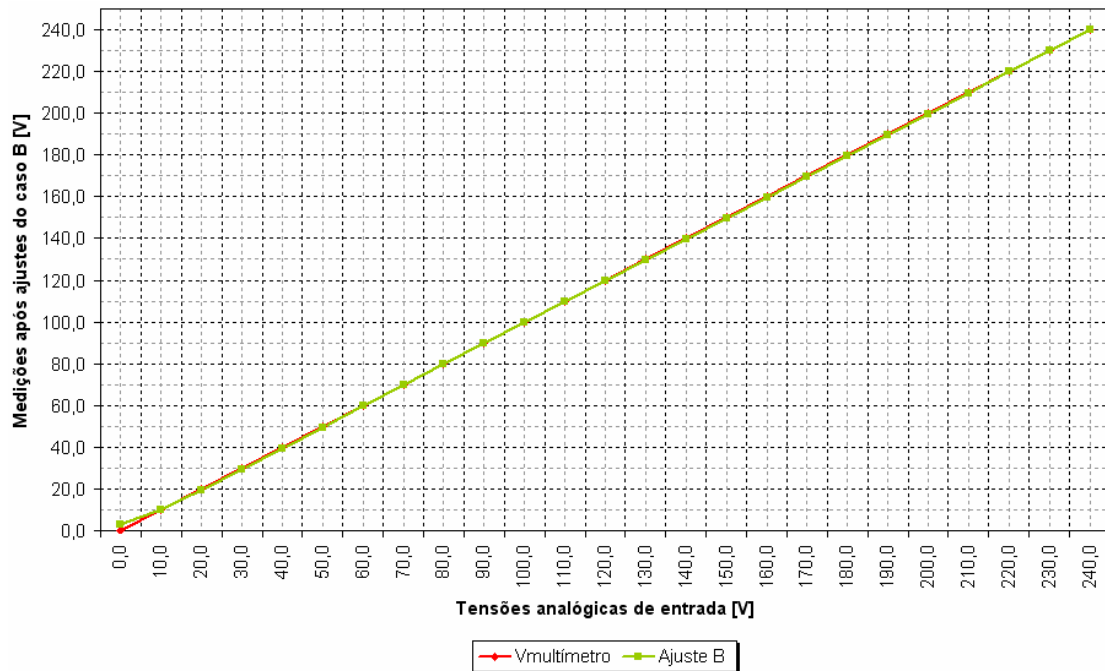


Figura 3.15 - Aproximação entre leituras após ajustes do caso B.

No ajuste C foram tomadas as leituras feitas em 60 V_{RMS}, gerando o seguinte sistema:

$$\begin{cases} 60 = K_1 \cdot 123 + K_2 \\ 240 = K_1 \cdot 520 + K_2 \end{cases}$$

Empregando as equações (3.6) e (3.7), têm-se os novos valores das constantes:

$$K_1 = 0,453$$

$$K_2 = 4,232$$

Calculadas as constantes, os novos ajustes das leituras do PIC foram obtidos e estão listados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Leituras do PIC após ajustes do caso C.

v_i [V]	V_{PIC} [V]	$V_{P(C)}$ [V]	Erro C
0,000	0,000	4,232	4,232
10,000	15,000	11,027	1,027
20,000	36,000	20,540	0,540
30,000	58,000	30,506	0,506
40,000	80,000	40,472	0,472
50,000	102,000	50,438	0,438
60,000	124,000	60,404	0,404
70,000	146,000	70,370	0,370
80,000	168,000	80,336	0,336
90,000	190,000	90,302	0,302
100,000	212,000	100,268	0,268
110,000	234,000	110,234	0,234
120,000	256,000	120,200	0,200
130,000	278,000	130,166	0,166
140,000	300,000	140,132	0,132
150,000	322,000	150,098	0,098
160,000	344,000	160,064	0,064
170,000	366,000	170,030	0,030
180,000	388,000	179,996	0,004
190,000	410,000	189,962	0,038
200,000	432,000	199,928	0,072
210,000	454,000	209,894	0,106
220,000	477,000	220,313	0,313
230,000	498,000	229,826	0,174
240,000	520,000	239,792	0,208
Variação média:	21,042	9,532	*****
Erro mínimo:	*****	*****	0,004
Erro máximo:	*****	*****	1,027

A variação média obtida para este caso (9,532) se afastou um pouco mais do parâmetro ideal (10,000) e o erro máximo aumentou. Assim, apesar de apresentar até o momento o menor erro mínimo, o caso C mostrou ser um pouco menos eficiente que os anteriores, sobretudo no referente aos menores valores de tensão analógica de entrada, como mostra a figura 3.16.

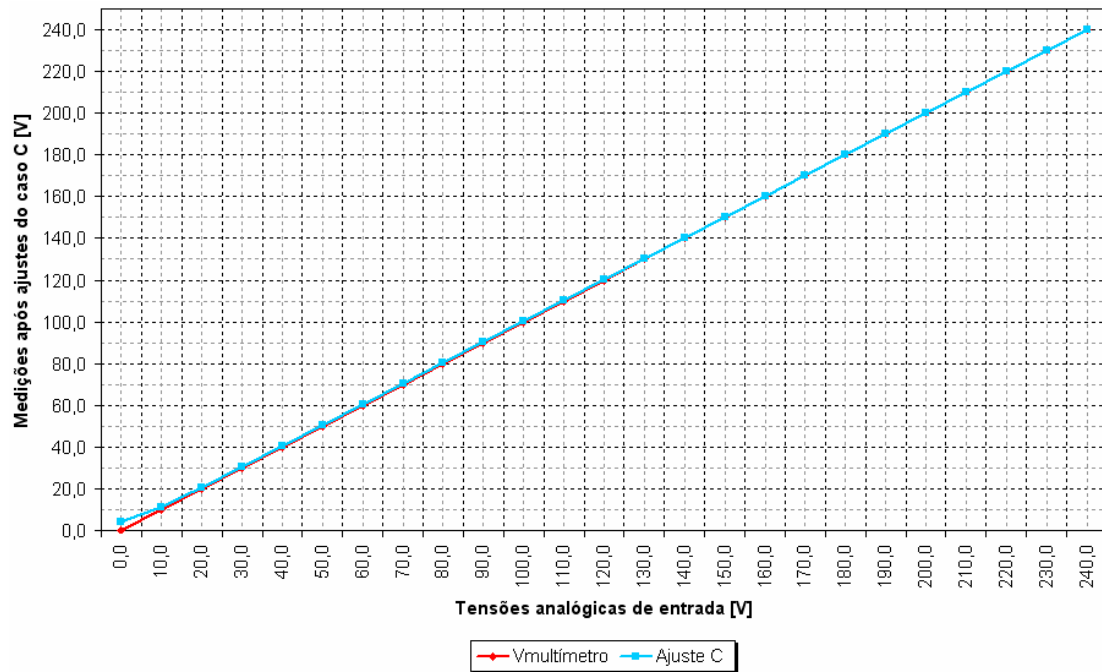


Figura 3.16 - Aproximação entre leituras após ajustes do caso C.

No ajuste D foram consideradas as leituras feitas em 120 V_{RMS}, gerando o sistema:

$$\begin{cases} 120 = K_1 \cdot 256 + K_2 \\ 240 = K_1 \cdot 520 + K_2 \end{cases}$$

Mais uma vez através das equações (3.6) e (3.7) são determinadas as constantes:

$$K_1 = 0,455$$

$$K_2 = 3,636$$

Naturalmente, como as constantes obtidas aqui foram idênticas às do estudo de caso A, os valores RMS ajustados, os erros e a variação média serão também equivalentes. Por conseguinte, o comportamento gráfico do caso D e A são absolutamente iguais.

Como visto, variações dos valores tomados para primeira equação do sistema linear geram pequenas oscilações entre os ajustes de cada estudo de caso. Desta feita, um último ajuste foi elencado. Neste novo caso, as equações (3.6) e (3.7) não foram mais consideradas; as constantes K_1 e K_2 foram obtidas pela média aritmética dos valores equivalentes dos casos anteriores. Portanto, tem-se:

$$K_1 = \frac{0,455 + 0,455 + 0,453 + 0,455}{4} \Rightarrow \boxed{K_1 = 0,455}$$

$$K_2 = \frac{3,636 + 3,168 + 4,232 + 3,636}{4} \Rightarrow \boxed{K_2 = 3,668}$$

A tabela 3.5 apresenta os ajustes médios sobre as medições das tensões analógicas de entrada.

Tabela 3.5 - Leituras do PIC após ajuste médio.

v_i [V]	V_{PIC} [V]	$V_{P(médio)}$ [V]	Erro médio
0,000	0,000	3,668	3,668
10,000	15,000	10,486	0,486
20,000	36,000	20,030	0,030
30,000	58,000	30,029	0,029
40,000	80,000	40,028	0,028
50,000	102,000	50,027	0,027
60,000	124,000	60,026	0,026
70,000	146,000	70,025	0,025
80,000	168,000	80,024	0,024
90,000	190,000	90,023	0,023
100,000	212,000	100,022	0,022
110,000	234,000	110,021	0,021
120,000	256,000	120,020	0,020
130,000	278,000	130,019	0,019
140,000	300,000	140,018	0,018
150,000	322,000	150,017	0,017
160,000	344,000	160,016	0,016
170,000	366,000	170,015	0,015
180,000	388,000	180,014	0,014
190,000	410,000	190,013	0,013
200,000	432,000	200,012	0,012
210,000	454,000	210,011	0,011
220,000	477,000	220,465	0,465
230,000	498,000	230,009	0,009
240,000	520,000	240,008	0,008
Variação média:	21,042	9,563	*****
Erro mínimo:	*****	*****	0,008
Erro máximo:	*****	*****	0,486

Apesar de a variação média ser, neste caso, um pouco menor do que nos casos A e B, provocando um maior afastamento em relação ao parâmetro ideal, houve um aumento de precisão das leituras. Os erros máximo e mínimo, inclusive, são satisfatoriamente baixos. Consequentemente, o ajuste da curva de leituras do MCU perfaz-se quase como uma sobreposição à curva de referência, de acordo com a figura 3.17.

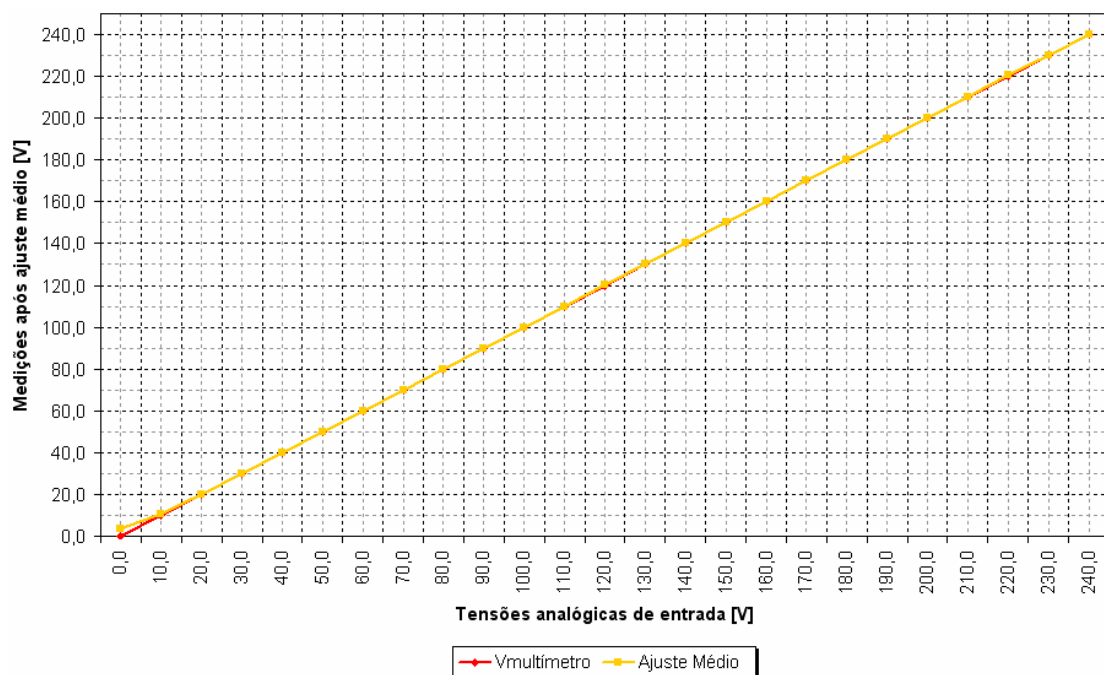


Figura 3.17 - Aproximação entre leituras após ajuste médio.

Após esta exaustiva parametrização do cálculo RMS do microcontrolador, pode-se escrever a equação definitiva empregado no *firmware* do módulo de leitura:

$$V_P = 0,455.V_{PIC} + 3,668 \quad (3.8)$$

Sendo:

V_{PIC} = Tensão originalmente calculada pelo MCU;

V_P = Tensão RMS parametrizada pelas constantes de calibração.

d.4) Ações de Comando

A cada ciclo da rede é realizada a digitalização e o cálculo do valor RMS da tensão da fonte, como explanado anteriormente. A partir disto, o microcontrolador pode, então, executar as três ações de comando previstas no *firmware* do módulo de leitura (nesta ordem):

1. Enquadramento da tensão à resolução nº 505 da ANEEL;
2. Determinação do tap a ser acionado;
3. Envio do valor RMS ao computador via porta serial (RS-232).

Primeiramente, o módulo de leitura RMS enquadra a tensão eficaz da fonte às regiões previstas na resolução nº 505 da ANEEL [37] e, em seguida, às faixas de cobertura de cada tap. A figura 3.18 estabelece um paralelo entre as determinações da norma para as duas faixas de interesse deste trabalho – BT (inferior a 1 kV) e MT (entre 1 e 69 kV), com a faixa de atuação da unidade de controle eletrônico do RT. São apresentados ainda os limites previstos à atuação dos taps, sendo 2A e 1A designados ao abaixamento da tensão, 1E até 6E à elevação e 00 ao tap central. Note-se aqui que existe uma pequena região de insensibilidade entre os mesmos, a fim de prevenir chaveamentos sucessivos capazes de desgastar os equipamentos envolvidos no processo de regulação.

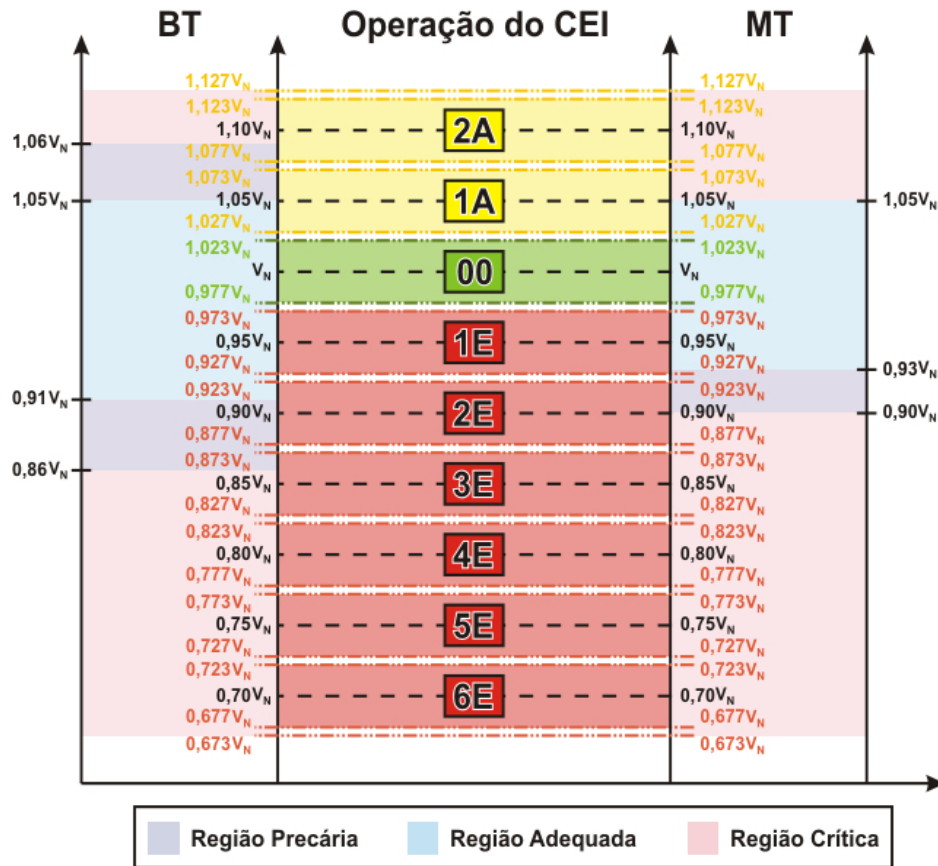


Figura 3,18 – Faixas de atuação do RT em relação à resolução nº 505 da ANEEL.

A tabela 3.6 apresenta os valores absolutos dos limites de atuação de cada tap, incluindo os limites máximo e mínimo de atuação do regulador de tensão com CEI.

Tabela 3.6 - Valores RMS de regulação em baixa (BT) e média tensão (MT).

Nível	Percentual			BT (V _N = 220) [V]			MT (V _N = 9,76) [kV]		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
Máx.	***	***	1,127V _N	***	***	248	***	***	11
2A	1,077V _N	1,10V _N	1,123V _N	237	242	247	10,51	10,74	10,96
1A	1,027V _N	1,05V _N	1,073V _N	226	231	236	10,02	10,25	10,47
00	0,977V _N	V _N	1,023V _N	215	220	225	9,54	9,76	9,98
1E	0,927V _N	0,95V _N	0,973V _N	204	209	214	9,05	9,27	9,5
2E	0,877V _N	0,90V _N	0,923V _N	193	198	203	8,56	8,78	9,01
3E	0,827V _N	0,85V _N	0,873V _N	182	187	192	8,07	8,3	8,52
4E	0,777V _N	0,80V _N	0,823V _N	171	176	181	7,58	7,81	8,03
5E	0,727V _N	0,75V _N	0,773V _N	160	165	170	7,1	7,32	7,54
6E	0,677V _N	0,70V _N	0,723V _N	149	154	159	6,61	6,83	7,06
Mín.	0,673V _N	***	***	148	***	***	6,57	***	***

Uma vez determinada a aplicação da resolução da ANEEL e a comutação do tap regulador, o módulo de leitura RMS faz uso de um protocolo serial (RS-232) para proceder ao envio do valor RMS obtido ao computador. Os dados são enviados em alta velocidade (115200 bps) para que a filosofia de leitura da tensão ciclo a ciclo permaneça vigorante. A figura 3.19 apresenta o *software* empregado na aquisição e análise dos valores processados no presente módulo.

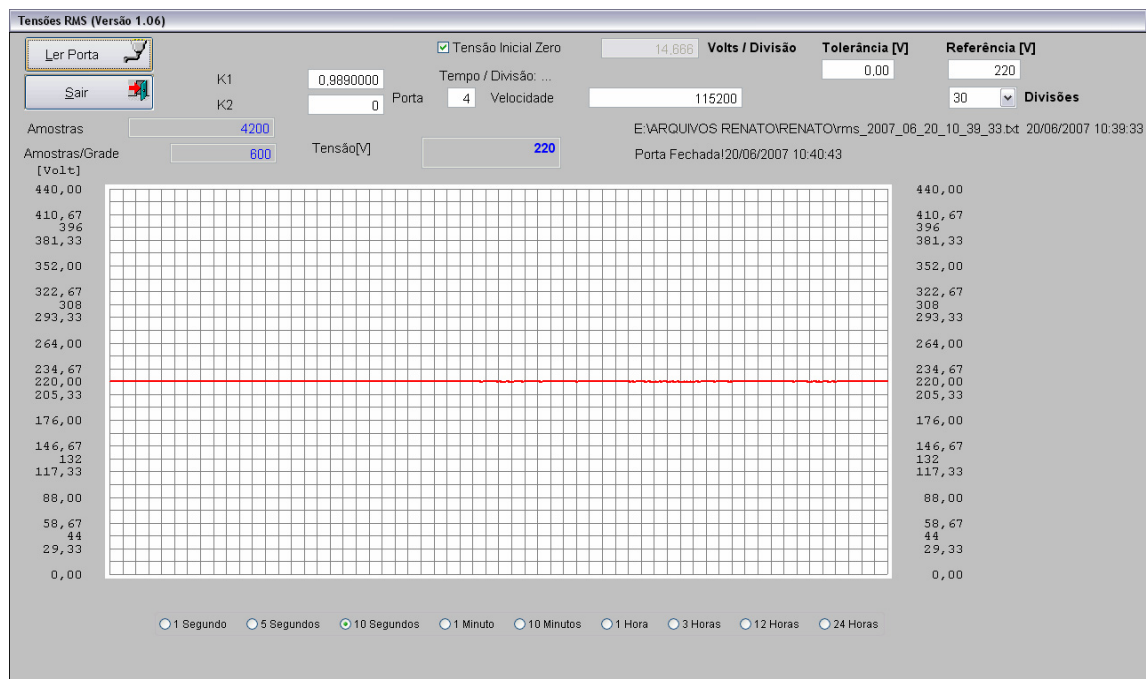


Figura 3.19 - *Software* de aquisição dos dados do módulo de leitura RMS.

e) Decoder

O *decoder* é um dispositivo capaz de receber um comando codificado e transforma-lo em uma informação de saída. No caso do CD74HCT4514, CI empregado neste desenvolvimento, 04 vias de endereçamento (A3, A2, A1 e A0) são decodificadas em 16 vias de comando (Y0 a Y15), sempre uma de cada vez. Para tanto, existem duas vias de controle que devem ser utilizadas: o *Enable* ($\bar{E}$), que atua

diretamente sobre as saídas, e o *Latch Enable* ($\overline{LE}$), atuando sobre as entradas. A figura 3.20 apresenta diagrama lógico interno do dispositivo, revelando a interação entre os pinos mencionados acima.

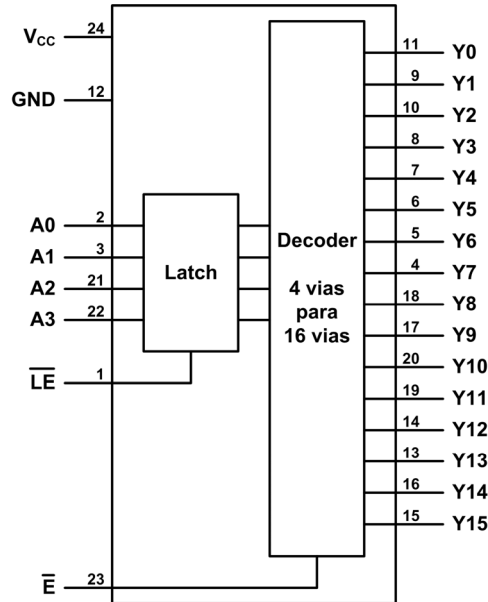


Figura 3.20 - Diagrama lógico do *decoder* CD74HCT4514.

A saída selecionada é habilitada pela aplicação de um nível baixo (em padrão TTL) na entrada *Enable* ($\overline{E}$). Um nível alto em $\overline{E}$ inibe a operacionalidade de todas as saídas. Quando o *Latch Enable* ($\overline{LE}$) é “setado” (nível alto – H), as saídas acompanham as mudanças de endereçamento das entradas. Todavia, se $\overline{LE}$ for “resetado” (nível baixo – L), elas deixarão de acompanhar tais mudanças e permanecerão no estado anterior ao desligamento do *latch* (H ou L). A tabela 3.7 corresponde à tabela verdade do mapeamento do dispositivo, incluindo os taps acionados em cada saída e o endereço de comando enviado pelo PIC.

De acordo com as informações tabeladas, três características tornam o *decoder* uma opção bastante interessante para a comutação segura dos taps:

- Quando $\overline{E} = H$ todas as saídas são desligadas independentemente do endereçamento, o que elimina qualquer possibilidade de curto-circuito provocado pelo controle eletrônico do RT no intervalo entre as comutações de taps;
- Somente uma única saída (ou um único tap) pode ser acionada quando $\overline{E} = L$, evitando curtos durante a operação de um dado tap;
- Nas regiões de insensibilidade, o MCU faz $\overline{LE} = L$, “congelando” as saídas em seu estado anterior e rechaçando as possibilidades de rebatimento entre taps.

Tabela 3.7 - Tabela verdade de mapeamento do CD74HCT4514 e acionamento dos taps.

$\overline{E}$	Entradas do decoder				Saídas do decoder (H)	Tap comandado	Endereçamento do PIC (hex.)
	A3	A2	A1	A0			
L	L	L	L	L	Y0	***	***
L	L	L	L	H	Y1	***	***
L	L	L	H	L	Y2	6E	02h
L	L	L	H	H	Y3	***	***
L	L	H	L	L	Y4	***	***
L	L	H	L	H	Y5	***	***
L	L	H	H	L	Y6	***	***
L	L	H	H	H	Y7	***	***
L	H	L	L	L	Y8	00	08h
L	H	L	L	H	Y9	1E	09h
L	H	L	H	L	Y10	2A	0Ah
L	H	L	H	H	Y11	1A	0Bh
L	H	H	L	L	Y12	4E	0Ch
L	H	H	L	H	Y13	5E	0Dh
L	H	H	H	L	Y14	2E	0Eh
L	H	H	H	H	Y15	3E	0Fh
H	X	X	X	X	Todas = L	Desliga todos	X
Observações: 1. Em todos os casos $\overline{LE} = H$; 2. H – nível alto, L – nível baixo, X – não importa.							

Como visto, o emprego do *decoder* corrobora com a entrega ao módulo decisório de um comando preciso e seguro, tanto para o acionamento quanto para o desligamento de taps.

3.2.3- ESTRUTURA DE *FIRMWARE*

O controle eletrônico inteligente do RT foi idealizado segundo as bases de um ramo da Inteligência Artificial (I.A.) denominado Sistema Especialista [43]. Na verdade, como o controle é constituído por dois módulos, o de leitura RMS e o decisório, têm-se a interação entre duas unidades inteligentes em prol da eliminação de fenômenos de variação da tensão sobre a carga.

Um sistema especialista é autônomo porque emula o raciocínio humano do especialista no que tange os procedimentos de controle a serem realizados [44]. Ele é basicamente constituído por uma base de conhecimento aliada a uma máquina de inferência.

A base de conhecimento é constituída por dois pilares: fatos e regras. A base de fatos representa o conhecimento detido sobre o estado atual das variáveis envolvidas no problema a ser resolvido. Na base de regras é representado o conhecimento do especialista sobre o assunto. A máquina de inferência é responsável por avaliar, encadear e determinar quando e como este conhecimento deve ser aplicado, ou seja, ela faz com que a base de regras atue sobre a base de fatos a fim de determinar a correção ou ajuste pretendido.

No caso do módulo de leitura, todas as atenções se voltam à variável que armazena, ciclo a ciclo, o valor RMS calculado. A partir deste fato, o processador interno do microcontrolador (máquina de inferência) começa a avaliar a situação atual da tensão em conformidade às duas regras propostas no *firmware*: a resolução nº 505 da ANEEL e a determinação do tap a ser acionado. O fluxograma da figura 3.21 apresenta a estruturação sequenciada das ações do presente módulo.

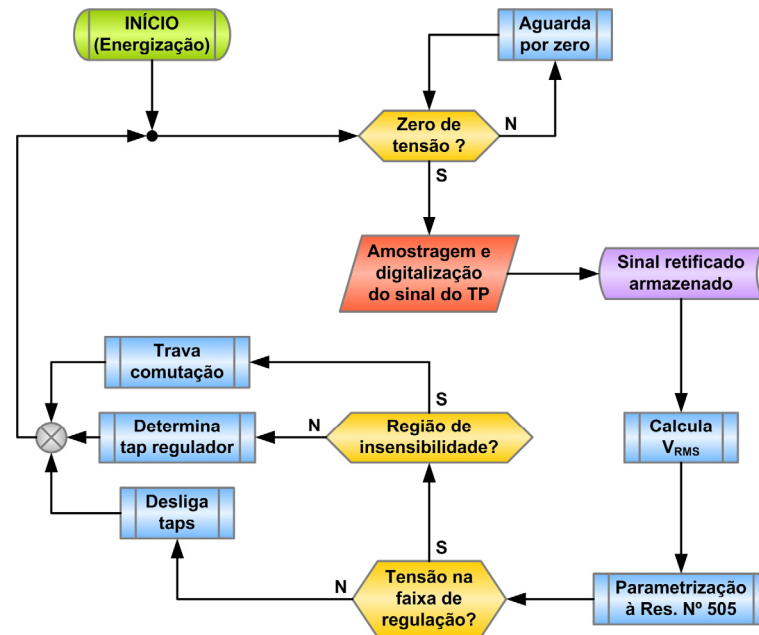


Figura 3.21 - Fluxograma operacional do módulo de leitura RMS.

A seguir será apresentada uma descrição de todos os passos desenvolvidos no *firmware*:

- **Passo 01 (Início):** Energização do dispositivo. Todas as variáveis são “setadas”, mas nenhuma ação de controle é executada;
- **Passo 02 (Decisão 1: Zero de tensão?):** O código procura por um zero de tensão para que o processo de digitalização possa ter início. Traça-se, então, um *loop* com o passo 3 até que haja um resultado para a busca, momento em que ocorre o direcionamento para o passo 4;
- **Passo 03 (Aguarda por zero):** Programa espera pelo zero de tensão mais próximo;
- **Passo 04 (Amostragem e digitalização do sinal do TP):** O sinal proveniente do TP começa a ser digitalizado, perfazendo o total de 310 amostras anteriormente descrito. Um intervalo de 21 μ s é utilizado entre a captura de amostras sucessivas, de modo que o tempo total do processo é de 6,5 ms;

- **Passo 05 (Sinal retificado armazenado):** As amostras coletadas são armazenadas em um vetor para posterior análise;
- **Passo 06 (Cálculo RMS):** Finalizada a conversão A/D, tem início o cálculo RMS, momento em que é empregada a equação 3.8;
- **Passo 07 (Parametrização à Res. nº 505):** O valor calculado no passo anterior é analisado segundo a base de regras constituída pelos limites propostos na Resolução nº 505 da ANEEL. É feita, então, a sinalização ao usuário do enquadramento atual da tensão;
- **Passo 08 (Decisão 2: Tensão na faixa de regulação?):** Após a parametrização do passo 07, o *firmware* avalia se o valor de tensão RMS calculado pode ser regulado, caso seja necessário. Em outras palavras, VTCD's presentes no sinal coletado junto à fonte só poderão ser corrigidos se suas amplitudes estiverem entre 67,3% e 112,7% do valor nominal da tensão. Se esta condição for atendida, o programa é direcionado para o passo 09; caso contrário o passo 10 é acionado;
- **Passo 09 (Decisão 3: Região de insensibilidade?):** Neste ponto o *firmware* verifica se a tensão já pode ser enquadrada em algum tap de regulação ou se está situada em das regiões de insensibilidade. Se a primeira opção for verificada, o código segue para o passo 11, senão é deslocado para o passo 12;
- **Passo 10 (Desliga taps):** Todos os taps são desligados, uma vez que a tensão extrapolou os limites de capacidade de regulação do RT. Isto é feito com a atribuição de nível baixo ao *Latch Enable* do *decoder*. O programa retorna, então, para o ponto de partida e aguarda por um novo zero de tensão para que o processo possa ser repetido;

- **Passo 11 (Determina tap regulador):** O tap apropriado é codificado e endereçado ao *decoder*, o qual decodifica a informação e repassa ao módulo decisório. Na sequência, o programa retorna ao seu nó inicial;
- **Passo 12 (Trava comutação):** Encontrada uma região de insensibilidade é atribuído um nível alto ao *Enable* do *decoder* visando prevenir oscilações rápidas e continuadas entre taps. Feito isto, o programa retorna ao nó inicial.

3.3- MÓDULO DECISÓRIO

3.3.1- VISÃO GERAL

Uma vez verificada a incidência de algum tipo de distúrbio sobre a tensão fornecida à carga, seja um *voltage sag* ou um *voltage swell*, faz-se necessário decidir quando e como efetuar o procedimento de correção. Este é o papel desempenhado pelo módulo decisório, mostrado na figura 3.22.

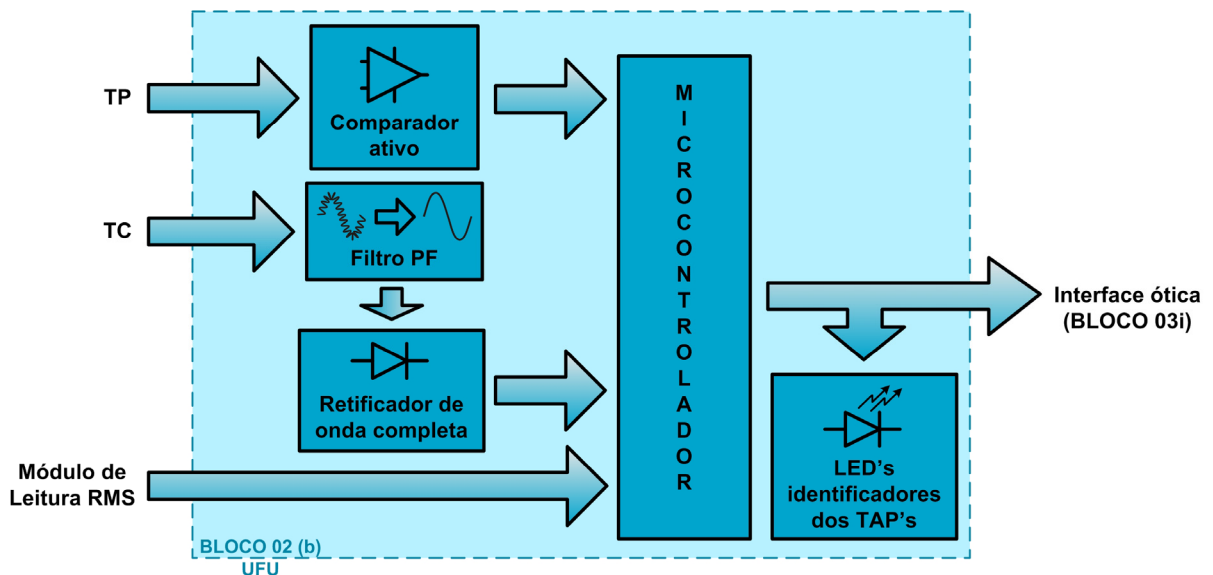


Figura 3.22 - Diagrama esquemático do módulo decisório.

Após receber o comando do módulo de leitura RMS a respeito do tap a ser acionado, o módulo decisório busca uma confirmação da ação a ser tomada e executa-a em sincronismo com a tensão da fonte. Para tanto, faz-se necessário identificar os zeros da tensão fornecida pelo TP. Contudo, não pode haver risco de curto-circuito durante a comutação, ou seja, durante a retirada de um tap e a inserção de outro. Assim, através de um transformador de corrente (TC), é feita uma inspeção de

segurança na amplitude da corrente drenada pela carga, tanto para verificar o seu desligamento quanto para prevenir que curtos-circuitos sejam induzidos pelo controle eletrônico.

Na sequência, serão explanados todos os aspectos relevantes do módulo decisório, desde o projeto dos circuitos que compõem seu *hardware* até a estrutura lógica de funcionamento de seu *firmware*.

3.3.2- ESTRUTURA DE *HARDWARE*

a) Transformador de potencial (TP)

Um único TP foi utilizado para as referências de zeros em ambos os módulos do controle eletrônico. Todas as características relevantes ao projeto do controle que lhe dizem respeito já foram anteriormente explanadas, não cabendo aqui novas ponderações.

b) Transdutor de corrente (TC)

A fim de que a corrente drenada pela carga pudesse ser continuamente monitorada, um transdutor de corrente (TC) foi empregado no processo. Com captura por efeito *Hall*, o dispositivo pode receber no primário um valor RMS de até 200 A, com uma relação de transformação (K) de 10000. Deste modo, se a corrente no primário (I_p) for, por exemplo, igual a 100 A, a corrente no secundário (I_s) corresponderá a 10 mA. Para simplificar sua utilização, entretanto, a resposta de

corrente na saída é entregue em forma de tensão (V_S), a qual pode variar entre 0 e $+5V_{RMS}$. Logo, no exemplo proposto V_S será de 2,5 V_{RMS} . A figura 3.23 apresenta o modelo de transdutor empregado nesta pesquisa.

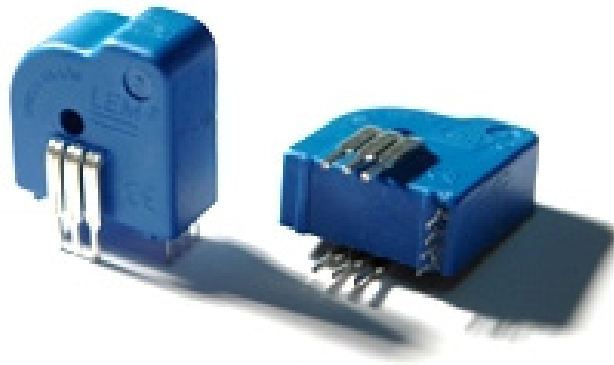


Figura 3.23 - Transdutor de corrente empregado na monitoração da corrente na carga.

Como é possível perceber, o equipamento em questão destina-se a sistemas com elevada corrente de carga, os quais não podem ser reproduzidos em laboratórios de pesquisa universitária, como os encontrados na Universidade Federal de Uberlândia. Deste modo, seu uso restringiu-se aos testes e aplicações em média tensão. Testes estes, inclusive, que foram realizados nas dependências do LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), como será comentado no próximo capítulo.

Para os testes em baixa tensão, o TC foi substituído por um TP, cujo sinal foi retificado e condicionado de tal maneira a fornecer uma resposta em tensão similar à concedida pelo dispositivo de corrente. Assim, um retificador de onda completa, similar ao utilizado no módulo de leitura RMS, foi empregado, como será apresentado mais adiante.

c) Comparador Ativo

O comparador ativo utilizado no módulo decisório tem exatamente as mesmas características do que foi apresentado no módulo anterior, ou seja, o seu papel é detectar os zeros de tensão. A diferença é que, agora, a finalidade de tal detecção não é mais para determinar o início da conversão A/D como outrora, mas sim para demarcar o instante ideal para que a tensão, já corrigida pelo controle eletrônico, seja novamente fornecida à carga.

d) Filtro Passa-Faixa (PF)

Procurando prevenir que possíveis distorções, ruídos ou mesmo frequências harmônicas na corrente capturada pelo TC fossem repassadas ao circuito de condicionamento (retificador) e, por conseguinte, ao microcontrolador do módulo decisório, um filtro passa-faixa foi desenvolvido. Trata-se de um filtro ativo sintonizado em 60 Hz, frequência de operação adotada no Brasil. As figuras 3.24 e 3.25 apresentam, respectivamente, o modelo de circuito implementado e a sua curva de resposta em frequência.

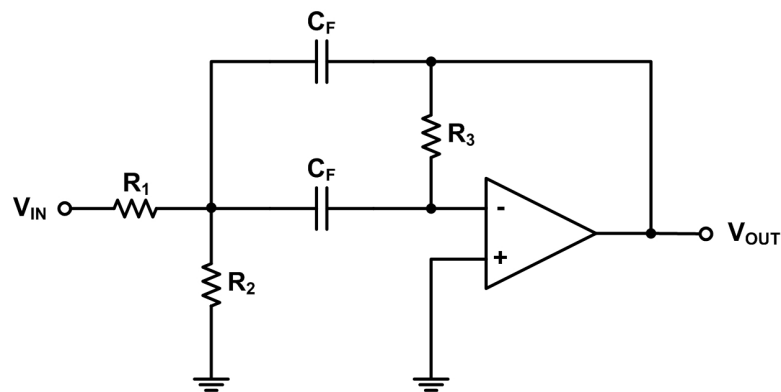


Figura 3.24 – Modelo do filtro PF implementado no projeto.

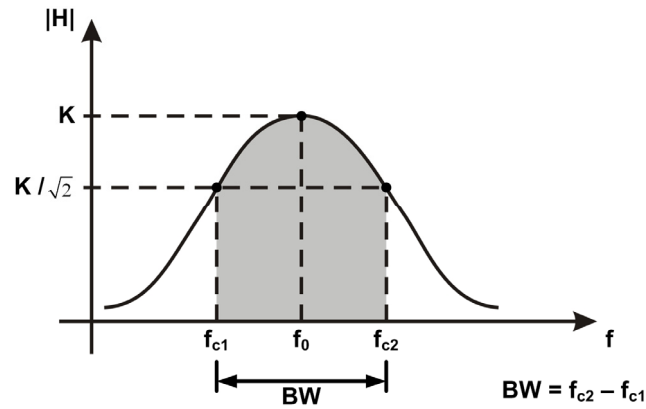


Figura 3.25 - Curva de resposta em frequência do filtro PF.

Segundo [41], a frequência de sintonia do circuito (f_0) pode ser obtida pela seguinte relação:

$$f_0 = \sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}} \quad (3.9)$$

Sendo:

- f_{c1} = Frequência de corte inferior;
- f_{c2} = Frequência de corte superior;
- f_0 = Frequência de sintonia do filtro.

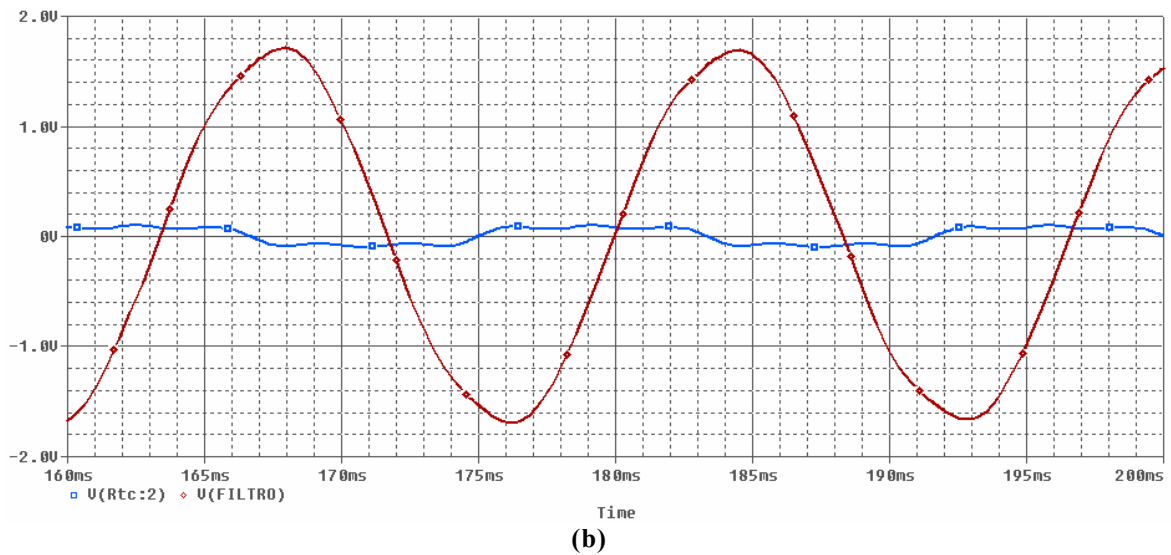
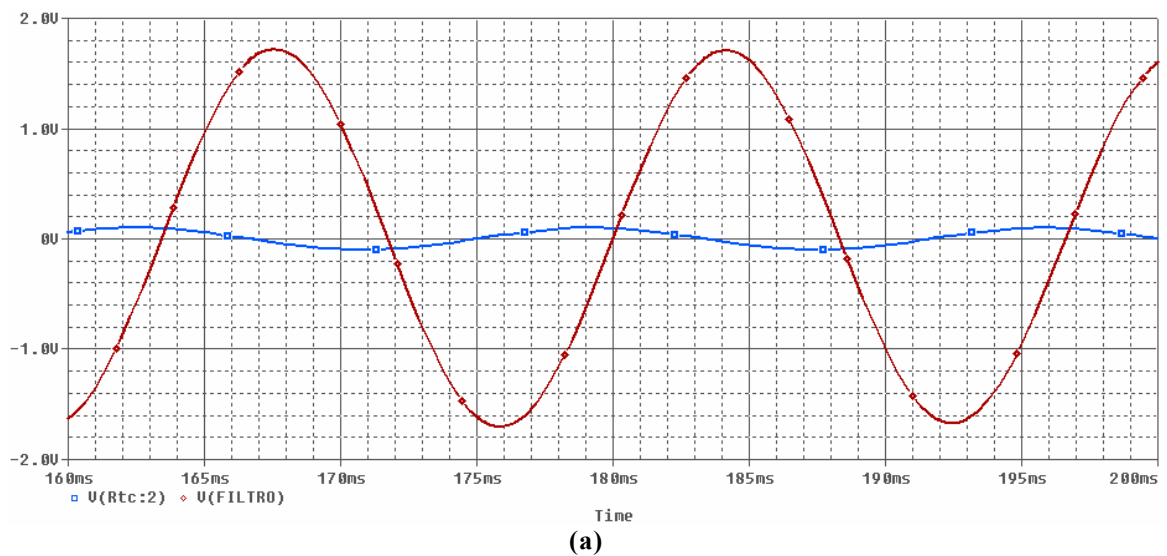
Para que f_0 corresponda a 60 Hz, conforme desejado, adotou-se f_{c1} e f_{c2} iguais a, respectivamente, 46,9 Hz e 76,9 Hz. Deste modo, tem-se:

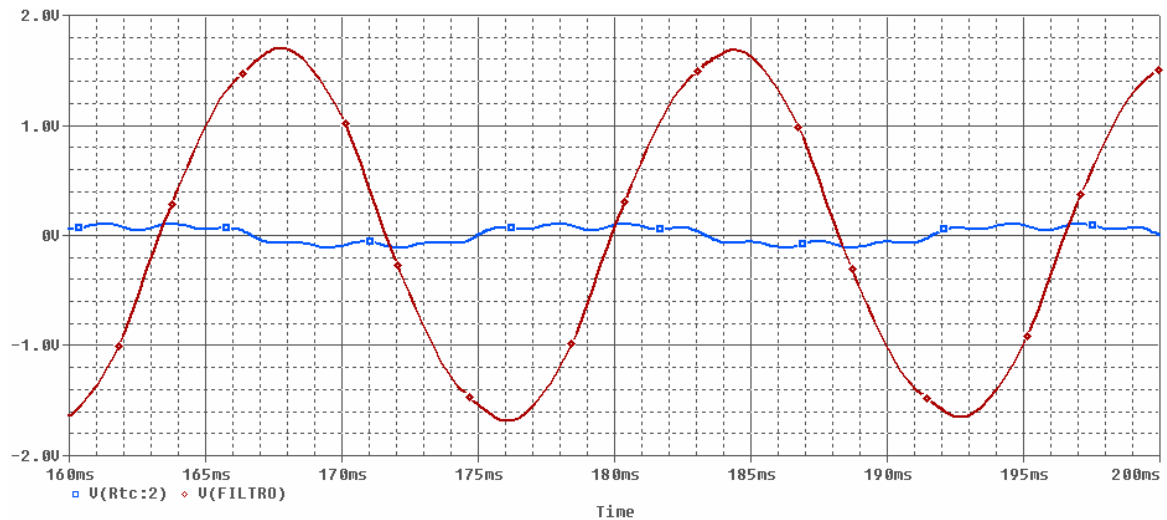
$$f_0 = \sqrt{46,9 \cdot 76,9} = 60,06 \text{ Hz}$$

Por conseguinte, a largura de banda (BW) é dada por:

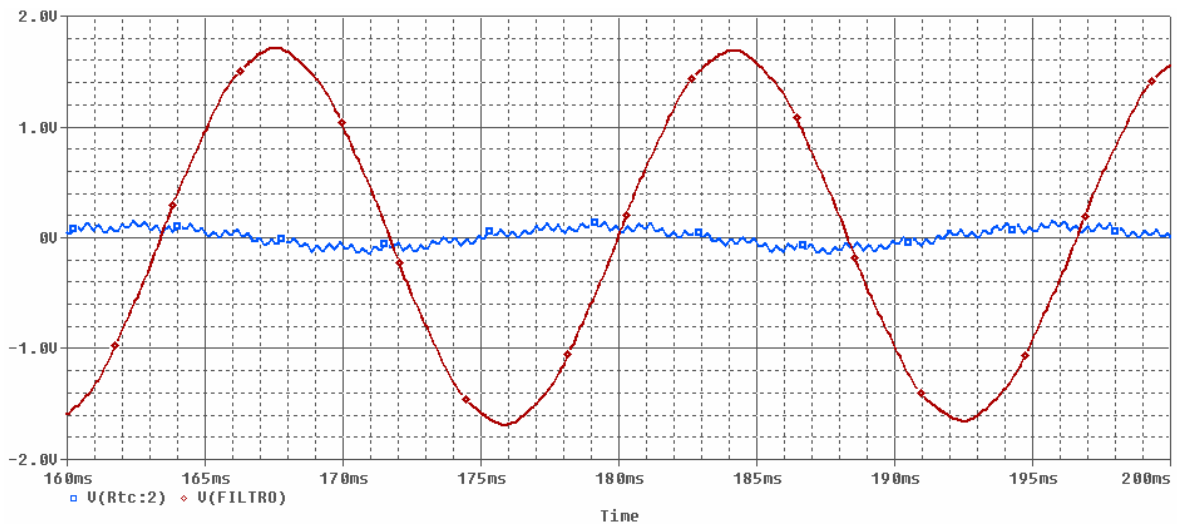
$$BW = 76,9 - 46,9 = 30 \text{ Hz}$$

Assim, as frequências excedentes à faixa de passagem do filtro serão ceifadas, otimizando a coleta de sinal de corrente para avaliação do MCU. A figura 3.26(a), (b), (c) e (d) apresenta o comportamento do circuito de filtragem mediante a injeção de diferentes frequências adicionais, ou seja, além da frequência de 60 Hz do sinal naturalmente produzida pelo TC.





(c)



(d)

Figura 3.26 – Simulações computacionais do circuito de filtragem do sinal do TC.

- (a) Sem nenhuma frequência adicional;
- (b) Com frequências adicionais de 180 e 300 Hz;
- (c) Com frequência adicional de 180 e 420 Hz;
- (d) Com frequência adicional de 540 e 2400 Hz.

Os gráficos da figura anterior apresentam o sinal de entrada (azul) em forma de tensão. Como a corrente no secundário do TC pode atingir, no máximo, 20 mA, a maior tensão de entrada do filtro será sempre de 100 mV. Vale salientar ainda que, a amplitude da tensão filtrada na saída do dispositivo (vermelha) foi projetada para ser, aproximadamente, 17 vezes maior que a da entrada. Isto é justificado pela necessidade de adequação da amplitude do sinal proveniente do transdutor às características do retificador de onda completa que recebe o sinal de saída do filtro.

e) Retificador de onda completa

O esquema elétrico do retificador de precisão de onda completa utilizado no módulo decisório segue uma configuração equivalente à do circuito apresentado no módulo anterior, exceto pelo fato de que sua saída é subdividida em duas: uma não é alisada por capacitor eletrolítico e a outra sim. O presente circuito é destinado à retificação do sinal proveniente do transdutor de corrente, devidamente filtrado, a fim de fornecer ao microcontrolador o subsídio necessário para verificar, tanto se a corrente foi “zerada” no intervalo de comutação entre duas chaves (através da retificação sem alisamento) quanto se ocorreu algum curto-circuito na carga (retificação com alisamento).

A figura 3.27 mostra um exemplo de retificação baseado no caso (d) da figura anterior e comprova que não houve propagação de distorções ao longo do circuito de controle eletrônico. Ressalte-se que a queda na amplitude da tensão retificada alisada (verde claro) é devida ao divisor resistivo posicionado entre a saída do retificador (verde escuro) e o capacitor eletrolítico.

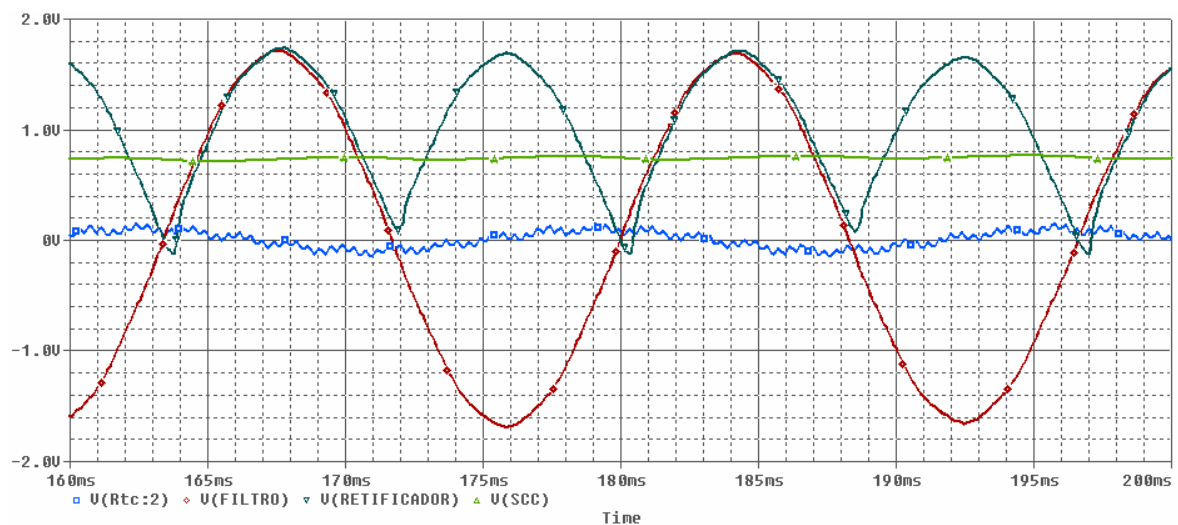


Figura 3.27 - Retificação do sinal filtrado do TC.

f) Microcontrolador

Dispondo dos sinais, devidamente condicionados, provenientes do TP e do TC, o microcontrolador do módulo decisório tem todas as informações necessárias para estabelecer as diretivas à comutação segura dos taps. Novamente, o dispositivo escolhido para esta função foi o PIC18F2525, pois, em virtude das características anteriormente apresentadas, possui totais condições de desempenhar uma eficiente operação do controle decisório.

A participação do módulo decisório no controle eletrônico do RT tem uma única tônica: primar pela segurança antes, durante e depois do acionamento de um determinado tap. E esta razão, por si só, já representou um motivo suficientemente grande para o desmembramento do presente módulo em relação ao anterior, uma vez que isto proporcionaria maior eficiência para ambos.

O módulo decisório começa sua atuação acionando o tap central (00) durante um segundo. Por esta razão, pode ser concebido como o motor de partida do controle eletrônico. Feito isso, tem início a seqüência de ações do microcontrolador, entremeando verificações de comando do módulo de leitura RMS, checagem de zeros de corrente, busca por zeros de tensão e checagem de níveis de curto-circuito, conforme será visto a seguir.

Feito o acionamento de partida do tap 00, ação executada uma única vez, o módulo decisório aguarda pelo comando do módulo de leitura RMS determinando o tap a ser acionado. Na verdade, antes que as chaves que compõem o referido tap sejam de fato energizadas, mais duas confirmações de comando serão requeridas. O objetivo disto é evitar rebatimentos de tap decorrentes de oscilações exacerbadas na tensão da fonte, o que poderia gerar transitórios e desgastes em todo o equipamento.

A checagem de zeros de corrente é realizada a partir da conversão A/D do sinal retificado do TC. Ao todo, são armazenadas 96 amostras, coletadas a cada 85 μ s, totalizando um período de digitalização de 8,16 ms. Tal verificação é realizada sempre que um comando de desligamento de taps for utilizado, objetivando comprovar o corte na alimentação da carga.

Encontrados os zeros de corrente, o caminho está aberto para o acionamento do tap que regulará a tensão na carga. Porém, se esta fosse re-injetada em qualquer instante, a dissipação de potência nas chaves poderia aumentar significativamente, sobretudo quando a regulação ocorresse próximo ao valor de pico da referida grandeza. Dependendo da carga, os resultados seriam desastrosos, não somente para os tiristores, mas para todo o sistema influenciado pelo RT. Assim, a busca do MCU por zeros (pontos de inflexão do sinal senoidal) é crucial para localizar o momento mais oportuno à concretização do ajuste de tensão.

Uma vez acionado o tap regulador, o módulo decisório lhe garante uma permanência mínima de 25 ms, o que corresponde a um ciclo e meio da rede elétrica. Após este período ocorre uma checagem de curto-circuito na carga, a qual é realizada a partir de uma rápida conversão A/D. A digitalização, agora, é realizada sobre o sinal retificado e alisado proveniente do TC. São coletadas apenas 5 amostras, separadas por 23 μ s, totalizando um período de 115 μ s (0,7% do ciclo da rede). Desta feita, o código interpretará que houve um curto sempre que o sinal digitalizado suplantou o nível de 1,4 Volts. A partir daí, medidas cautelares de emergência deverão ser tomadas, como, por exemplo, o acionamento de um estágio *by-pass* ou o desligamento de todos os taps por um determinado período.

Como será visto na sequência, o *firmware* do módulo decisório permanecerá em operação cíclica no último estágio apresentado (acionamento de tap com permanência

mínima e checagem de curto-circuito) até que receba um novo comando de comutação provindo do módulo de leitura RMS.

3.3.3- ESTRUTURA DE *FIRMWARE*

O *firmware* do módulo decisório é parte integrante do mecanismo de Inteligência Artificial do controle eletrônico do RT. A fim de esclarecer, passo a passo, a operação sequenciada do referido código, o fluxograma da figura 3.28 foi desenvolvido.

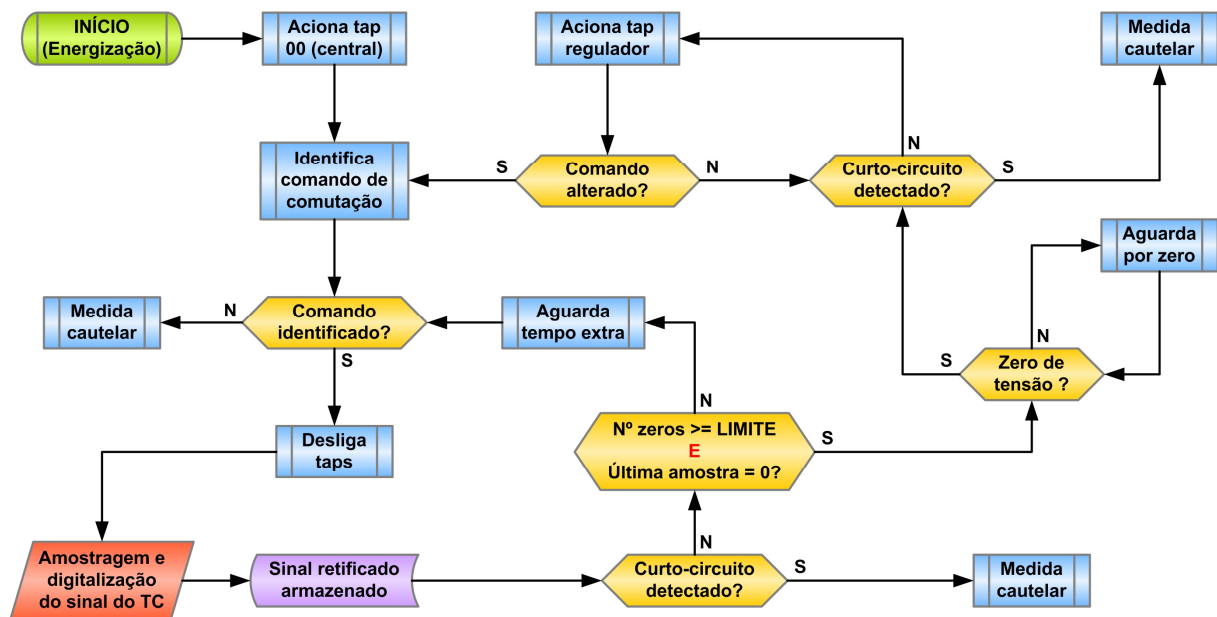


Figura 3.28 - Fluxograma operacional do módulo decisório.

Os itens abaixo descrevem todos os procedimentos desenvolvidos no código e tornam mais evidente as operações do fluxograma:

- **Passo 01 (Início):** A tensão na carga é nula e no controle inteligente são aplicadas as configurações iniciais do dispositivo. As variáveis locais e globais

são “setadas” e todas as saídas permanecem sem informações. Vale ressaltar que este passo é executado somente no instante inicial da execução do código e tem duração extremamente rápida (alguns poucos microssegundos);

- **Passo 02 (Aciona tap 00):** O tap central é inicialmente acionado por 1 s, sendo este tempo adequado às condições de inicialização do ambiente e da carga a ser controlada;
- **Passo 03 (Identifica comando de comutação):** É feita a identificação do comando enviado pelo módulo de leitura RMS sobre o tap a ser acionado;
- **Passo 04 (Decisão 1: Comando identificado?):** Na primeira verificação o código averigua se de fato o comando do módulo de leitura pôde ser identificado. Em caso afirmativo, o programa segue para o passo 06; senão, é direcionado ao passo 05;
- **Passo 05 (Medida cautelar):** Esta medida corresponde a qualquer tipo de ação destinada a proteger a carga ou mesmo todo o sistema envolvido na operação, como, por exemplo, o desligamento das chaves condutoras dos taps, o acionamento do tap central ou ainda o acionamento de uma unidade *by-pass*;
- **Passo 06 (Desliga taps):** Todos os taps são desligados por um período fixo mínimo de 3 ms;
- **Passo 07 (Amostragem e digitalização do sinal do TC):** O sinal de tensão proveniente do transdutor de corrente começa a ser digitalizado segundo parâmetros do microcontrolador (MCU). Este procedimento está ajustado para durar 8,16 ms, sem contar o tempo de localização dos zeros de tensão;
- **Passo 08 (Sinal senoidal armazenado):** Os dados digitalizados são armazenados em dois vetores: um vetor de 5 posições para armazenamento do

nível de curto-circuito e outro de 96 posições destinado ao armazenamento dos “zeros” de corrente;

- **Passo 09 (Decisão 2: Curto-circuito detectado?):** A partir do que foi digitalizado, a primeira ação é identificar a presença de curto-circuito no sistema. Se esta busca obtiver resultado positivo, uma medida cautelar (vide passo 05) deverá ser tomada; senão, o programa segue para o passo 10;
- **Passo 10 (Decisão 3: N° de zeros $\geq$ LIMITE e Última amostra = 0?):** Antes de realizar o acionamento do tap que regulará satisfatoriamente a tensão na carga, o código-fonte precisa certificar-se de que o tap que até então garantia a alimentação da mesma já não o faz mais. Assim, através da digitalização feita nos passos 07 e 08, o programa verifica se a corrente de fato “zerou” após o desligamento dos taps (passo 06). Uma vez comprovado isto, o programa segue para o passo 12; caso contrário segue para o passo 11. Essa averiguação é feita pela imposição de duas condições: a quantidade de zeros deve ser maior ou igual ao LIMITE (90 pontos – 93,75% do total) e a última amostra lida deve ser identificada como um zero;
- **Passo 11 (Aguarda tempo extra):** Este bloco tem a finalidade de oferecer um tempo adicional (1 ms mais o tempo descrito no passo 07) ao processo de corte de corrente na carga, de modo que o novo tap possa ser acionado com total segurança. Na sequência, o programa será imediatamente redirecionado ao passo 04;
- **Passo 12 (Decisão 4: Zero de tensão?):** O código-fonte passará a buscar um zero de tensão para que se possa determinar de fato o acionamento de um tap regulador. A busca tem seguimento até localizar o zero mais próximo, momento em que o programa é direcionado ao passo 13;

- **Passo 13 (Decisão 5: Comando alterado?):** Apesar da velocidade de execução do código ser bastante rápida faz-se necessário verificar se o comando anteriormente atestado pelos passos 03 e 04 ainda permanece o mesmo. Em caso afirmativo, o programa é direcionado ao passo 14; senão, retrocede ao passo 03;
- **Passo 14 (Decisão 6: Curto-circuito detectado?):** É feita uma nova checagem preventiva contra curtos-circuitos, similarmente ao que se procedeu no passo 09. Se esta busca obtiver resultado positivo, uma medida cautelar (passo 05) deverá ser tomada; senão, o programa segue para o passo 15;
- **Passo 15 (Aciona tap regulador):** Agora um tap já pode ser efetivamente acionado, seja de abaixamento (1A e 2A), de elevação (1E até 6E) ou o central (00). Este procedimento é garantido por um tempo mínimo de 25 ms. Transcorrido este período, o programa é redirecionado ao passo 13, estabelecendo um *loop* de checagens de curtos-circuitos (ciclo sim, ciclo não) e permanecendo sem nenhum tipo de desligamento das chaves procedido pelo programa, a menos que as condições impostas nos passos 13 ou 14 sejam violadas.

3.4- CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo, a unidade de controle eletrônico do RT foi apresentada e analisada através de seus dois módulos: o de leitura RMS e o decisório. Conforme o teor aqui exposto, o emprego de microcontroladores em ambos exerceu papel de destacada relevância na manutenção da proposta de controle autônomo e inteligente. Entretanto, a comunicação do universo programável dos PICs (*firmwares*) com o sistema de distribuição de energia que mantém as cargas em operação só pode ser realizada mediante circuitos de condicionamento de sinal. Desta feita, as características relevantes dos *hardwares* projetados para este propósito foram explanadas, como seus modos de operação, equações, curva de resposta e comportamentos gráficos. E o que se tem aqui é uma combinação entre dispositivos analógicos e digitais, objetivando sempre manter um alto padrão de confiabilidade do controle do regulador de tensão durante as rápidas correções de VTCD's.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA APLICAÇÃO DO CEI

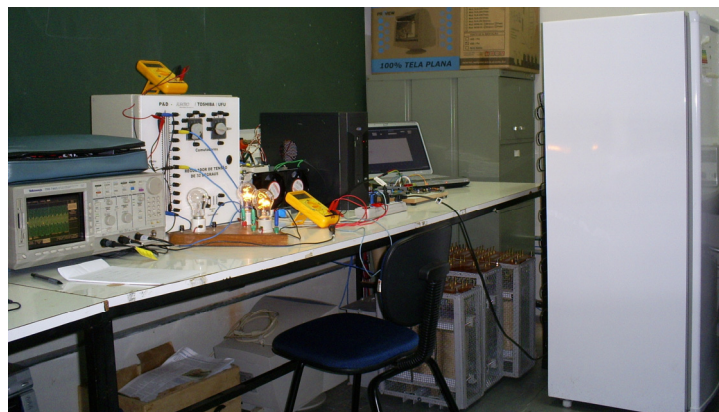
4.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez apresentada toda a estrutura do RT eletrônico, desde a sua contextualização no ensejo da regulação de tensão até o desenvolvimento do controle eletrônico proposto (contribuição efetiva deste trabalho), o presente capítulo será dedicado, então, à amostragem de resultados obtidos experimentalmente, tanto em BT (laboratórios da UFU) quanto em MT (dependências do LACTEC).

4.2- ENSAIOS EM BAIXA TENSÃO (BT)

A fim de comprovar todos os aspectos operacionais do RT com comutação eletrônica de taps, três ensaios foram elaborados. O primeiro é destinado à avaliação do impacto do sistema de regulação sobre a carga, de modo que somente a tensão e a corrente solicitadas pela mesma através do tap de regulação adequado foram observadas. O segundo revela as formas de onda da tensão na fonte e na carga ao

mesmo tempo em que mostra a corrente desta última por duas vias (o tap central e o tap de regulação), atestando a eficiência do sistema de comutação de taps, tanto no que se refere à velocidade de regulação quanto no que tange à prevenção de curtos-circuitos. O terceiro e último ensaio apresenta não somente as formas de onda das grandezas em questão, mas também, e principalmente, o comportamento da tensão RMS da carga em relação à fonte durante a ocorrência dos *sags* e *swells* induzidos no laboratório (sempre com duração de 12 ciclos ou 200 ms). As figuras 4.1(a) e (b) mostram, respectivamente, uma visão geral do sistema de teste proposto e a fonte geradora de tensão CA da HP que desempenha o papel da distribuidora de energia, sendo capaz de produzir com perfeição, dentre outras coisas, os dois tipos de VTCD's aqui observáveis.



(a)



(b)

Figura 4.1 – Sistema de regulação proposto para os testes em BT.

(a) Visão geral do RT com CEI;

(b) Fonte geradora de tensão CA da HP.

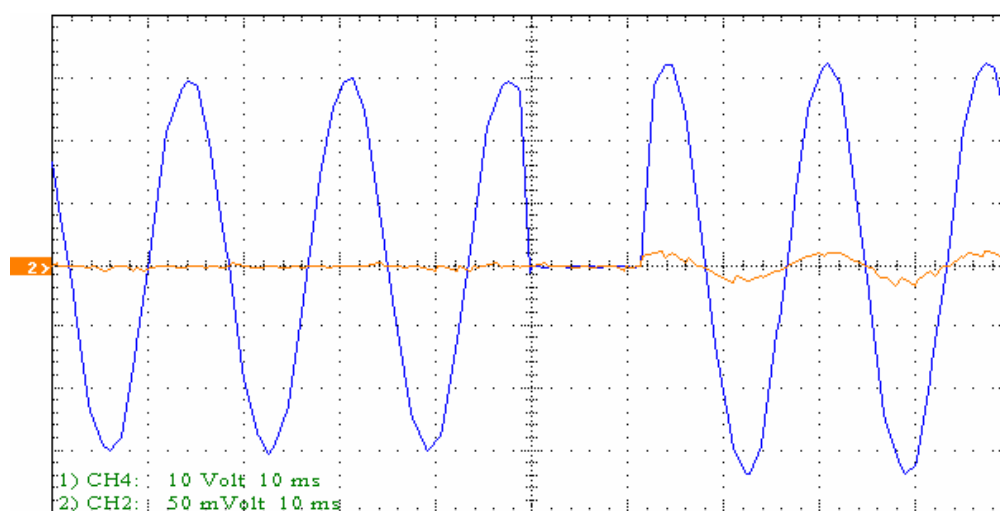
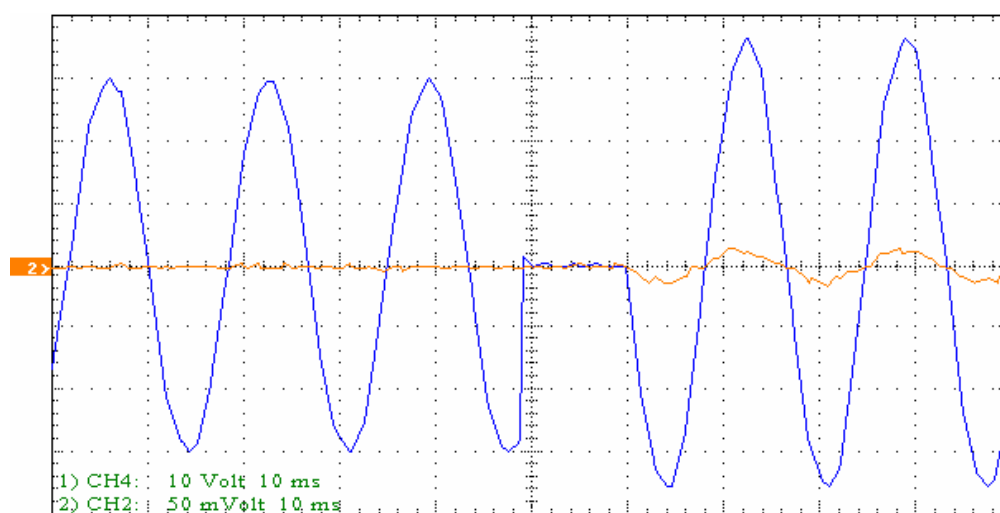
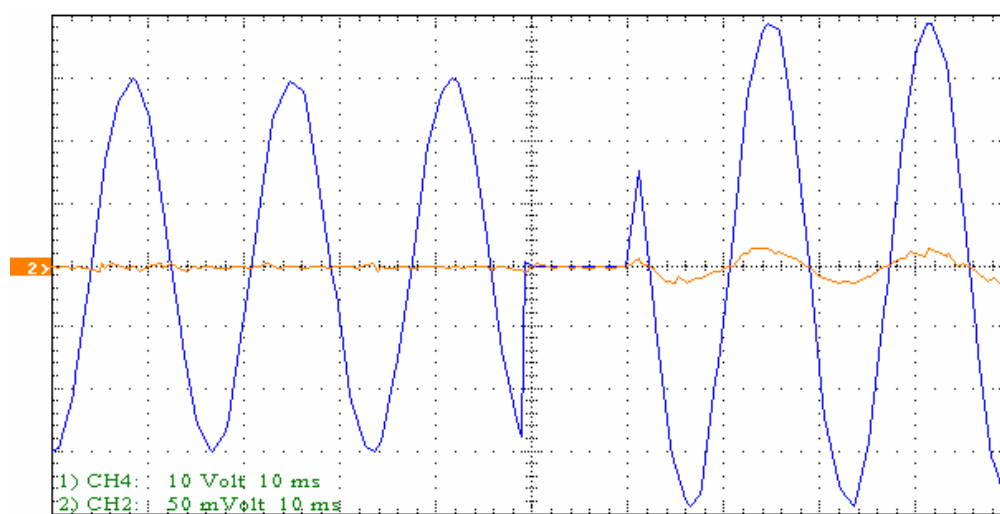
4.2.1- ENSAIO DE IMPACTO SOBRE A CARGA

Com o objetivo de avaliar o impacto das propostas de contagem de zeros de corrente e regulação em zeros de tensão, uma bateria inicial de ensaios foi elaborada. Em um primeiro momento, visando evidenciar o fato já comentado de elevação da potência consumida nas chaves, a metodologia de re-inserção da tensão na carga em pontos de inflexão (zeros) foi extirpada dos resultados apresentados a seguir. Além disso, a retirada deste procedimento facilita a visualização do período de desligamento da tensão (cerca de 10 milisegundos), sobretudo quando cargas resistivas são empregadas. Note-se ainda que, quanto à corrente, independentemente do tipo carga, a filosofia de contagem de zeros durante o desligamento dos taps foi implementada com êxito.

Os resultados aqui propostos decorrem da aplicação da metodologia de regulação da tensão sobre quatro tipos de cargas (duas lâmpadas em série, um osciloscópio digital, um computador e um motor de indução monofásico), conforme considerações subseqüentes.

a) Primeiro Ensaio: 02 Lâmpadas em Série

Para as figuras abaixo foram coletadas a tensão (azul) e a corrente (laranja) na carga, sendo que esta última foi tomada somente após o corte de tensão na carga (no tap regulador), pois o objetivo principal é mostrar a característica do desligamento momentâneo de cerca de 10 milisegundos. Como a carga é puramente resistiva, o período de desligamento permaneceu bastante evidente para todos os 05 casos (elevação em 10, 20, 30% e abaixamento em 5 e 10%) que se seguem.

**Figura 4.2** - Elevação da tensão em 10%.**Figura 4.3** - Elevação da tensão em 20%.**Figura 4.4** - Elevação da tensão em 30%.

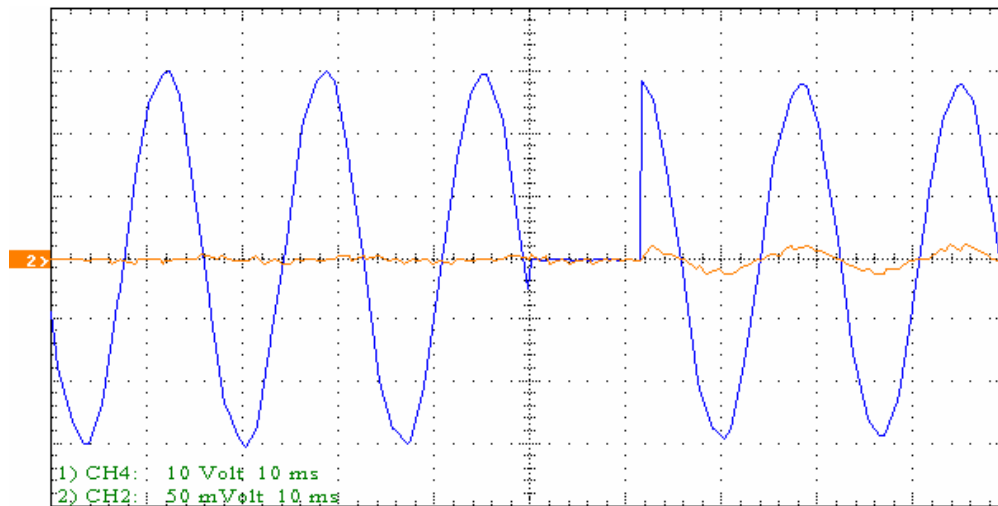


Figura 4.5 - Abaixamento da tensão em 5%.

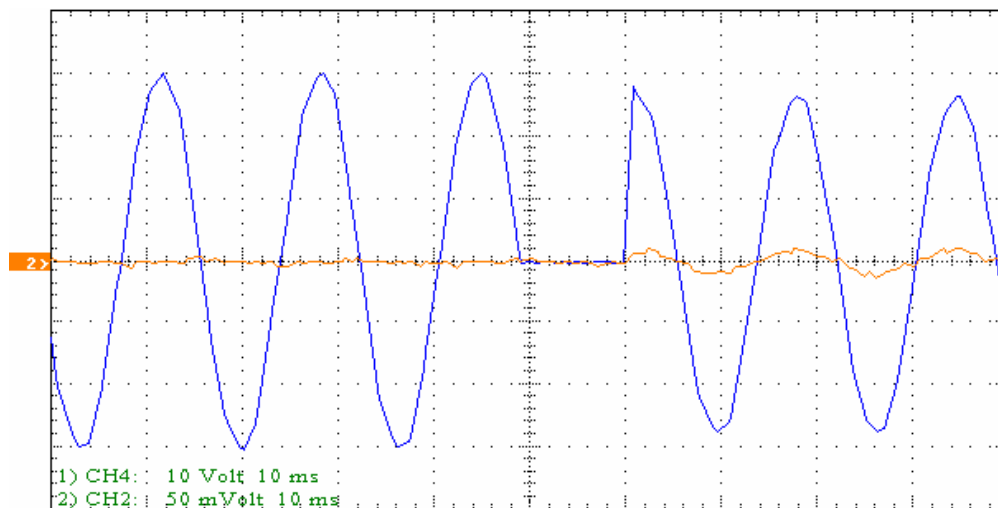


Figura 4.6 - Abaixamento da tensão em 10%.

b) Segundo Ensaio: 01 Osciloscópio Digital

Para o segundo ensaio novamente estão sendo apresentadas a tensão (azul) e a corrente (laranja) na carga, sendo que mais uma vez esta última somente foi coletada no tap regulador (conduz após corte de tensão). Note-se aqui um comportamento diferenciado das duas grandezas em questão em relação ao caso anterior em decorrência de uma distinta modelagem de carga.

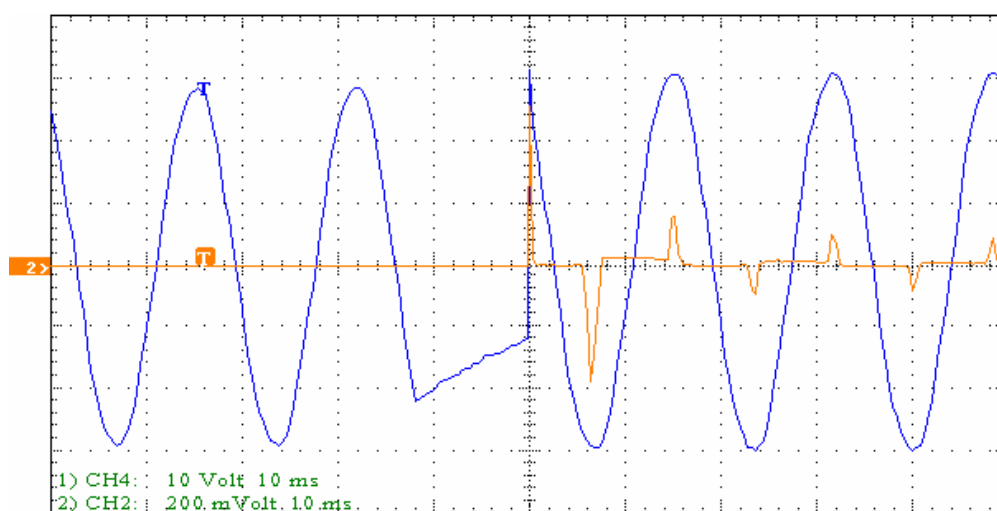


Figura 4.7 - Elevação da tensão em 5%.

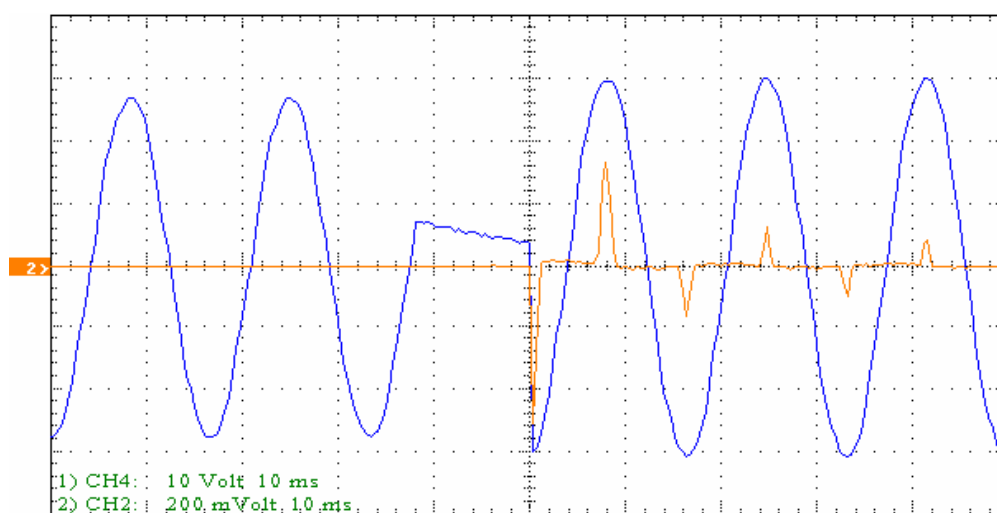


Figura 4.8 - Elevação da tensão em 10%.

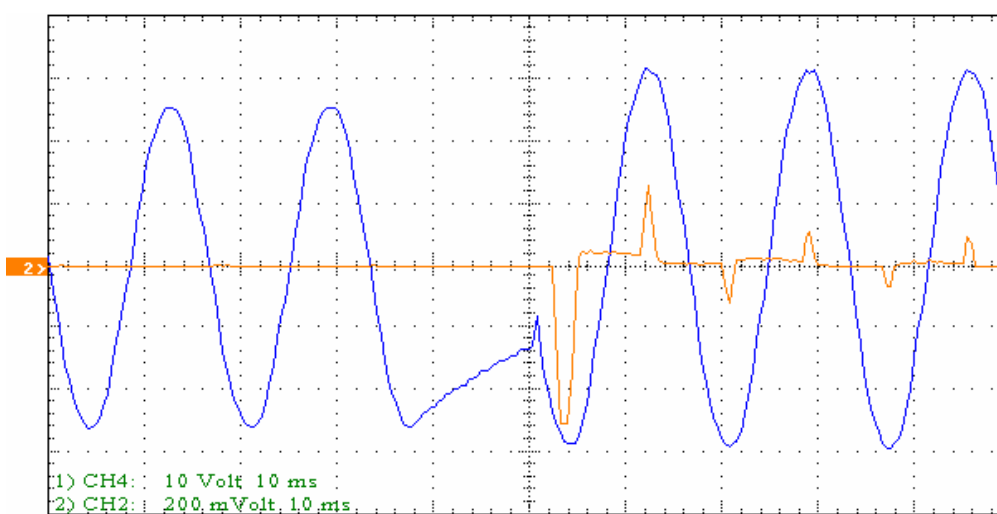
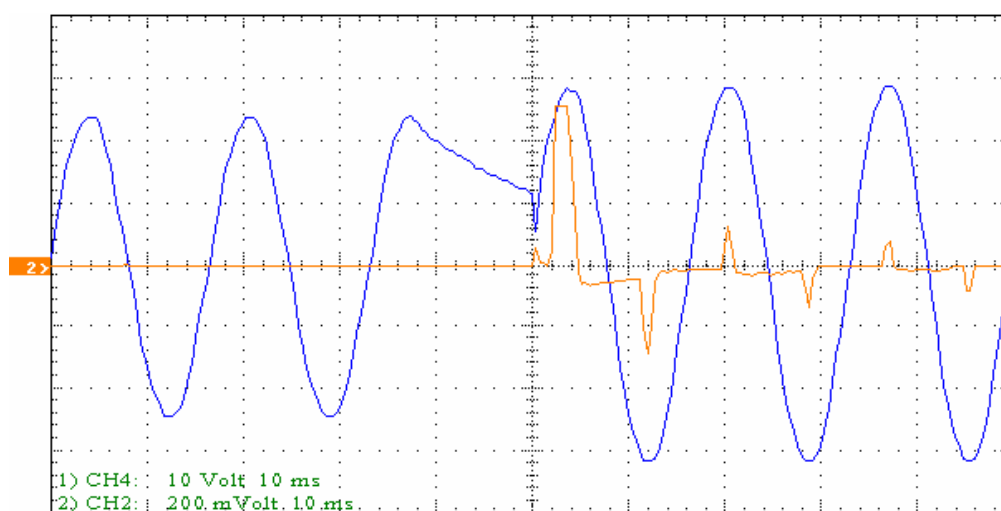
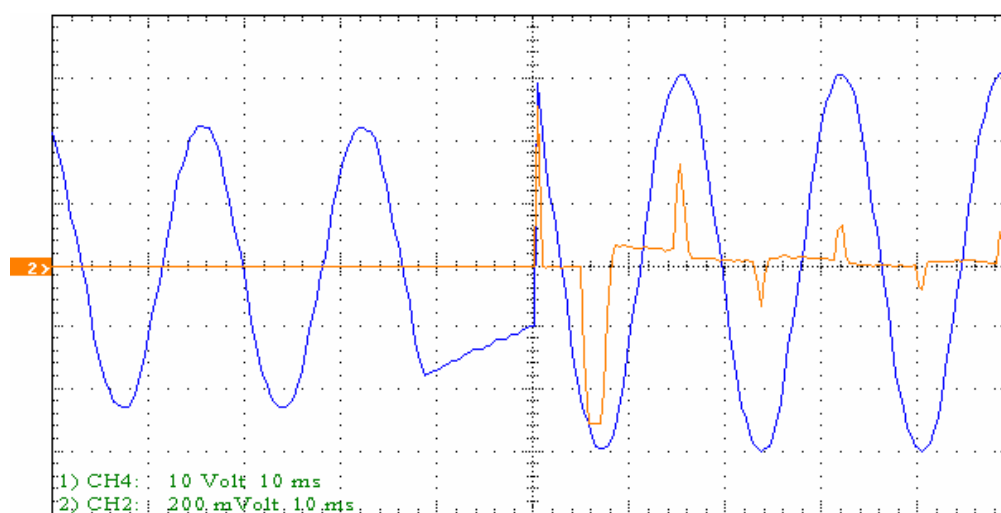
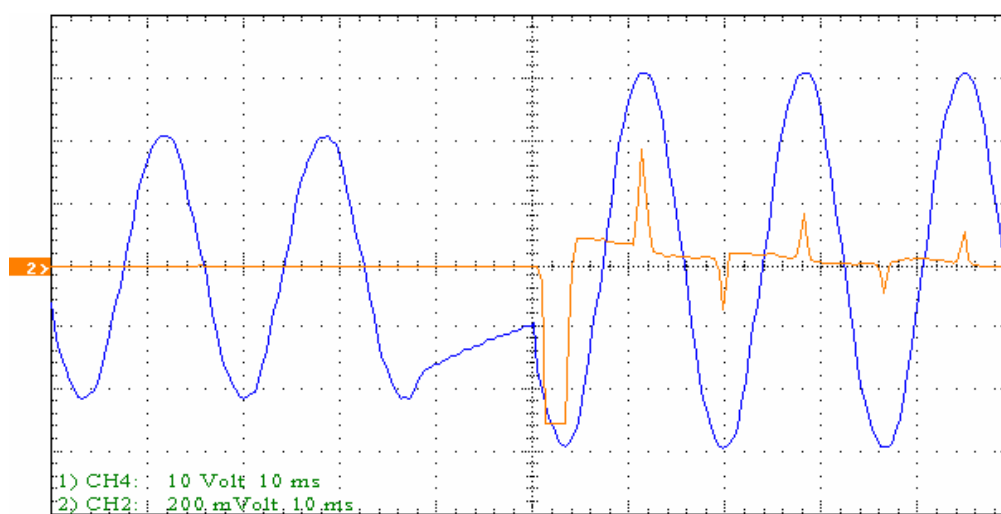


Figura 4.9 - Elevação da tensão em 15%.

**Figura 4.10** - Elevação de tensão em 20%.**Figura 4.11** - Elevação da tensão em 25%.**Figura 4.12** - Elevação da tensão em 30%.

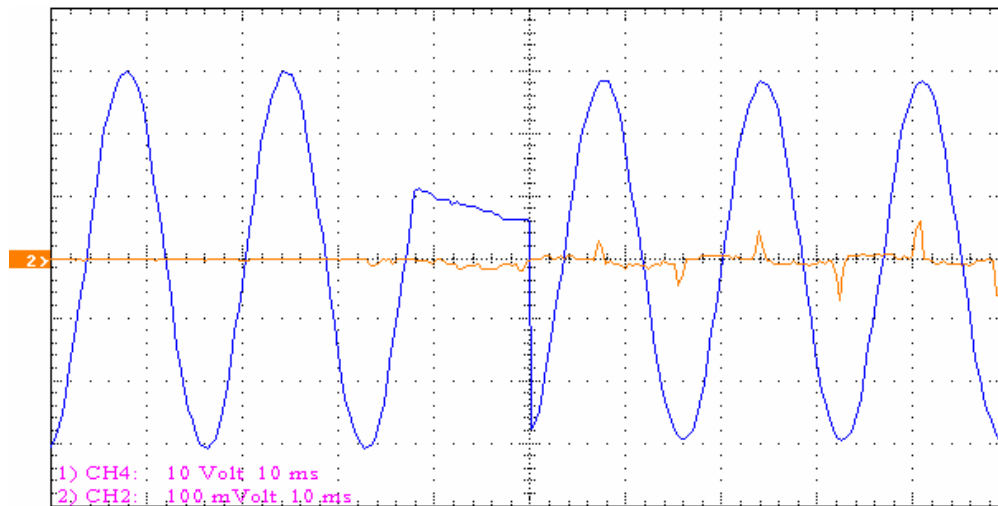


Figura 4.13 - Abaixamento da tensão em 5%.

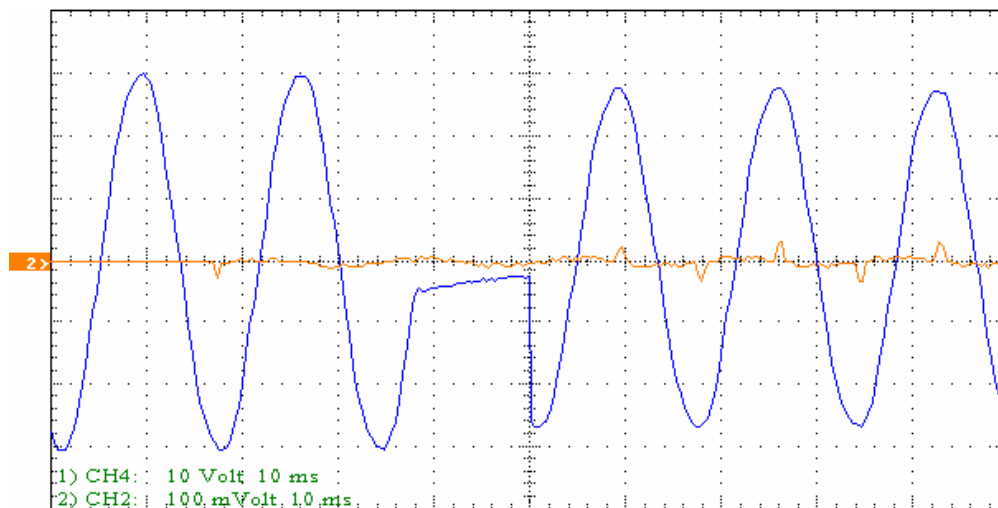


Figura 4.14 - Abaixamento da tensão em 10%.

c) Terceiro Ensaio: 01 Computador (Desktop)

Neste ensaio, além das grandezas medidas nos experimentos anteriores, coletou-se a corrente drenada pela carga antes do procedimento de correção, ou seja, através do tap central. Isto foi feito para mostrar que após a comutação de tap há uma troca efetiva de caminho no circuito que alimenta a carga. Em outras palavras, a atuação do tap central é substituída pela de um tap regulador. Assim, para as figuras subseqüentes,

o sinal em azul corresponde à tensão na carga e os sinais em laranja e verde correspondem, respectivamente, à corrente no tap central e à corrente no tap regulador.

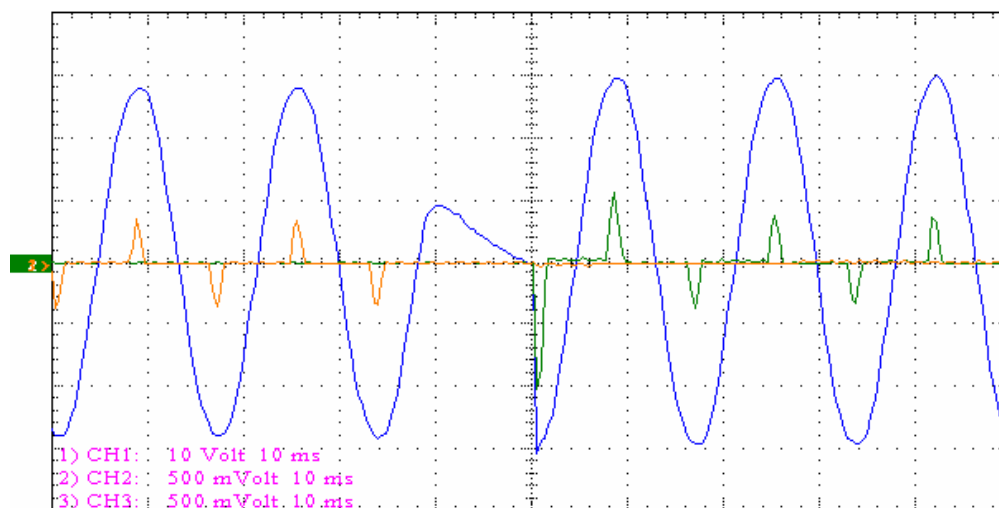


Figura 4.15 - Elevação da tensão em 5%.

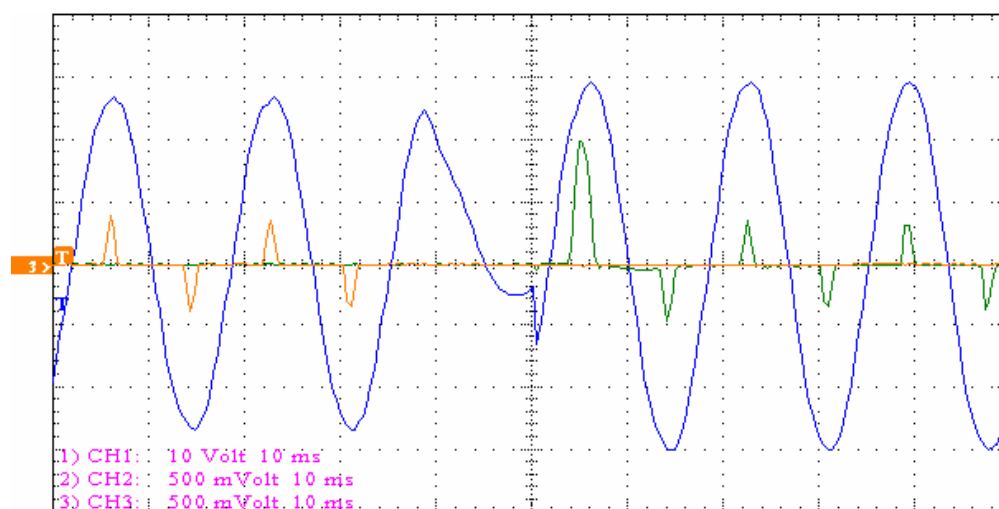


Figura 4.16 - Elevação da tensão em 10%.

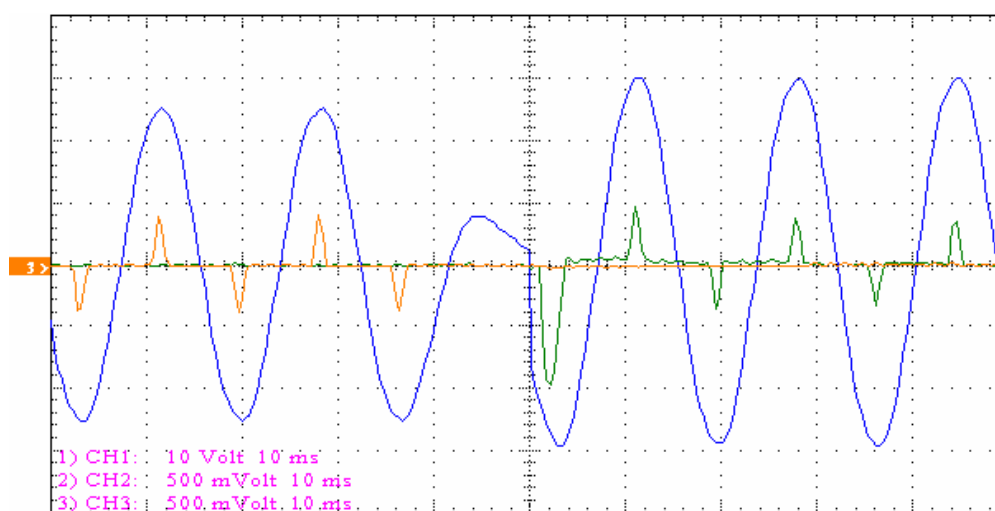


Figura 4.17 - Elevação da tensão em 15%.

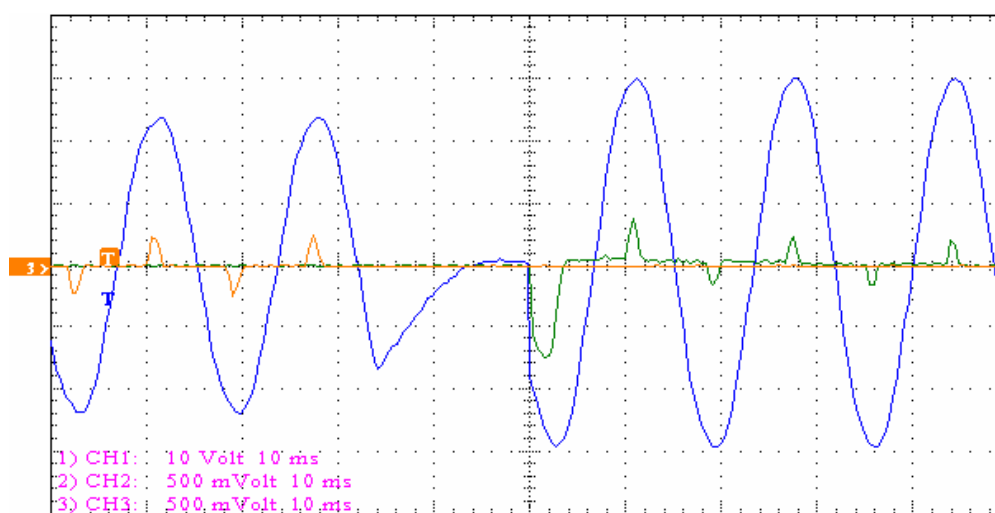


Figura 4.18 - Elevação da tensão em 20%.

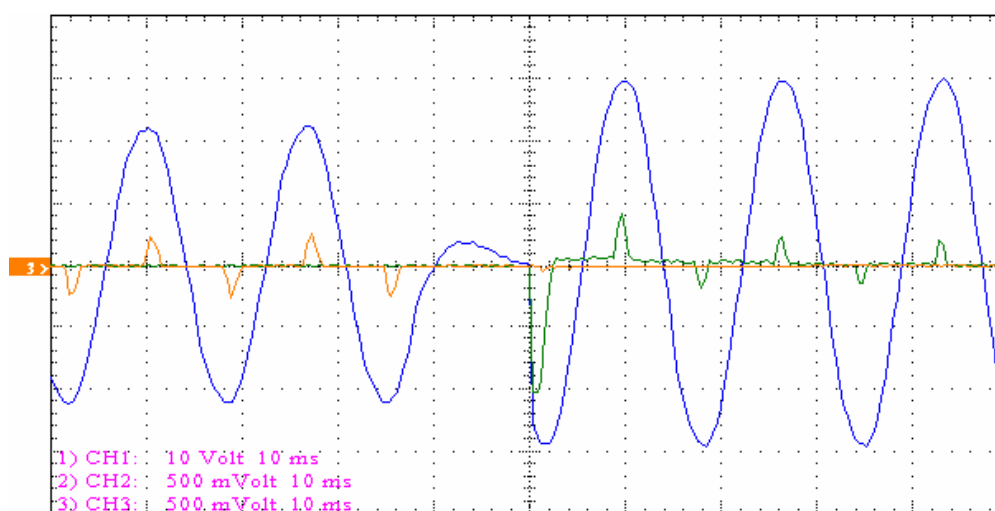


Figura 4.19 - Elevação da tensão em 25%.

d) Quarto Ensaio: 01 Motor de Indução Monofásico

Para a medição mostrada na figura a seguir, empregou-se um motor de indução monofásico como carga, para o qual se tem as seguintes características:

- Fabricante: Kohlbach (modelo P56);
- Dados de placa:
 - CV: 1,0
 - V: 110/220;
 - A: 15/7,5
 - RPM: 3480;
 - Isol.: B;
 - Hz: 60

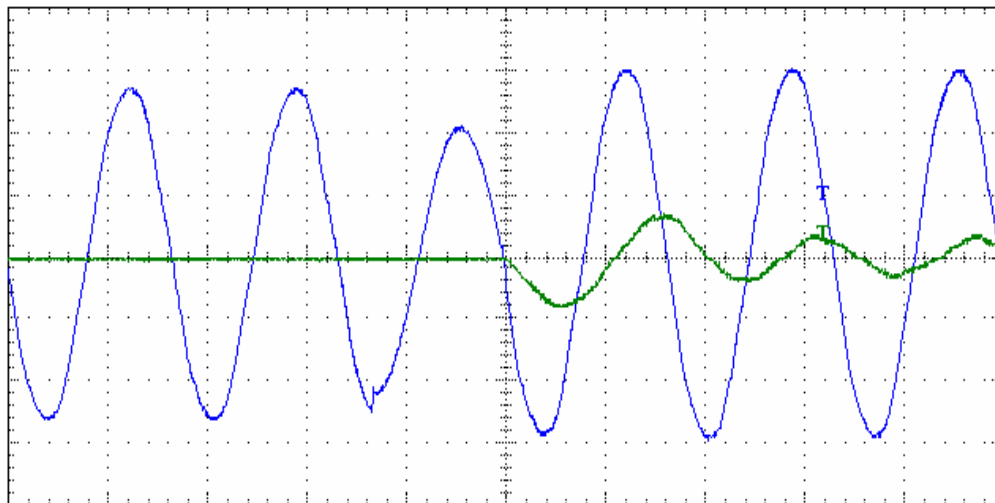


Figura 4.20 - Elevação da tensão em 10%.

Para esta situação, tem-se a tensão (azul) e a corrente (verde) no tap de regulação, ambas coletadas sobre a carga, ressaltando ainda que foi aplicado neste ensaio a busca por zeros de tensão da fonte, além da contagem de zeros de corrente.

Este resultado se mostra significativo para a questão da continuidade da tensão aplicada à carga. Isto é, a força contra eletromotriz é capaz de manter durante certo período uma diferença de potencial suficiente para garantir a operação do sistema.

4.2.2- ENSAIO DE AVALIAÇÃO DA COMUTAÇÃO

Diferentemente da primeira bateria de ensaios, o princípio de re-inserção em zeros da tensão corrigida sobre a carga será sempre considerado de agora em diante. Vale ressaltar ainda que, nesta segunda etapa, o tempo de confirmação do comando de comutação de tap recebido do módulo de leitura RMS pelo decisório é de meio ciclo.

O gráfico da figura 4.21 ilustra o desligamento de uma chave condutora e o acionamento de uma outra com variação da tensão em 20% tendo um computador convencional (*desktop*) como carga. Mostra-se aqui o detalhe do período de desligamento da tensão da carga (laranja) em relação à fonte da HP (azul). Como é possível perceber, após o corte efetuado o novo tap foi acionado com grande precisão em relação ao zero da tensão de fornecimento (HP), corroborando com o êxito da metodologia de busca de zeros. A base de tempo é de 10 ms.

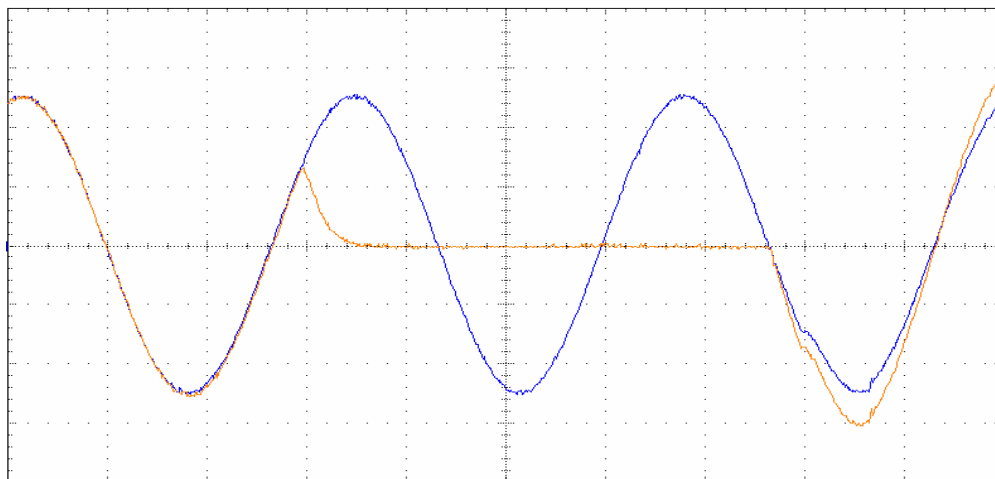


Figura 4.21 - Detalhe do corte da tensão na carga e posterior re-inserção em zero.

Os resultados apresentados na seqüência condizem com a aplicação integral de toda a metodologia de controle apresentada no capítulo 3 (situação que também será verificada no item 1.2.3). A composição de carga é dada entre um freezer, um computador e duas lâmpadas em série. Há ainda a inserção, no segundo caso, de um banco de capacitores de 10 μF em paralelo, utilizado para conferir um caráter mais capacitivo à mesma. Em ambas as figuras, tem-se a tensão da fonte em laranja, a tensão da carga em azul, a corrente no tap central em vermelho e a corrente no tap regulador em verde. A escala de tempo é de 10 ms e a tensão nominal é de 220 V_{RMS}.

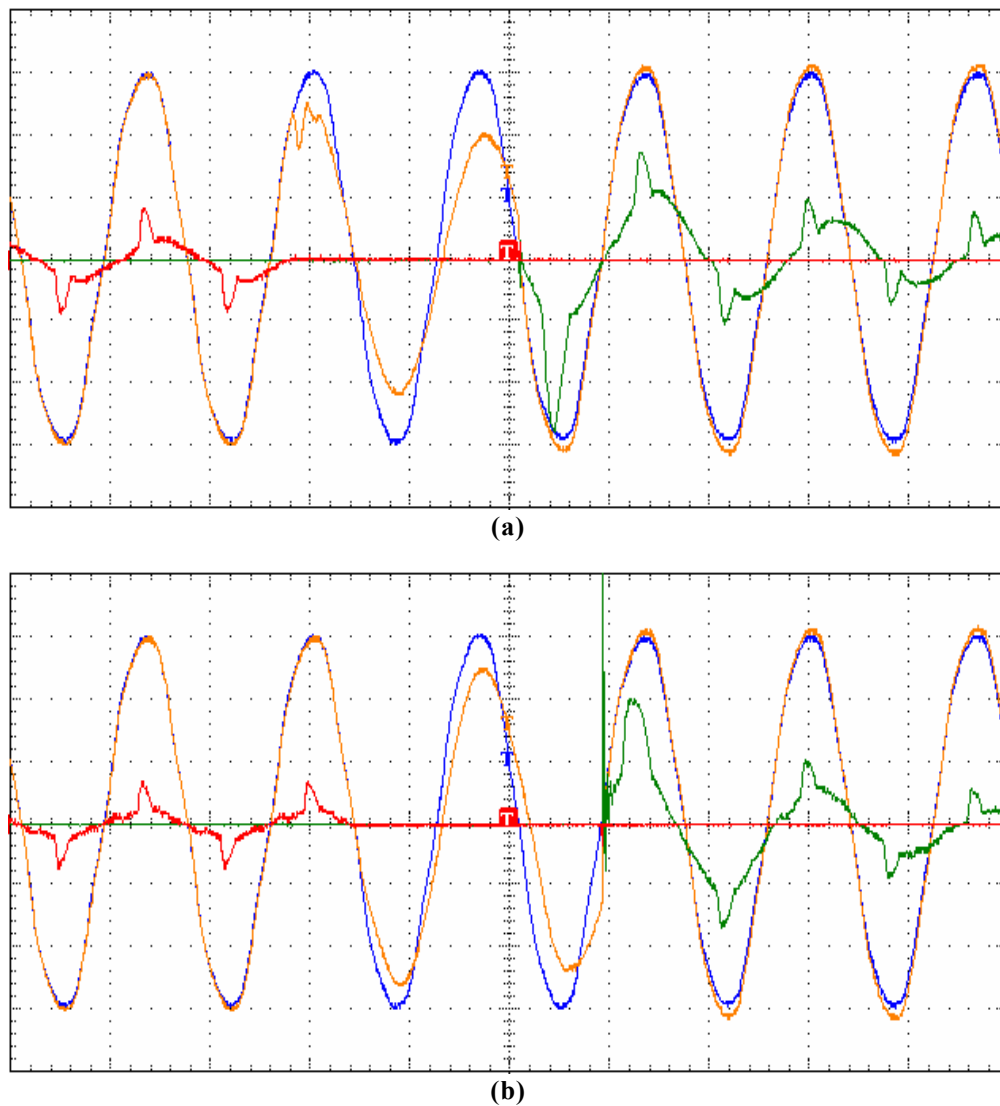


Figura 4.22 – Elevação de tensão em 5%.

- (a) Sem banco de capacitores;
- (b) Com banco de capacitores.

4.2.3- ENSAIO DE AVALIAÇÃO DA TENSÃO RMS

Além das avaliações sobre as formas de onda das tensões e correntes pertinentes ao sistema de testes, serão considerados a partir de agora os comportamentos das tensões RMS da fonte e da carga, de modo a propiciar uma noção ainda mais clara sobre o impacto da atuação do RT eletrônico mediante *sags* e *swells* com tempo de duração fixado em 200 ms (12 ciclos da rede elétrica). Contudo, diferentemente do caso anterior, o tempo de confirmação do comando de comutação recebido do módulo de leitura RMS pelo decisório é agora de um ciclo. E este tempo pode ser verificado durante a efetivação da regulação por parte do controle eletrônico nos gráficos mostrados a seguir, para os quais se têm a tensão na fonte em azul, a tensão na carga em laranja e a corrente na carga (medida não nos taps, mas diretamente sobre ela) em verde. Vale salientar ainda que a tensão RMS da fonte foi obtida com base nas leituras armazenadas em disco pelo software de aquisição mostrado na figura 3.19 do capítulo anterior, enquanto que o valor RMS da tensão na carga foi estimado a partir dos dados oscilografados.

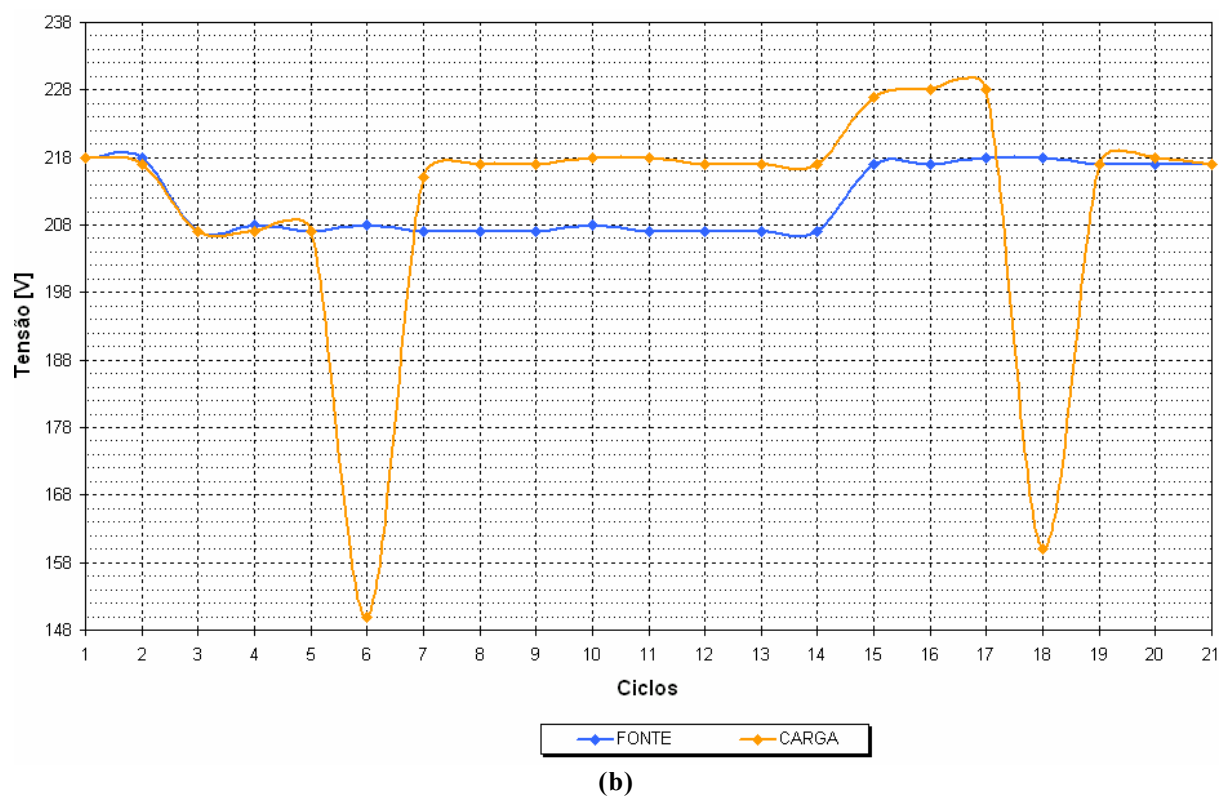
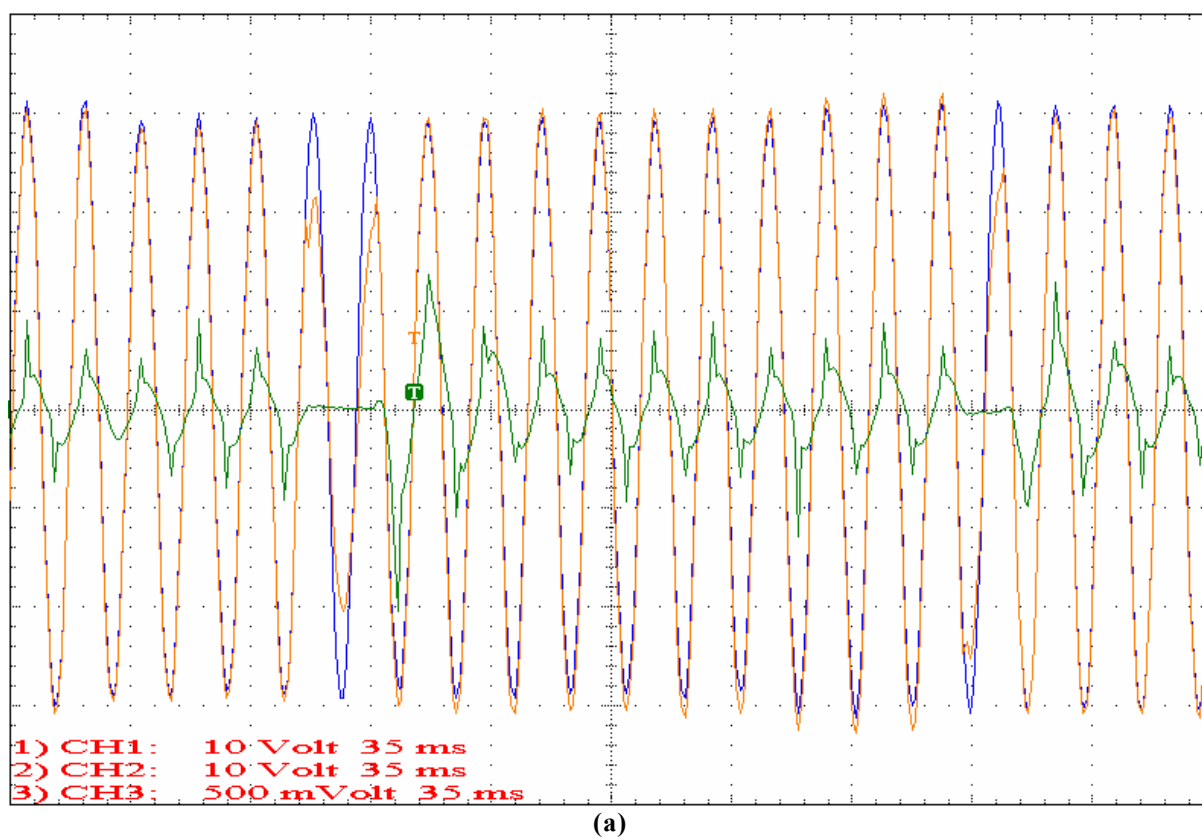


Figura 4.23 – Elevação de tensão em 5%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

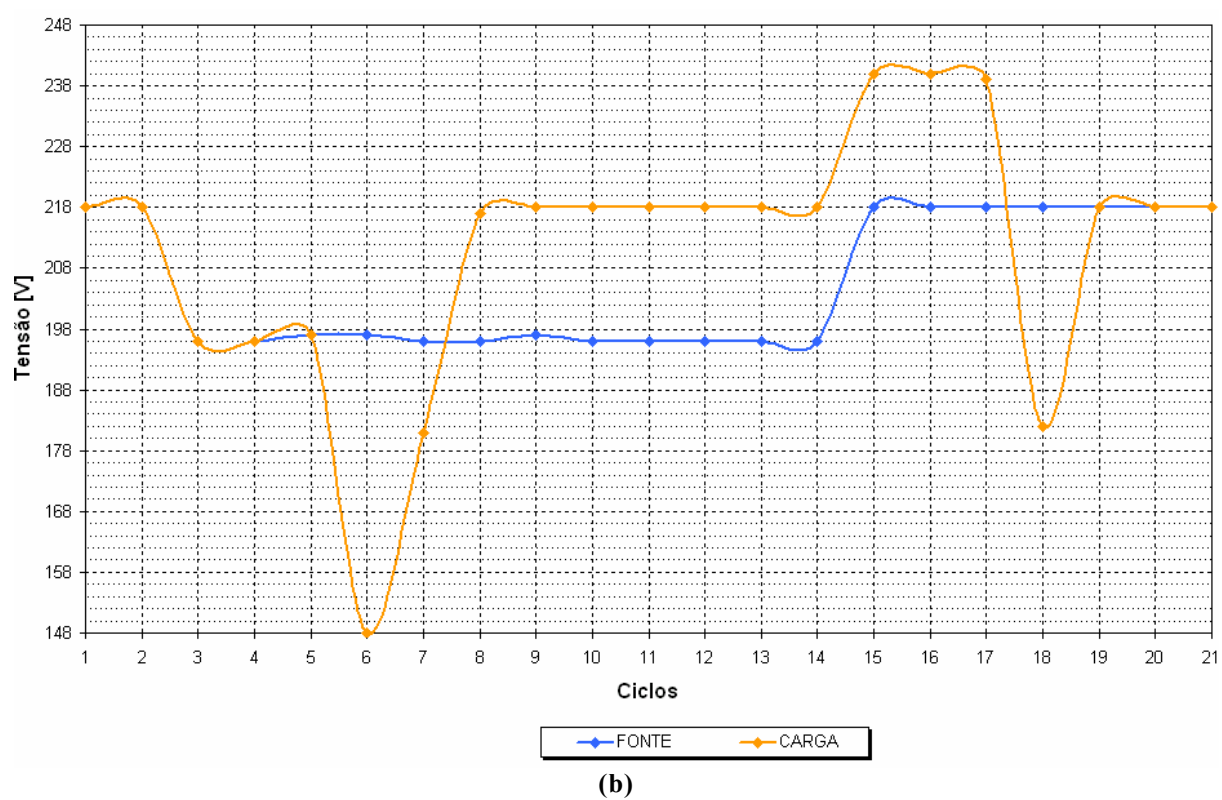
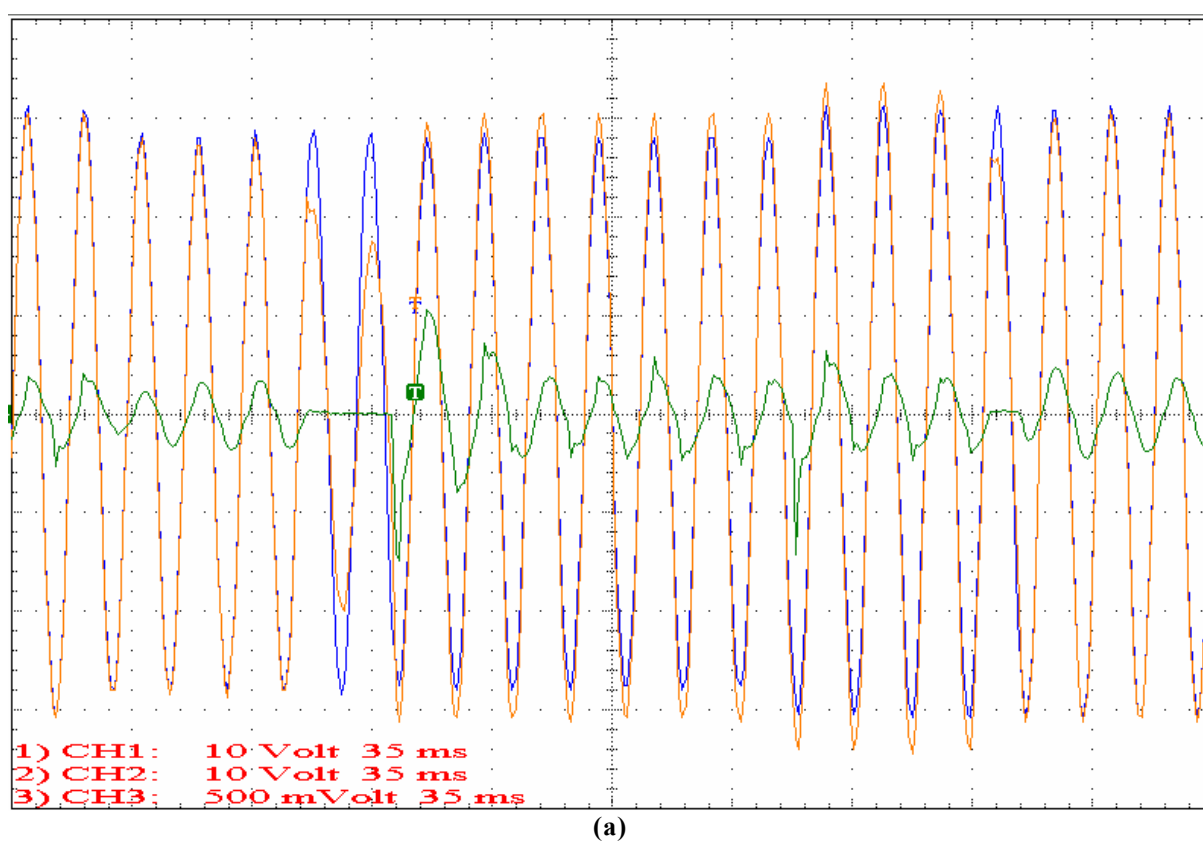


Figura 4.24 – Elevação de tensão em 10%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

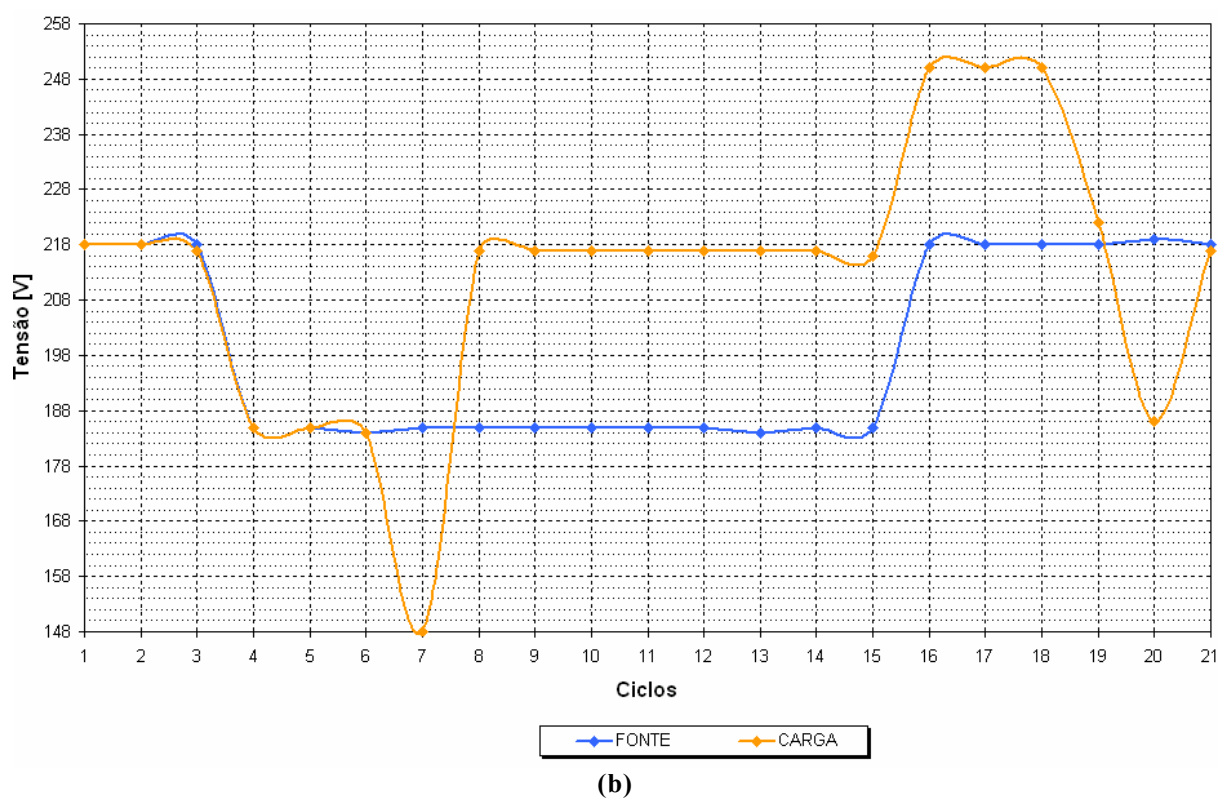
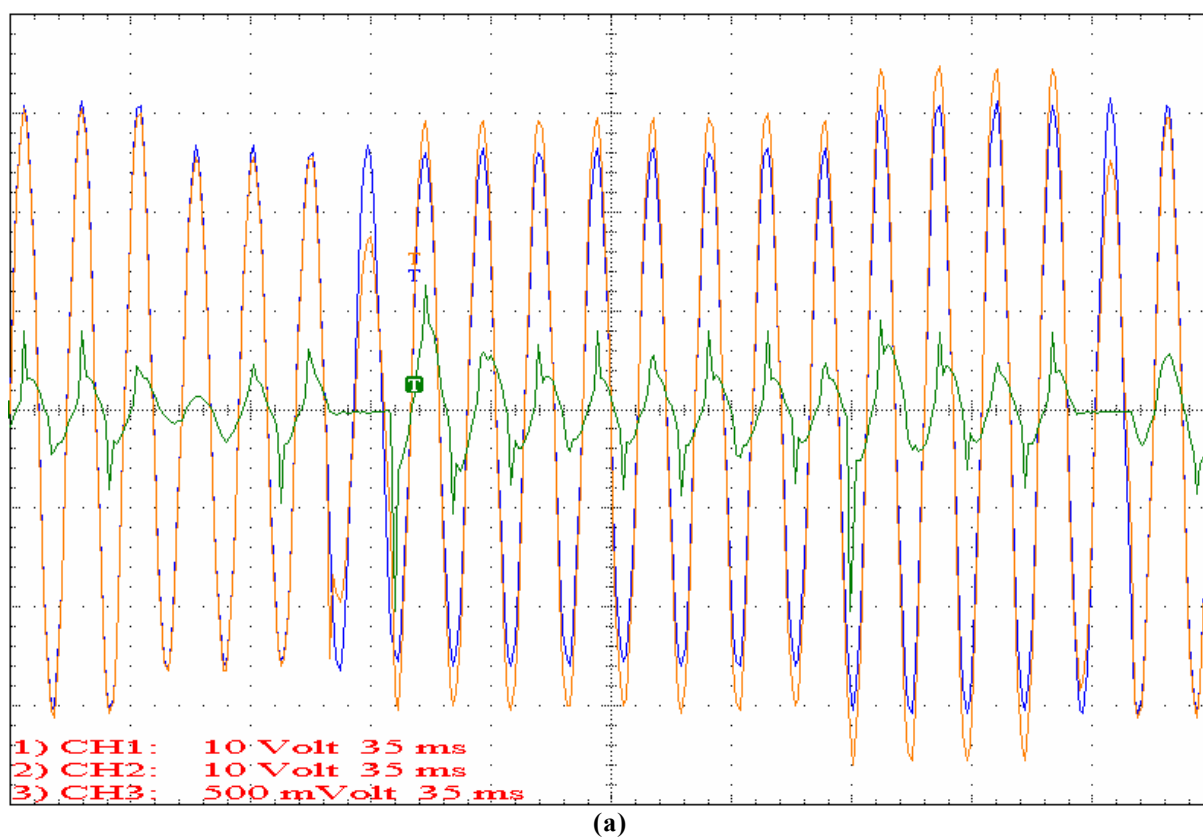


Figura 4.25 – Elevação de tensão em 15%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

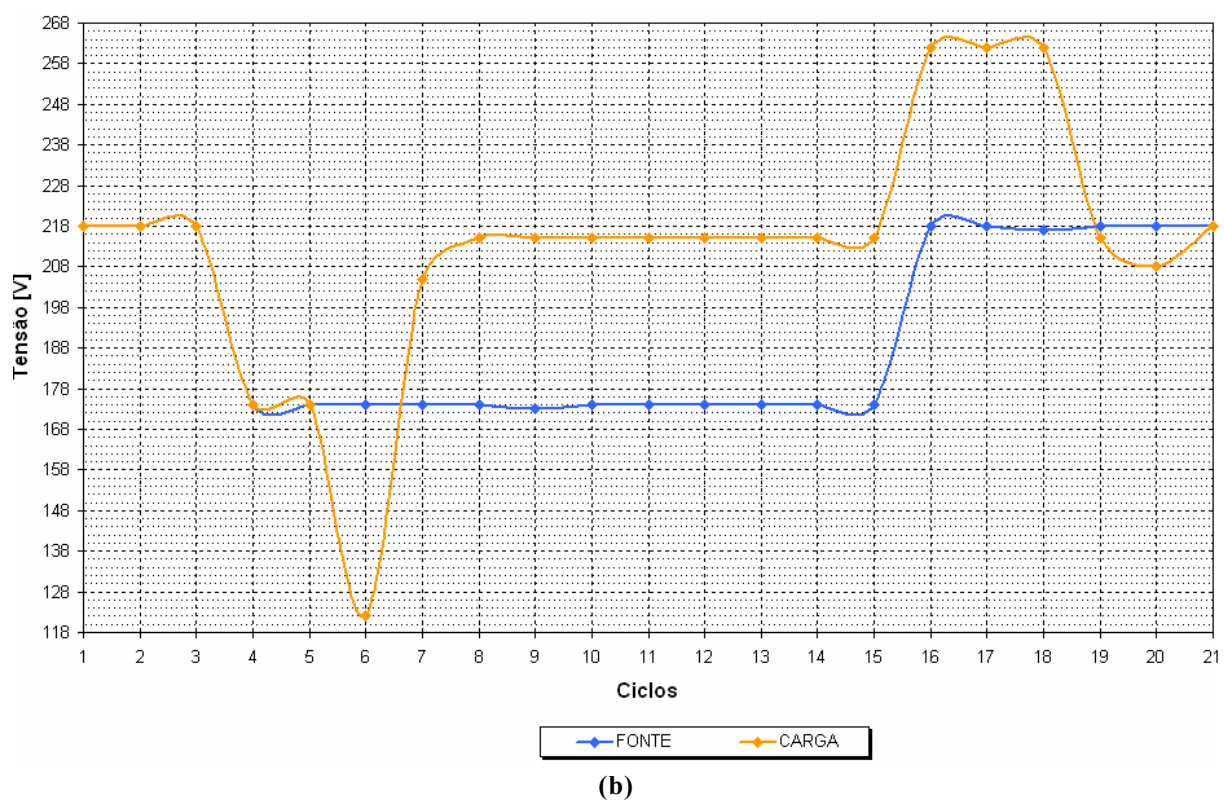
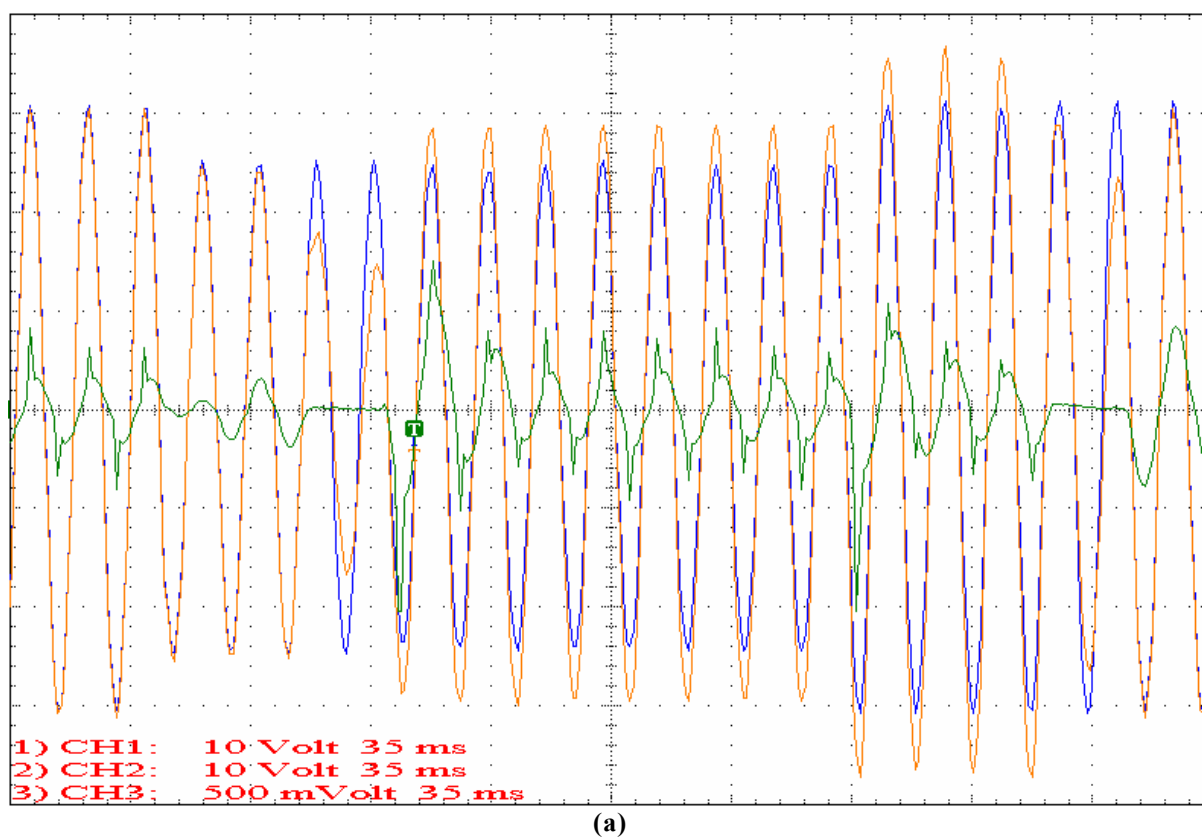


Figura 4.26 – Elevação de tensão em 20%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

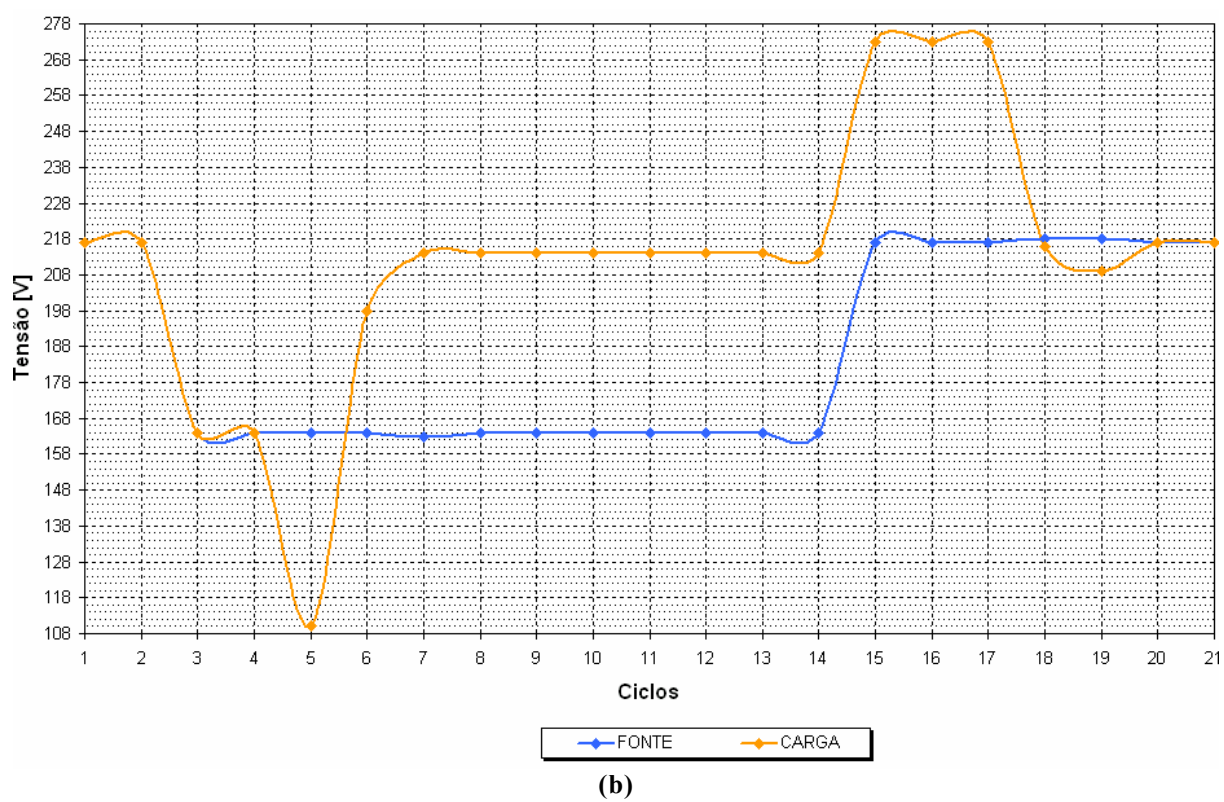
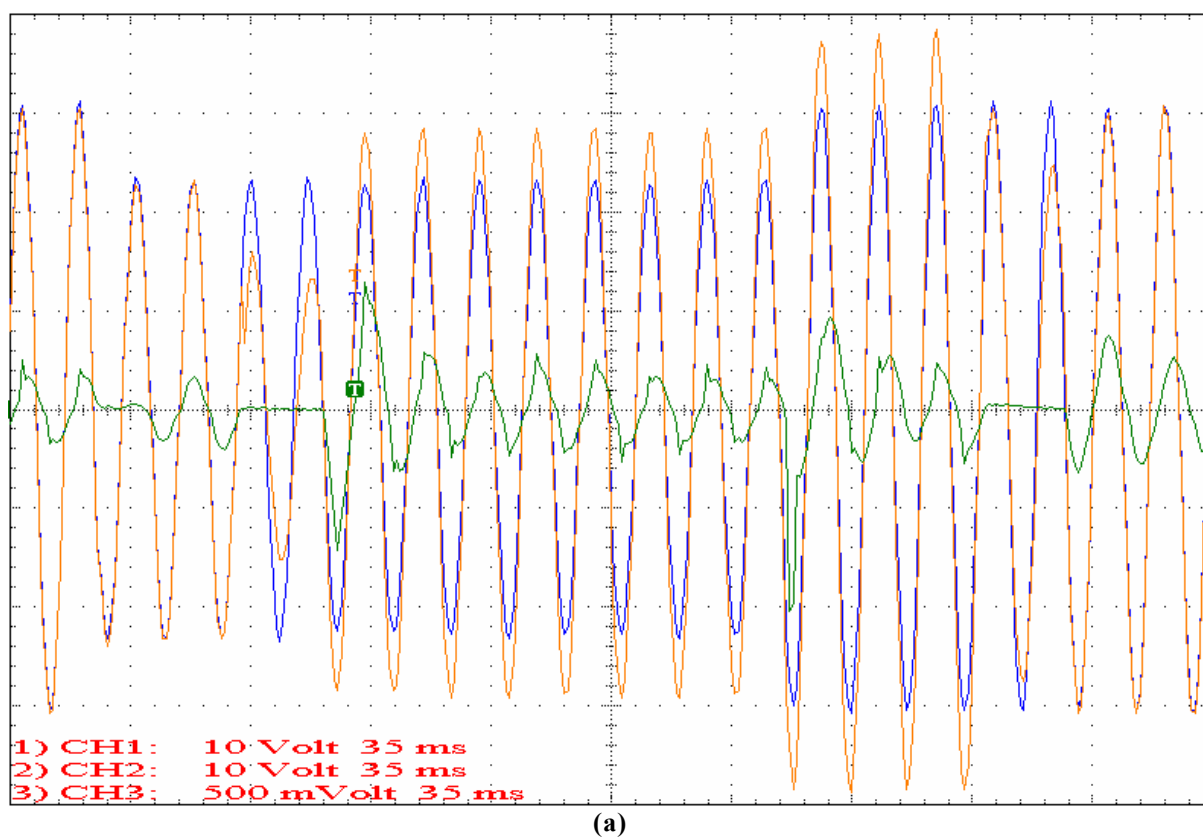


Figura 4.27 – Elevação de tensão em 25%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

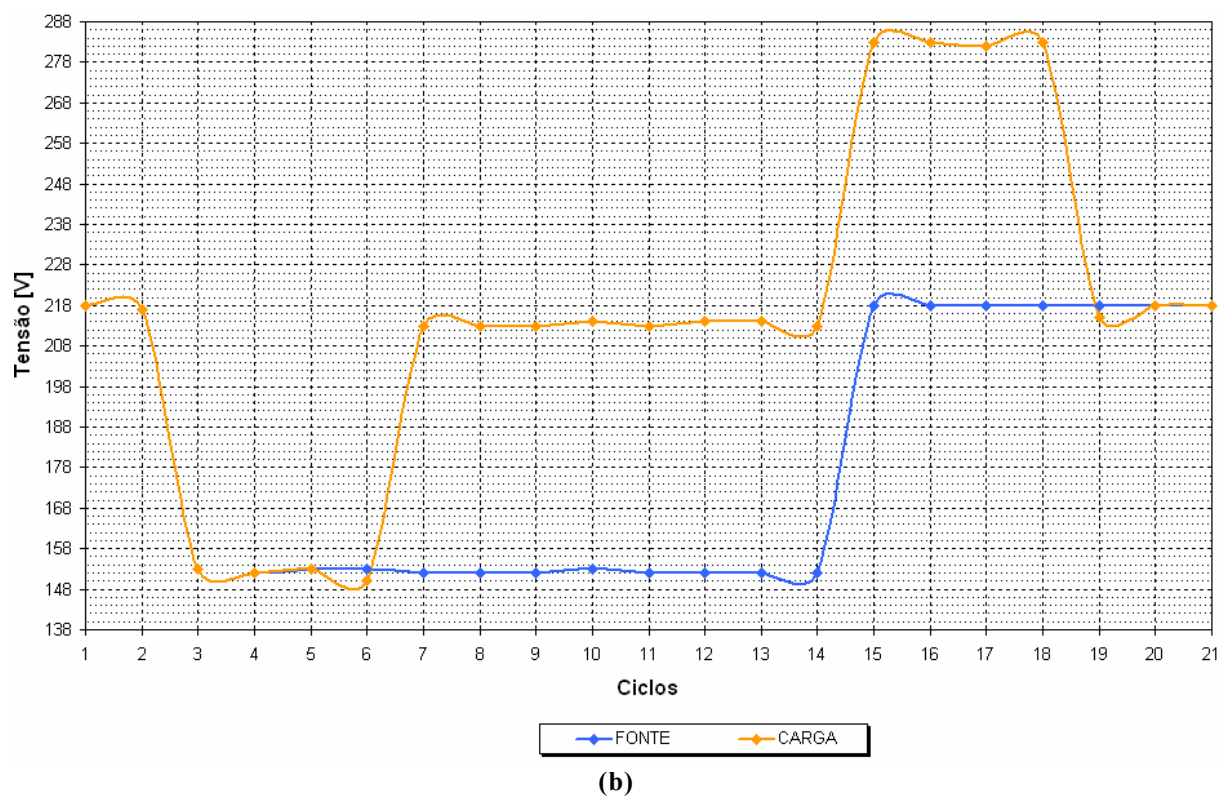
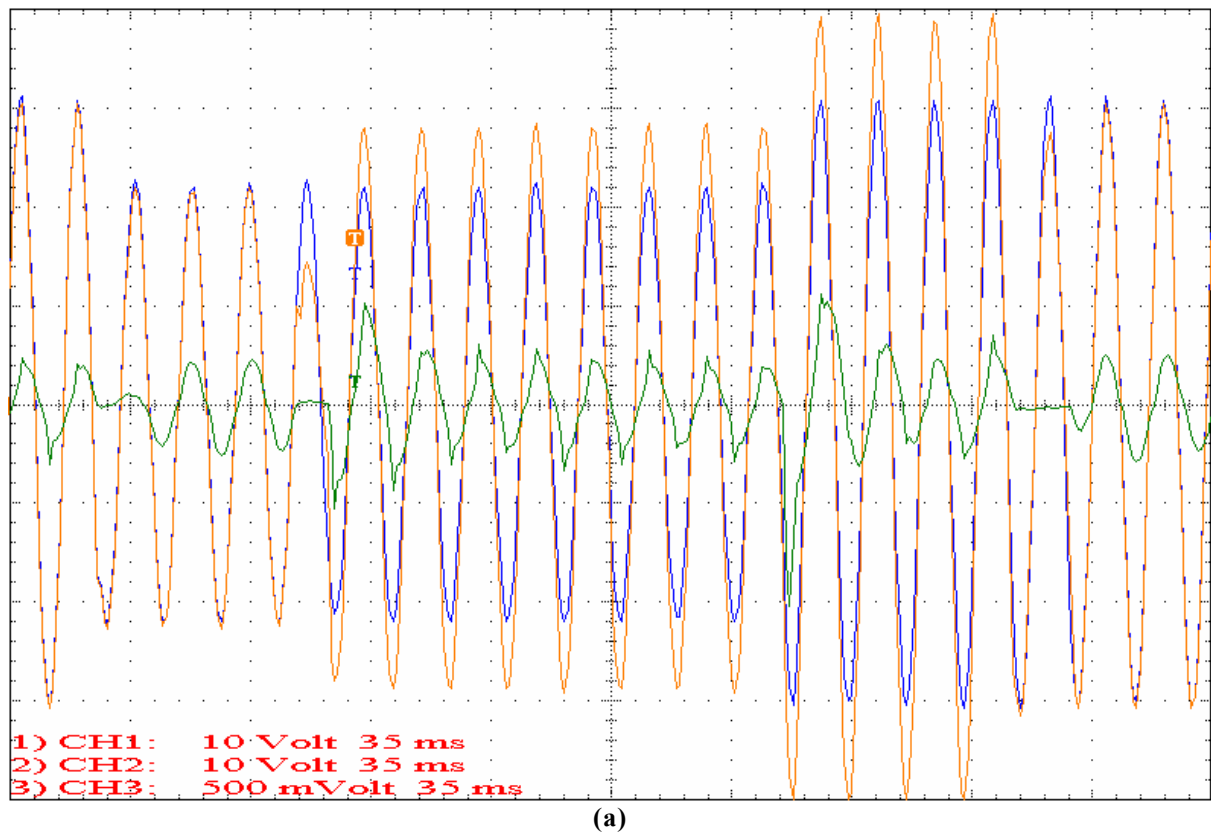


Figura 4.28 – Elevação de tensão em 30%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

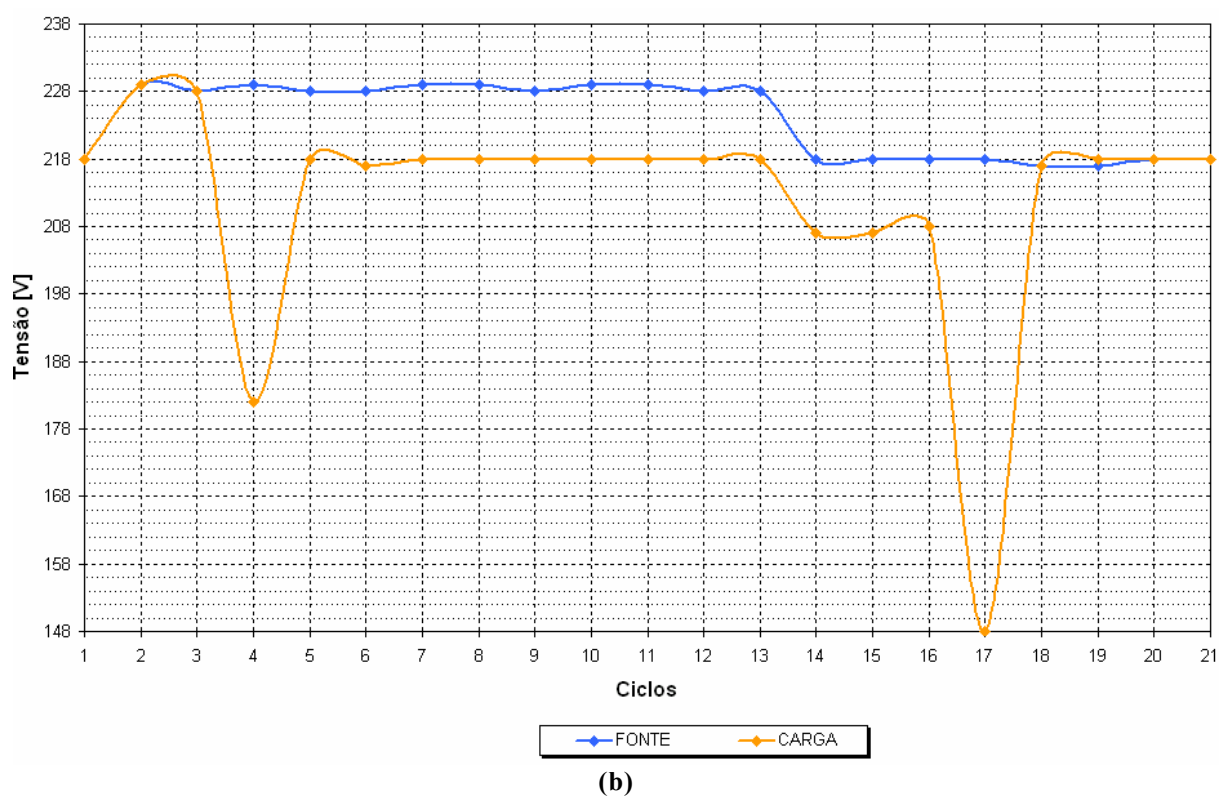
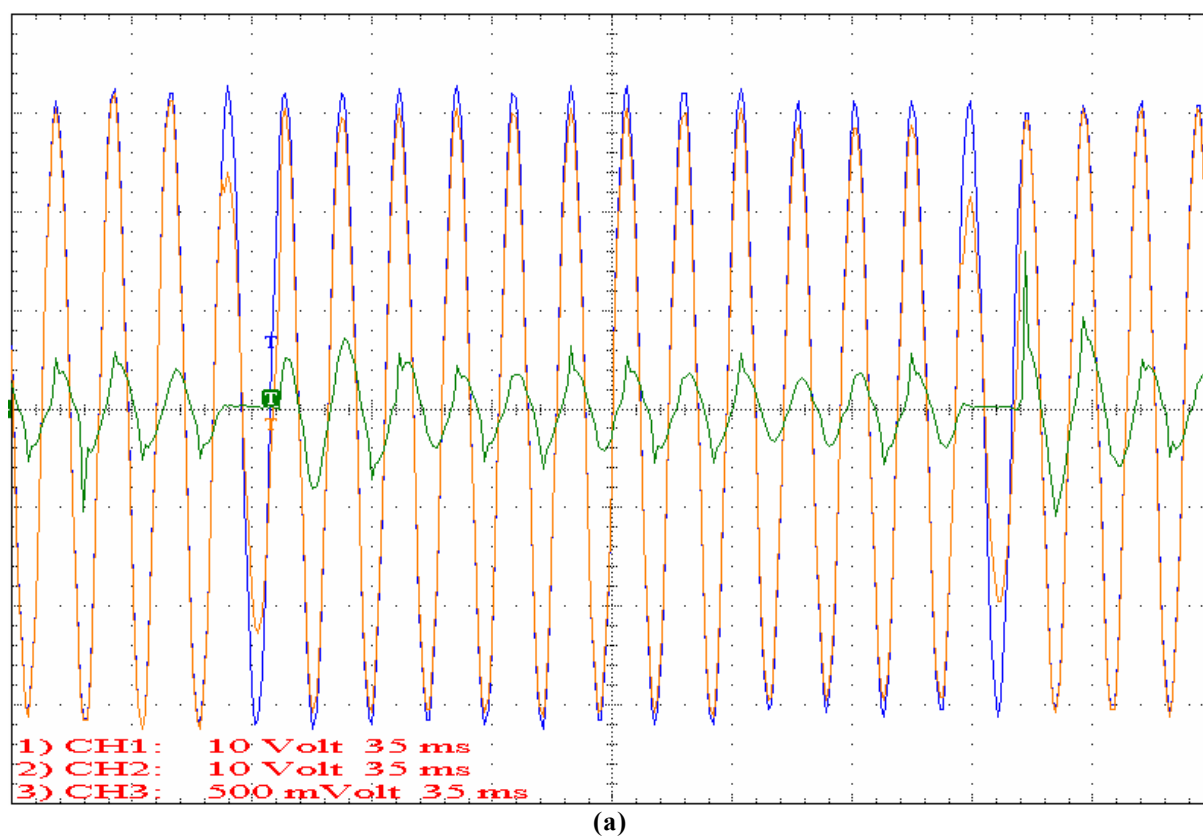


Figura 4.29 – Abaixamento de tensão em 5%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

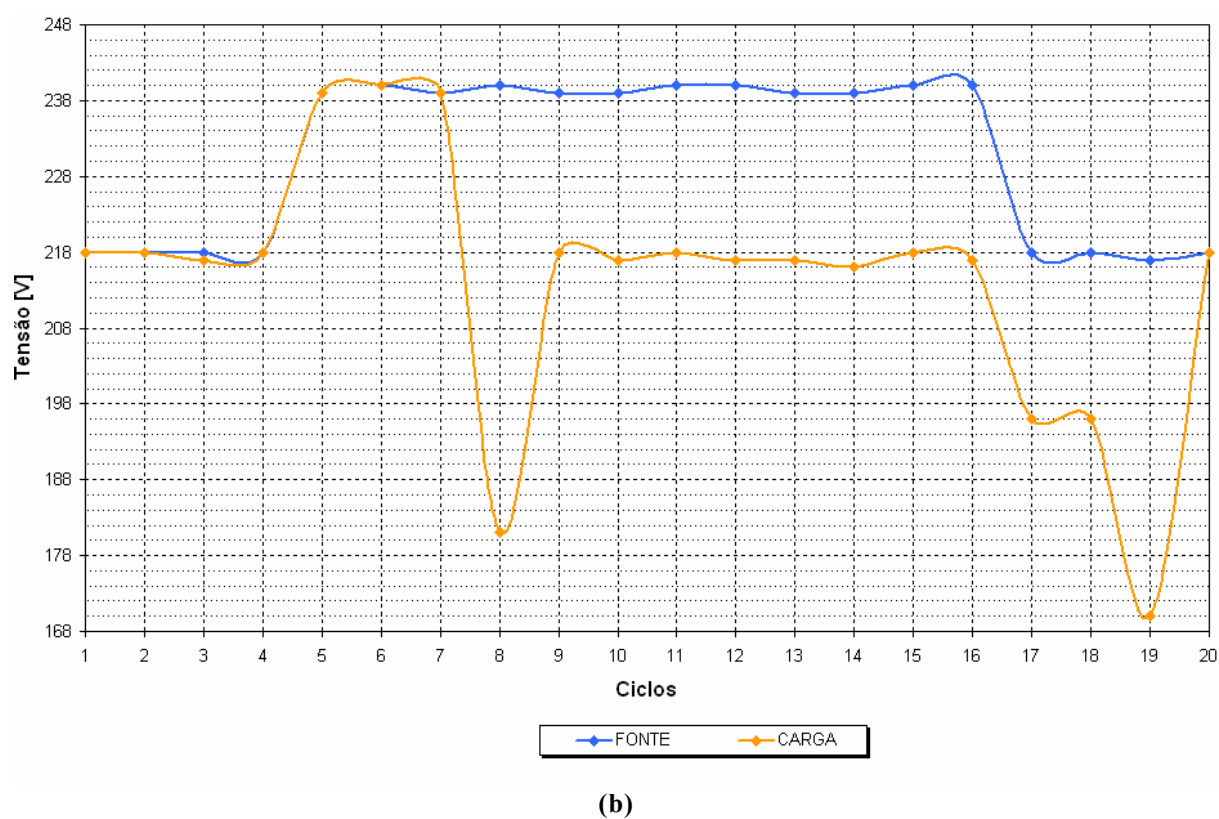
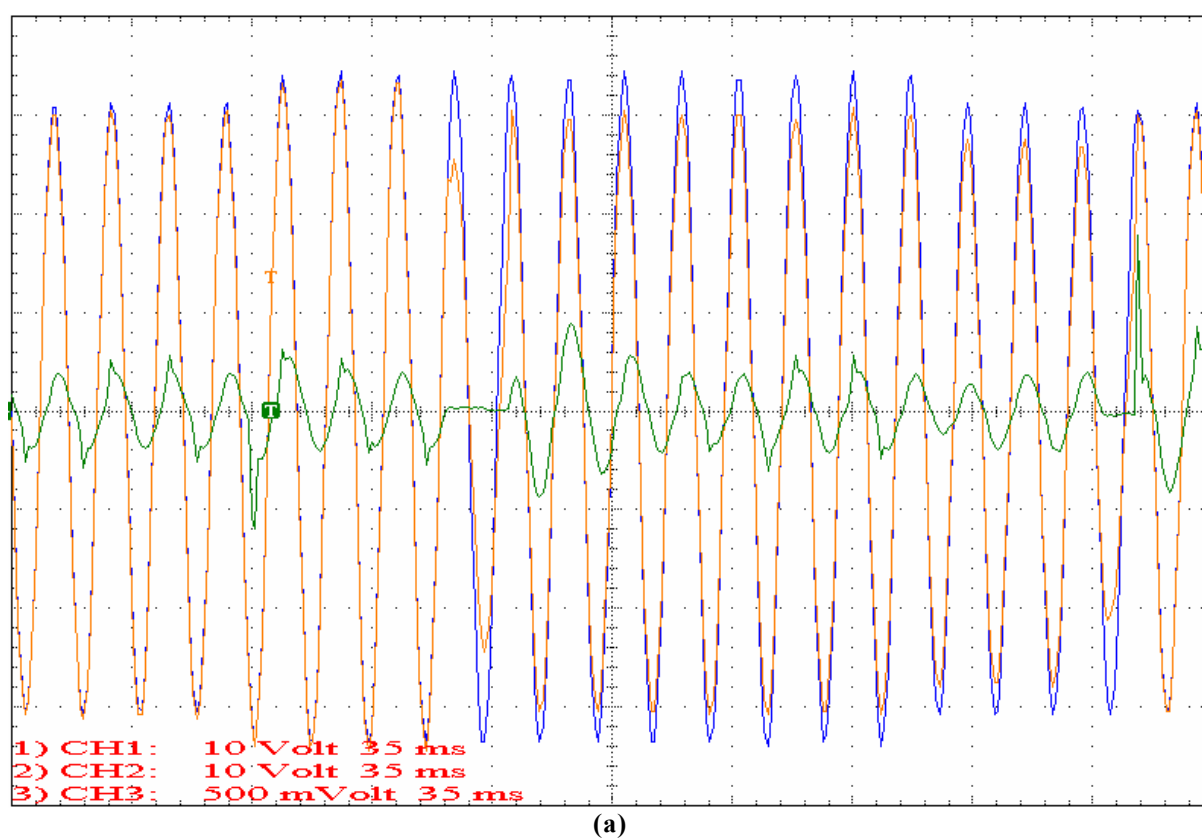


Figura 4.30 – Abaixamento de tensão em 10%.

(a) Formas de onda;

(b) Valores RMS.

Antes e durante os ciclos iniciais do fenômeno de variação da tensão o tap central é o responsável por manter a carga em operação. Esta situação se modifica logo após o primeiro procedimento de regulação, fazendo com que o tap central seja substituído pelo tap de regulação adequado. Entretanto, quando a tensão da fonte retorna ao seu valor nominal há uma variação oposta sobre alimentação da carga, exatamente no mesmo percentual do estágio regulador, obrigando o RT a proceder ao re-ingresso do tap central em detrimento do anterior. Como visto, esta operação pode durar de três a quatro ciclos.

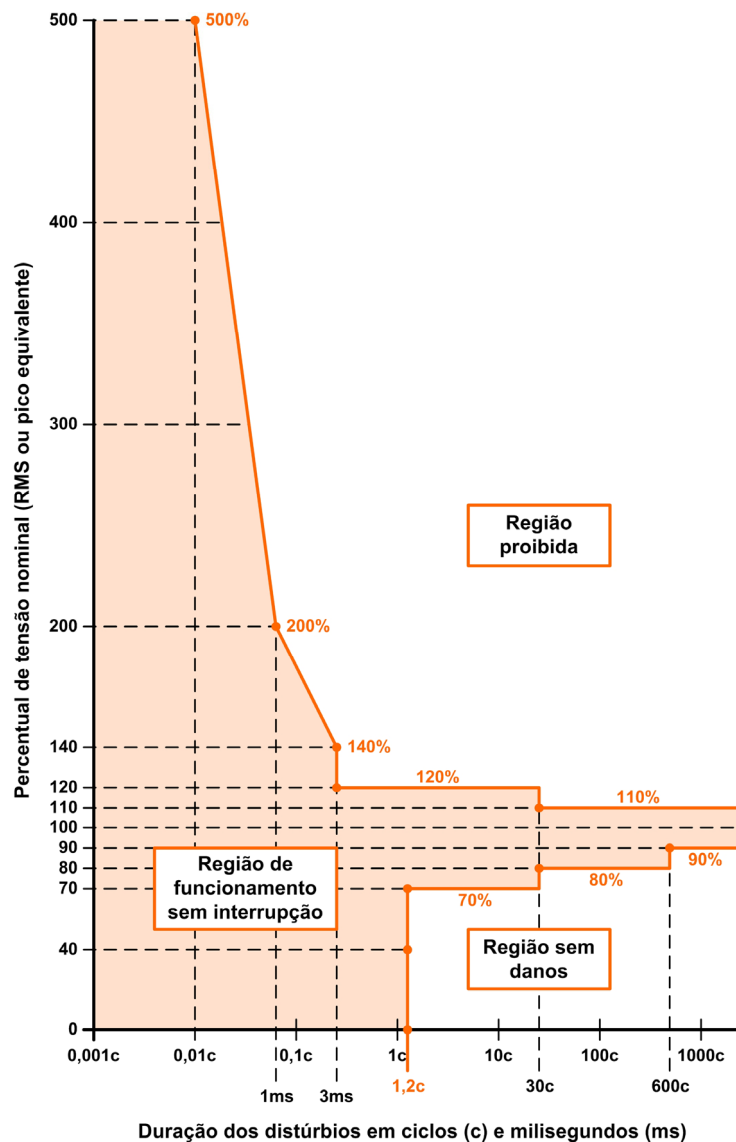


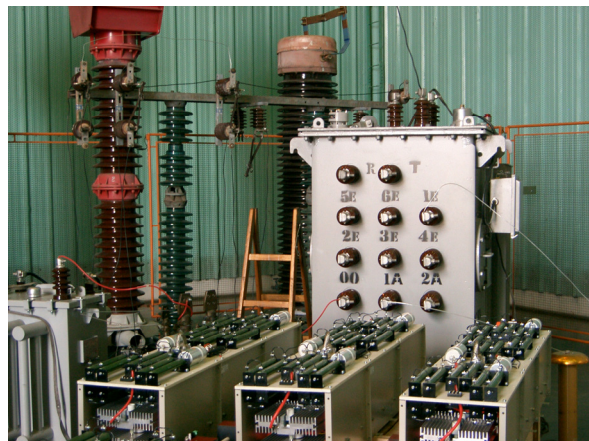
Figura 4.31 - Curva ITIC.

A curva ITIC mostrada na figura 4.31 (anterior) determina os períodos médios de duração das variações percentuais de tensão suportadas por diversos tipos de cargas sensíveis. Relacionando este gráfico com as taxas de regulação do RT eletrônico é possível observar que, para os casos de elevação da tensão, somente nas variações de 25 e 30% sobre o valor nominal da mesma o procedimento de re-ingresso do tap central fere o tempo máximo de suportabilidade proposto. Deve-se salientar, todavia, que o mesmo não ocorre durante a inserção do tap regulador, posto que a recomendação gráfica foi prontamente atendida em todos as situações de regulação. Nos casos de abaixamento da tensão, não houve qualquer tipo de divergência entre a ação do regulador e os limites temporais do gráfico, tanto no ingresso do tap de regulação quanto no re-ingresso do tap central.

Atualmente, estudos vêm sendo desenvolvidos pelo núcleo de Qualidade de Energia da Universidade Federal de Uberlândia no sentido de comprovar que a suportabilidade de diversas cargas, em especial as utilizadas nos ensaios aqui propostos, superam os limites impostos pela curva ITIC. Deste modo, eletrodomésticos e eletro-eletrônicos estão sendo submetidos a sobretensões e afundamentos de elevada amplitude, a fim de que um documento formal possa ser elaborado e divulgado à comunidade acadêmica de interesse. Independentemente disto, a análise dos gráficos de formas de onda das figuras 4.27 e 4.28 revela que não houve queima dos equipamentos utilizados no ensaio, posto que a alimentação dos mesmos (tensão e corrente) foi mantida após o re-ingresso do tap central.

4.3- ENSAIOS EM MÉDIA TENSÃO (MT)

Para que o RT com controle eletrônico inteligente pudesse ser avaliado mediante tensões e correntes elevadas, impraticáveis na estrutura laboratorial da UFU, o Laboratório de Alta Tensão do LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) foi contratado pelo projeto de pesquisa e desenvolvimento firmado entre a Elektro Eletricidade e Serviços S.A., a Toshiba do Brasil S.A. e a Universidade Federal de Uberlândia. As figuras 4.32(a) e (b) apresentam, respectivamente, a montagem elaborada para os testes em média tensão com e sem carga (reator).



(a)



(b)

Figura 4.32 – Estrutura montada para os ensaios em média tensão.

- (a) Com carga;
(b) Sem carga.

Neste sentido, alguns ensaios foram propostos e realizados de 23 a 27 de outubro de 2006 com o objetivo de validar o modelo de regulador de tensão proposto. Os testes desenvolvidos submeteram o sistema a tensões em torno de 4 kV e 5 kV, visando checar os percentuais de tensão nos taps reguladores e as correntes drenadas pela carga através do tap 2A. Saliente-se ainda que, em operação de abertura e fechamento do mesmo tap, a corrente chegou a atingir o patamar de 200 A.

4.4- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios apresentados revelaram o comportamento satisfatório do RT com controle eletrônico inteligente mediante a proposta de rápida regulação da tensão sem prejuízo ou comprometimento das cargas mantidas pelo sistema de distribuição. O baixo nível de transitórios e distorções durante as operações de comutação de taps revelou o êxito dos princípios de checagem de zeros de corrente e correção em zeros de tensão no referente à manutenção da qualidade do fornecimento durante a eliminação dos VTCD's.

Como evidenciaram os ensaios de BT, logo após a incidência de um dado afundamento de tensão sobre o suprimento da carga, uma sobretensão indesejada é imposta à mesma, permanecendo vigorante até que o controle eletrônico atue mais uma vez, ou seja, após três ou quatro ciclos da rede elétrica. Apesar deste fato não comprometer a idoneidade dos princípios então propostos, estudos já estão sendo realizados no sentido de que a tensão no primário do TP seja coletada junto à carga ao invés da fonte. Esta decisão pode eliminar o “efeito colateral” exposto, porém deverá ocasionar algumas reformulações na lógica operacional do controle eletrônico.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Apesar das considerações de fechamento apresentadas em cada um dos capítulos anteriores, serão reunidas aqui as informações de maior relevância que foram tratadas ao longo desta dissertação, de modo a perfazer uma síntese geral sobre o RT no contexto da regulação de tensão. Foram destacadas, sobretudo, as características do controle eletrônico que fazem do regulador em questão um equipamento inteligente, além de alguns pontos de avanço para desenvolvimentos futuros.

O capítulo I apresentou uma introdução sobre o universo de regulação da tensão, ressaltando dois dos problemas na qualidade da energia entregue aos consumidores (*voltage sags* e *voltage swells*) e algumas das soluções que vêm sendo apresentadas ao longo dos anos no Brasil e no mundo, incluindo, obviamente, o regulador de tensão com controle eletrônico inteligente (CEI). A abordagem feita sobre o uso ascendente de cargas mais sensíveis às variações de tensão de curta duração, apontando para estudos que demonstram o acentuado impacto financeiro ocasionado por tais fenômenos, representa a principal razão para o contínuo investimento despendido em pesquisas científicas, tanto nas avaliações de suportabilidade de diversas cargas quanto nos desenvolvimentos de equipamentos dinâmicos de correção da tensão.

Uma vez elucidado o contexto de atuação dos equipamentos de mitigação de VTCD's, o capítulo II açambarcou a tarefa de apresentar, a partir de um histórico de desenvolvimento dos reguladores de tensão no Brasil, uma visão geral do RT propriamente dito. Através de uma estrutura em diagrama de blocos, as unidades modulares que o constituem puderam ser explanadas e analisadas com o grau de aprofundamento necessário, demonstrando a interconexão entre as mesmas e com o sistema de distribuição de energia. Além disso, a riqueza do material fotográfico exibido conferiu uma visão clara e concisa do protótipo desenvolvido.

Conforme apontamentos realizados em diversas partes da dissertação, o desenvolvimento de um controle eletrônico inteligente caracterizou-se como sendo a efetiva contribuição deste trabalho ao processo de regulação dinâmica da tensão. Assim sendo, o capítulo III foi integralmente dedicado à apresentação das características, em termos de *hardwares* e *firmwares*, dos dois módulos integrados que o constituem: o de leitura RMS e o decisório. Foi graças à elaboração destas duas unidades controladoras que o RT ascendeu ao patamar de equipamento autônomo, dinâmico, seguro e inteligente. Deve-se ressaltar, inclusive, a capacidade de correção de *sags* e *swells* em um período de tempo que oscila entre 03 e 04 ciclos da rede elétrica, já que se trata de um intervalo de ajuste pioneiro para esta modalidade de regulador de tensão.

Finalmente, os resultados dos ensaios elaborados em baixa e média tensão foram analisados no capítulo IV. Os procedimentos de correção foram expressos através de gráficos de formas de onda e tensão RMS, evidenciando o comportamento da tensão e da corrente nos equipamentos empregados como cargas mediante os distúrbios induzidos em laboratório. Unindo a avaliação positiva dos gráficos apresentados com o êxito nos testes em MT realizados no LACTEC, fica patente que o

RT com controle eletrônico inteligente caracteriza-se, portanto, como um equipamento avalizado à mitigação dos impactos elétricos e financeiros de VTCD's sobre as unidades consumidoras sujeitas a este tipo de fenômeno, aliando a isto a sua simplicidade de operação e sua satisfatória relação custo-benefício.

Por se tratar de uma tecnologia em franca ascensão, é perfeitamente natural que sejam vislumbrados alguns aprimoramentos não contemplados no escopo desta pesquisa e que, por conseguinte, se apresentem como dignos motivadores de trabalhos futuros, como o que se iniciará em agosto de 2007 entre a UFU e a CELG (Centrais Elétricas de Goiás). São eles:

- **Substituição dos SCR's (tiristores) por IGBT's () na concepção do módulo de chaves.** Como os tiristores só podem ser abertos em zeros de corrente, cerca de meio ciclo é desnecessariamente perdido durante toda e qualquer comutação dos taps. Isso sem mencionar o fato de que possuem alguns dos maiores tempos de acionamento (*turn on*) e desligamento (*turn off*) dentre os semicondutores. Os IGBT's, além de serem abertos em qualquer instante de tempo, podem ser chaveados em elevadas frequências, fato que abriria possibilidades ainda melhores durante os procedimentos de correção de variações de curta duração;
- **Desenvolvimento de um módulo de monitoramento eletrônico trifásico.** O presente trabalho contemplou um sistema monofásico de correção da amplitude da tensão fornecida à carga. Com um sistema trifásico, além de atender uma diversidade maior de sistemas de energia, o RT eletrônico poderia ser utilizado não somente na investigação de amplitude das fases, mas também de outros fatores relacionados ao desequilíbrio e defasamento angular entre elas;
- **Desenvolvimento de um módulo de avaliação da frequência do sistema.** A partir de um conversor tensão-frequência, o impacto dinâmico de entrada e/ou

saída de cargas em um dado sistema poderia ser avaliado. A partir disto, estratégias de correção de frequência poderiam ser implementadas com a máxima autonomia e rapidez possível;

- **Monitoramento remoto de transformadores de distribuição.** O controle eletrônico do RT foi desenvolvido com base no monitoramento local da tensão da rede via computador. Considerando a localização aérea do transformador, este tipo de avaliação se torna inviável. Desta feita, o desenvolvimento de um *link* de rádio para monitoramento remoto permitiria às concessionárias investigar, a quilômetros de distância, o comportamento da tensão fornecida aos consumidores e interferir sobre a operação do RT sempre que desejável, sem qualquer custo de deslocamento de equipes de apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std 1159, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” IEEE, New York – USA, June 14, 1995.
- [2] DUGAN, R. C., McGranaghan, M. F. & W. H. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, pp. 2-80. New York – NY: McGraw-Hill, 1996.
- [3] LAMOREE, J., Mueller, D., Vinett, P., et al., “Voltage sag analysis case studies,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, pp. 1083-1089, Jul/Aug 1994.
- [4] BECKER, C., Braun Jr., W., Carrick, K., et al., “Proposed chapter 9 for predicting voltage sags (dips) in revision to IEEE Std 493, the Gold Book,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, pp. 805-821, May/June 1994.
- [5] BURKE, J. J., “Utility characteristics affecting sensitive industrial loads,” *Power Quality Assurance*, pp. 8-16, Nov/Dec 1996.
- [6] HONGFA, D., Jun, G. & Xianzhong, D., “New concepts of dynamic voltage restoration for three-phase distribution systems,” *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1427-1432, IEEE, 2000.
- [7] LEITÃO, J. J. A. & Reis, L. B., “Avaliação econômica das perdas por distúrbios na rede básica,” *V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, vol. 2 (Aracaju – SE), pp. 495-502, Agosto 2003.
- [8] MAGALHÃES, C. H. N., Gouveia, M. R., Silva, F. A. T., Tahan C. M. V. & Filho, L. G. C. A., “Avaliação do custo social de interrupção do fornecimento de energia elétrica do lado da demanda do estado de São Paulo,” *XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, (Campinas – SP), p. 6, Outubro 2001.
- [9] SILVA, S. M., “Análise e implementação de um restaurador dinâmico de tensão,” Tese de doutorado, PPGEE/EEUFMG, Belo Horizonte – MG, Dezembro, 2003.

- [10] STUMP, M. D., Keane, G. & Leong, F. K. S., "The role of custom power products in enhancing power quality at industrial facilities," *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, pp. 507-517, IEEE, 1998.
- [11] SILVA, S. M., "Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão," Dissertação de mestrado, PPGEE/EEUFMG, Belo Horizonte – MG, Agosto, 1999.
- [12] RODRIGUES, A. R., "Regulador de Tensão com Comutação Eletrônica de Taps – Análise de Operação e Proteção das Chaves Eletrônicas," Dissertação de mestrado, FEELT/UFU, Uberlândia – MG, 10 de maio de 2007.
- [13] SHUTTLEWORTH, R., "Electrical Changeover Switching," Patent Number 5,604,424, Feb. 18, 1997.
- [14] TRAINOR, J. L., "Load Voltage Based Tap Changer Monitoring System," Patent Number 5,619,121, Apr. 8, 1997.
- [15] DEGENEFF, R. C. & Raedy, S. "Regulator with Asymmetrical Voltage Increase/Decrease Capability for Utility System," Patent Number 5,990,667, Nov. 23, 1999.
- [16] BISHOP, M. T., Foster, J. D. & Down, D. A., "The Application of Single-phase Voltage Regulators on Three-phase Distribution Systems," *IEEE Conference Paper*, Paper nº 94 C2, 1994.
- [17] SHARAF, A. M. & Snider, L. A., "An Intelligent Controller for Static var Compensators," *Systems Theory'1994 – Proceedings of the 26th Southeastern Symposium*, 1994.
- [18] MARTINS, R. M., "Controladores Nebulosos Aplicados à Estabilização de um Sistema de Energia Elétrica," Dissertação de mestrado, FEELT/UFU, Uberlândia – MG, 28 de junho de 1995.
- [19] CARBONE, F., Castellano, G. & Moreschini, G., "Coordination and Control of Tap Changers Under Load at Different Voltage Level Transformers," *8th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON'96)*, Rome, Italy, 1996.

- [20] YOUSEF-ZAI, F. Q. & O'Kelly, D., "Solid-state on Load Transformer Tap Changer," *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 143, nº 6, November, 1996.
- [21] BAUER, P. & Haan, S. W. H., "Electronic Tap Changer for 500 kVA/10 kV Distribution Transformer: Design, Experimental Results and Impact in Distribution Networks," *IEEE*, 1998.
- [22] DEMIRCI, O., Torrey, D. A., Degeneff, R. C., Schaeffer, F. K. & Frazer, R. H., "A New Approach to Solid-state on Load Tap Changing Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, nº 3, July, 1998.
- [23] ECHAVERRÍA, R., Cotorogea, M., Cláudio, A. & Sánchez, V., "A Novel Fast On-Load Tap Changing Regulator," *IEEE – CIEP*, Acapulco, México, October 15-19, 2000.
- [24] WEI, L., Jian, W., Zhiyuan, C., Shaohua. M., Yishan, G. & Chuan L., "An Intellectualized Voltage-regulator Controlling Load Tap Switch for Changing Primary Winding Tap Location of Power Transformer," *Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems – ICEMS 2001*, 2001.
- [25] PARK, H., Park, S., Park, J. & Kim, C., "A Novel High Performance Voltage Regulator for Single-phase AC Sources," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 8, nº 3, pp. 554-562, June, 2001.
- [26] TSUZUKU, M., Takemura, J., Osako, K., Kuriyama, T., Nagata, T. & Fugawa, K., "Resultado de Teste de Campo com Regulador de Tensão por Degrau do Tipo Tiristorizado," *Revista Eletricidade Moderna*, pp. 130-138, Março, 2002.
- [27] LIU, J. W., Choi, S. S. & Chen, S., "Application of Step-dynamic Voltage Regulator to Single-phase System," *IEEE Proceedings, Powercon*, vol. 3, pp. 1461-1466, October, 2002.
- [28] FAIZ, J. & Siahkollah, B., "New Solid-state Onload Tap Changers Topology for Distribution Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, nº 1, January, 2003.

- [29] MAILAH, N. F., Bashi, S. M. & Meng, W. H., “Microcontroller Based Semiconductor Tap Changer for Power Transformer,” *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [30] BAUER, P. & Schoevaars, R., “Bidirectional Switch for a Solid-state Tap Changer,” *IEEE*, pp.466-471, 2003.
- [31] LÓPEZ, J. V., Rodríguez, J. C. C., Fernández, S. M., García, S. M. G. & García, M. A. P., “Analysis on Fast Onload Multitap-changing Clamped-hard-switching AC Stabilizers,” *IEEE transactions on Power Delivery*, vol. 21, nº 2, pp. 852-861, April, 2006.
- [32] FAIZ, J. & Siahkollah, B., “Differences Between Conventional and Electronic Tap Changers and Modifications of Controller,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006.
- [33] OLIVEIRA, A., Oliveira, J. C., Chaves, M. L. R., Lima, R. R. de, Silva, P. R. C. & Benichio, V. M., “Projeto e Implementação de um Novo Regulador de Tensão em Sistemas de Distribuição em 13,8 kV,” *Congreso Internacional de Distribución Eléctrica*, Buenos Aires, Argentina, Novembro, 2006.
- [34] OLIVEIRA, A., Oliveira, J. C., Chaves, M. L. R., Lima, R. R. de, Silva, P. R. C. & Benichio, V. M., “Projeto e Implementação de um Novo Regulador de Tensão em Sistemas de Distribuição em 13,8 kV,” *V Seminário Naxional de Controle e Automação*, Salvador – BA, Junho, 2007.
- [35] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, “Resolução nº 24,” Brasília – DF, 27 de janeiro de 2000.
- [36] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, “Resolução normativa nº 61,” Brasília – DF, 29 de abril de 2004.
- [37] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, “Resolução nº 505,” Brasília – DF, 26 de novembro de 2001.

- [38] PIMENTEL, R. L., Barcelos, P., França, L., Vitor, A. & Andrade, M., “O que interessa saber sobre os reguladores de tensão monofásicos com 32 degraus,” Manual do Regulador, p. 5, Agosto, 2002.
- [39] FELÍCIO, J. R., “Modelagem de Reguladores de Tensão com 32 degraus para Estudos em Regime Permanente e Transitório,” Dissertação de mestrado, FEELT/UFU, Uberlândia – MG, 2003.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, “NBR 11809 – Reguladores de Tensão,” Fevereiro, 1991.
- [41] JÚNIOR, A. P., “Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos: Teoria, Projetos, Aplicações, Laboratório,” pp.147-151, 232-236, São Paulo – SP, McGraw-Hill, 4ª edição, 1988.
- [42] SOARES, A. B., “Multiprocessamento e Sistemas em Tempo Real (Notas de aulas),” Apostila, Universidade Federal de Uberlândia, Junho, 2005.
- [43] RICH, E., “Inteligência Artificial,” São Paulo – SP, McGraw-Hill, 1988.
- [44] ARAÚJO, A. S., Cavalcante, M. S. M, Sampaio, J. P. S. M. C., Figueiredo, J. C. A., Cirne, E. R. N. W. & Duarte, A., “Smart Alarms – Tratamento Inteligente de Alarmes para os Centros de Operação de Sistema da Chesf,” *Revista EletroEvolução – Sistemas de Potência*, pp. 29-37, nº 44, Setembro, 2006.