

5. Aplicações

5.1 Introdução

Neste capítulo será descrita, como ilustração de sistema não linear, a modelagem de uma típica indústria produtora de alumínio, utilizando eletrólise.

Uma linha de produção de alumínio por meio de eletrólise é constituída basicamente por pontes retificadoras, compostas por diodos, que alimentam os eletrodos de diversas cubas eletrolíticas. Para que haja a eletrólise, é necessário que seja aplicada em cada cuba uma tensão, fazendo com que a cuba seja percorrida por uma corrente muito elevada, da ordem de centenas de kA.

Complementando este caso de carga não linear, será feita a simulação desta carga, já agora alimentada por uma rede linear através de uma linha de transmissão. Para realizar esta simulação, primeiramente será realizado um passo de simulação da rede linear, sendo em seguida o resultado alimentado para a rede não-linear. Depois de realizada a simulação da rede não-linear, o resultado é devolvido para a rede linear, e assim sucessivamente (Figura (5.1)).

Naturalmente, existem influências de uma rede sobre a outra, obrigando muitas vezes a aumentar muito a taxa de amostragem para reduzir os erros de simulação. Isto, por sua vez, aumenta a carga computacional do processo, não sendo incomum o uso de taxas de amostragem próximas do MHz, quando se deseja alcançar apenas poucos kHz na faixa de resposta da rede.

Uma alternativa a este processo será apresentada mais à frente, neste trabalho, fazendo uso de normalmente existem linhas de transmissão alimentando diretamente estas cargas de potência. Desta forma, a própria linha de transmissão insere atrasos no processo [19], permitindo resolver o problema das altas taxas de amostragem antes mencionadas.

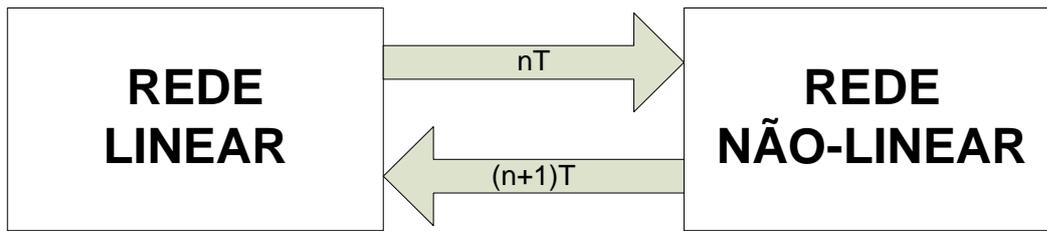


Figura 5.1– Simulação completa

Primeiramente, serão apresentadas as equações da carga não-linear. Em seguida, será realizada uma simulação apenas da rede não-linear. Depois será mostrado o modelo de linhas de transmissão a parâmetros distribuídos utilizado no exemplo. Finalmente será feita a simulação do sistema completo (linear + não-linear).

5.2 Carga não-linear

Na Figura (5.2), encontra-se o diagrama da carga. Esta é constituída basicamente por uma ponte retificadora, que alimenta os eletrodos de diversas cubas eletrolíticas. Na entrada da carga, utilizam-se transformadores reguladores, com o objetivo de manter o nível de corrente desejado na linha de cubas. Utilizam-se também transformadores com conexões especiais para fornecer diferentes defasagens, permitindo em cancelamento e deslocamento de harmônicos originados da carga não-linear.

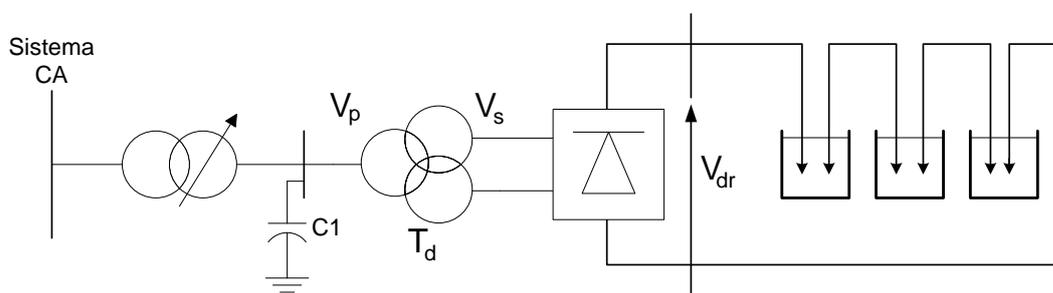


Figura 5.2– Diagrama da carga não-linear

O comportamento dinâmico de cada cuba pode ser modelado como uma fonte de tensão constante, representando a tensão residual da cuba, em série com um ramo RL, resistor + indutor. Como as cubas estão ligadas em série, o valor do

resistor, do indutor e da fonte de tensão será o valor para cada cuba, multiplicado pelo número total de cubas na linha. O modelo equivalente para toda a linha de cubas encontra-se na Figura (5.3).

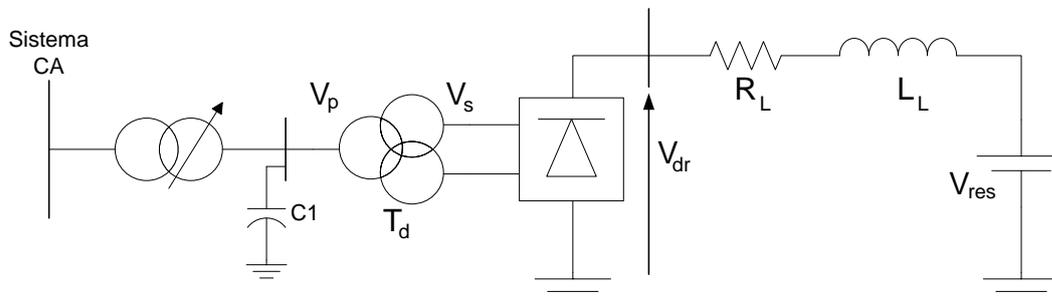


Figura 5.3- Modelo equivalente da linha de cubas

Vamos agora estudar o comportamento apenas da carga não-linear. Por simplicidade consideramos que todos os transformadores são ideais. De modo a simplificar estas primeiras simulações não-lineares, que mesmo assim apresentam custo computacional elevado, vamos considerar que a carga não-linear consiste apenas das pontes retificadoras e da linha de cubas. Os transformadores serão incorporados em outros modelos (como o da linha de transmissão). Diferente do apresentado na Figura (5.3), vamos considerar que o banco de filtros C1 encontra-se diretamente posicionado junto da entrada das pontes retificadoras. A seguir vamos realizar duas simulações da carga não-linear. A primeira simulação não considera os transformadores defasadores, a segunda simulação os considera.

5.2.1 Caso 1

Neste primeiro teste, vamos considerar que existe apenas uma ponte retificadora trifásica, alimentando a linha de cubas. A rede completa encontra-se na Figura (5.4). As fontes de corrente foram dimensionadas para obter na linha de cubas o nível de corrente desejado. A resistência equivalente da fonte foi dimensionada de forma a não influenciar significativamente a resposta do resto da rede. O capacitor C4 foi adicionado ao modelo como artifício para que a tensão sobre os diodos pudesse ser definida como uma função linear de tensões de capacitores, seguindo o método mostrado na seção 4.2.1.

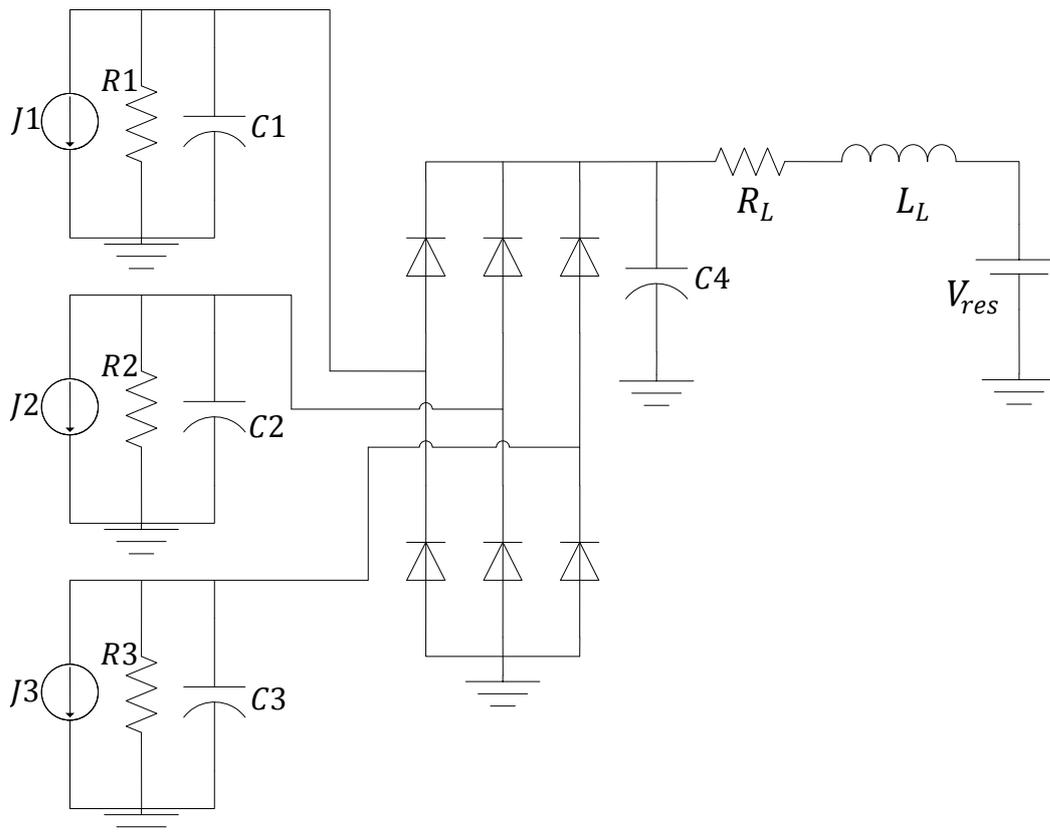


Figura 5.4– Rede caso 1 completa

As equações de estado resultantes foram

$$\begin{aligned}
 \frac{dv_{C1}}{dt} &= \frac{1}{C1} \left(-J1 - \frac{v_{C1}}{R1} + f(-v_{C1}) - f(v_{C1} - v_{C4}) \right) \\
 \frac{dv_{C2}}{dt} &= \frac{1}{C2} \left(-J2 - \frac{v_{C2}}{R2} + f(-v_{C2}) - f(v_{C2} - v_{C4}) \right) \\
 \frac{dv_{C3}}{dt} &= \frac{1}{C3} \left(-J3 - \frac{v_{C3}}{R3} + f(-v_{C3}) - f(v_{C3} - v_{C4}) \right) \\
 \frac{dv_{C4}}{dt} &= \frac{1}{C4} (f(v_{C1} - v_{C4}) + f(v_{C2} - v_{C4}) + f(v_{C3} - v_{C4}) - i_{L_L}) \\
 \frac{di_{L_L}}{dt} &= \frac{1}{L_L} (v_{C4} - R_L i_{L_L} - V_{res})
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

onde $f(v)$ é a função não-linear que representa a corrente do diodo, e $R1$, $R2$ e $R3$ são as resistências equivalentes das fontes $J1$, $J2$ e $J3$ respectivamente. Os valores utilizados para cada elemento encontram-se na Tabela (5.1).

Elementos	Valor
$R1, R2$ e $R3$	$0,01\Omega$
$C1, C2$ e $C3$	$14,263\mu F$
$C4$	$15\mu F$
R_L	$0,00294\Omega$
L_L	$1,0126mH$
V_{res}	$293,8V$

Tabela 5.1– Valores utilizados

Nas Figuras (5.5) e (5.6) encontram-se o resultado da simulação. Na Figura (5.5) podemos ver as tensões de entrada das fases, e a tensão na linha de cubas. Na Figura (5.6), podemos ver a corrente que passa pela linha de cubas, retificada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711227/CA

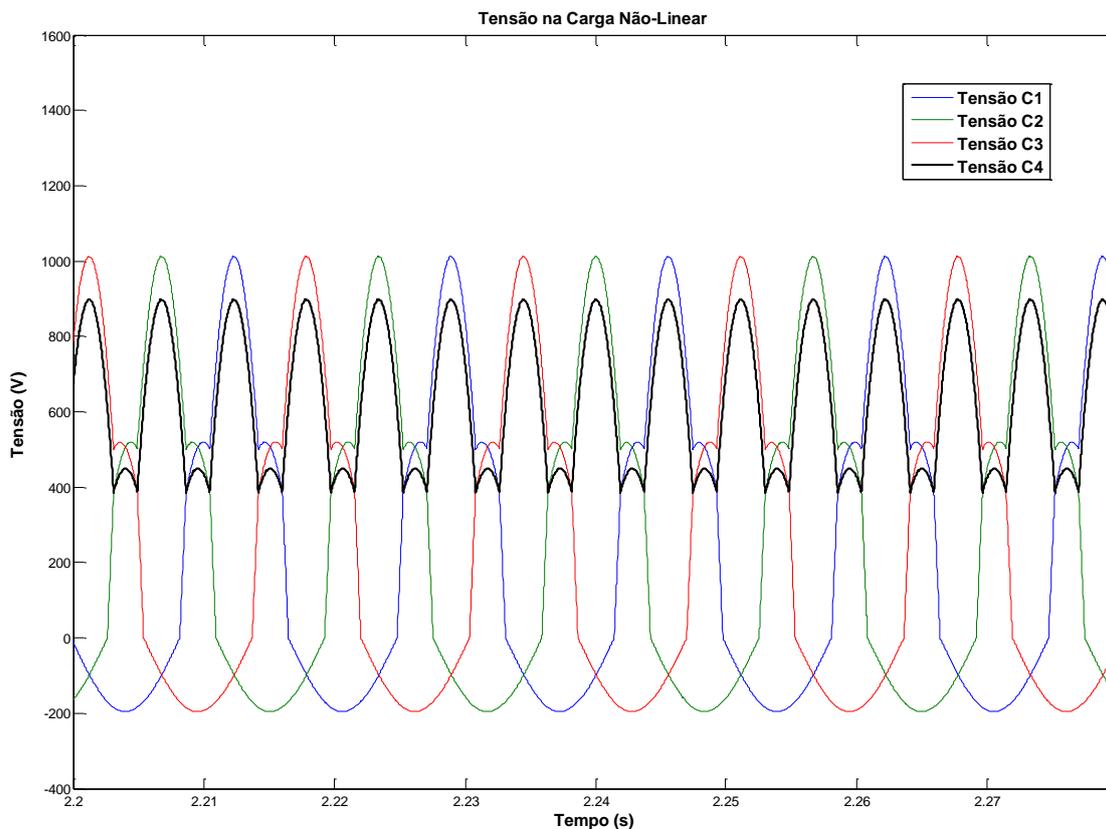


Figura 5.5– Tensões na carga não-linear

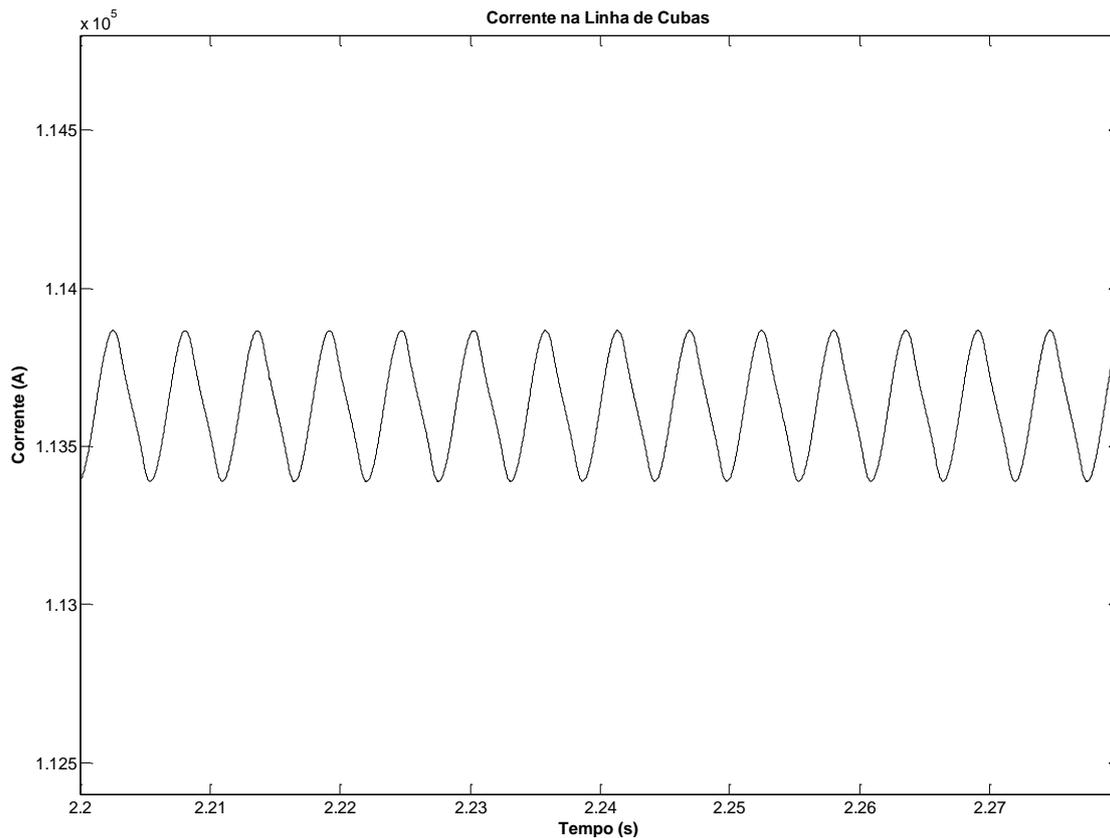


Figura 5.6– Corrente na carga não-linear

Analisando a tensão de um dos capacitores de entrada, por exemplo, $C1$, representado por uma linha azul, percebe-se que existe uma periodicidade em sua forma. Este período corresponde à frequência fundamental de 60Hz . Percebe-se também que a sua forma não corresponde a uma senoide, o que sugere a presença de harmônicos no sinal. Isto pode ser confirmado analisando a resposta em frequência desta tensão.

Na Figura (5.7), está o gráfico da resposta em frequência da tensão da entrada da fase 1 (Tensão em $C1$). Nela confirma-se a presença de vários harmônicos, que, em uma situação não idealizada como a atual, serão injetados de volta no sistema elétrico que alimenta a carga. Em seguida será feita a simulação da mesma linha de cubas, considerando o transformador defasador na entrada, mas ainda sendo alimentadas por fontes ideais.

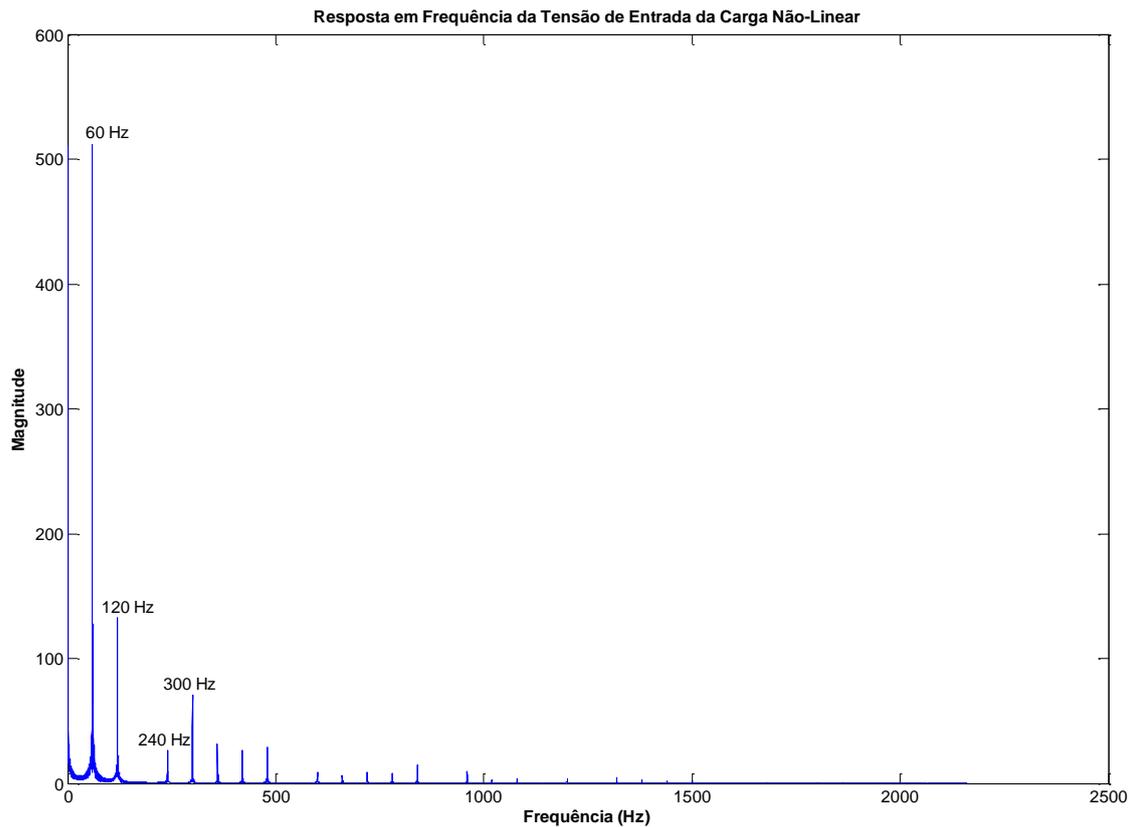


Figura 5.7– Resposta em frequência da tensão de entrada da carga não-linear

5.2.2 Caso 2

Agora vamos repetir a simulação anterior considerando que existem dezoito entradas, que correspondem às saídas dos transformadores defasadores. Os dados dos transformadores são apresentados na Tabela (5.2).

Transformador	Defasagem secundário em relação ao primário
1	5° em avanço
2	5° em atraso
3	15° em atraso
4	25° em atraso
5	35° em atraso
6	45° em atraso

Tabela 5.2– Dados dos transformadores defasadores

A rede simulada é muito semelhante à rede da Figura (5.4). Neste caso, são 6 pontes retificadoras, como a da Figura (5.8), conectadas em paralelo no lado da linha de cubas.

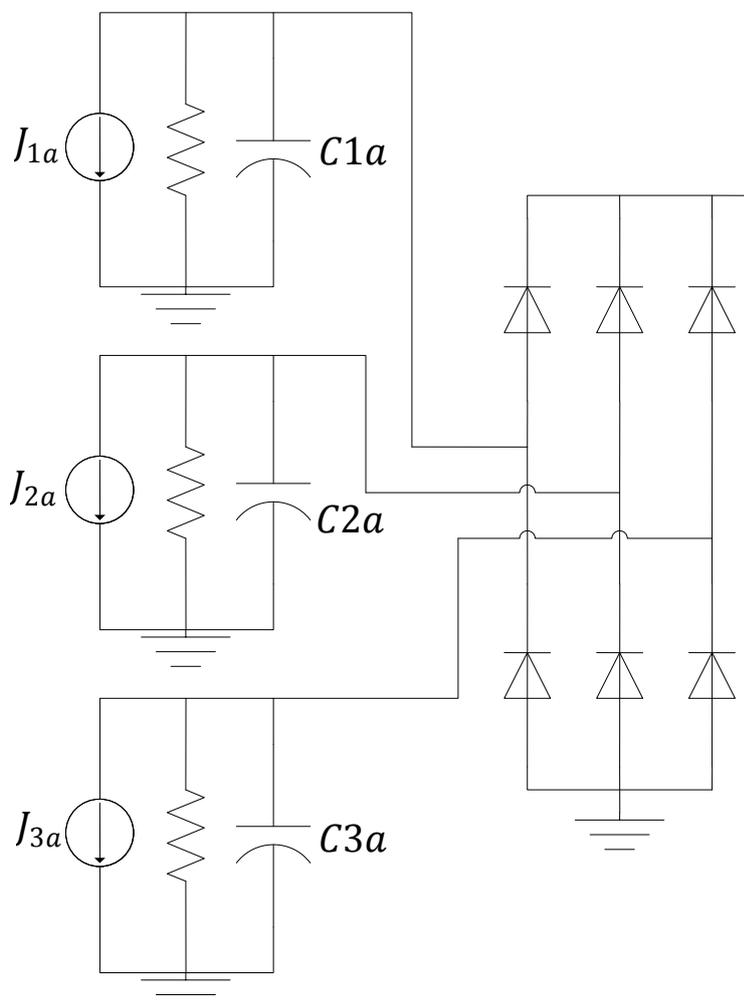


Figura 5.8– Ponte retificadora trifásica

Onde J_{1a} , J_{2a} e J_{3a} correspondem às saídas das fases 1, 2 e 3 do transformador defasador 1, respectivamente. As saídas do transformador defasador 2 serão representadas J_{1b} , J_{2b} e J_{3b} , e assim sucessivamente. Os capacitores e as resistências das fontes serão representadas da mesma forma que as suas respectivas fontes.

As equações de estado são dadas por

$$\begin{aligned}
\frac{dv_{C1a}}{dt} &= \frac{1}{C1a} \left(-J_{1a} - \frac{v_{C1a}}{R1a} + f(-v_{C1a}) - f(v_{C1a} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C2a}}{dt} &= \frac{1}{C2a} \left(-J_{2a} - \frac{v_{C2a}}{R2a} + f(-v_{C2a}) - f(v_{C2a} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C3a}}{dt} &= \frac{1}{C3a} \left(-J_{3a} - \frac{v_{C3a}}{R3a} + f(-v_{C3a}) - f(v_{C3a} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C1b}}{dt} &= \frac{1}{C1b} \left(-J_{1b} - \frac{v_{C1b}}{R1b} + f(-v_{C1b}) - f(v_{C1b} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C2b}}{dt} &= \frac{1}{C2b} \left(-J_{2b} - \frac{v_{C2b}}{R2b} + f(-v_{C2b}) - f(v_{C2b} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C3b}}{dt} &= \frac{1}{C3b} \left(-J_{3b} - \frac{v_{C3b}}{R3b} + f(-v_{C3b}) - f(v_{C3b} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C1c}}{dt} &= \frac{1}{C1c} \left(-J_{1c} - \frac{v_{C1c}}{R1c} + f(-v_{C1c}) - f(v_{C1c} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C2c}}{dt} &= \frac{1}{C2c} \left(-J_{2c} - \frac{v_{C2c}}{R2c} + f(-v_{C2c}) - f(v_{C2c} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C3c}}{dt} &= \frac{1}{C3c} \left(-J_{3c} - \frac{v_{C3c}}{R3c} + f(-v_{C3c}) - f(v_{C3c} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C1d}}{dt} &= \frac{1}{C1d} \left(-J_{1d} - \frac{v_{C1d}}{R1d} + f(-v_{C1d}) - f(v_{C1d} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C2d}}{dt} &= \frac{1}{C2d} \left(-J_{2d} - \frac{v_{C2d}}{R2d} + f(-v_{C2d}) - f(v_{C2d} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C3d}}{dt} &= \frac{1}{C3d} \left(-J_{3d} - \frac{v_{C3d}}{R3d} + f(-v_{C3d}) - f(v_{C3d} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C1e}}{dt} &= \frac{1}{C1e} \left(-J_{1e} - \frac{v_{C1e}}{R1e} + f(-v_{C1e}) - f(v_{C1e} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C2e}}{dt} &= \frac{1}{C2e} \left(-J_{2e} - \frac{v_{C2e}}{R2e} + f(-v_{C2e}) - f(v_{C2e} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C3e}}{dt} &= \frac{1}{C3e} \left(-J_{3e} - \frac{v_{C3e}}{R3e} + f(-v_{C3e}) - f(v_{C3e} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C1f}}{dt} &= \frac{1}{C1f} \left(-J_{1f} - \frac{v_{C1f}}{R1f} + f(-v_{C1f}) - f(v_{C1f} - v_{C4}) \right) \\
\frac{dv_{C2f}}{dt} &= \frac{1}{C2f} \left(-J_{2f} - \frac{v_{C2f}}{R2f} + f(-v_{C2f}) - f(v_{C2f} - v_{C4}) \right)
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_{C3f}}{dt} &= \frac{1}{C3f} \left(-J_{3f} - \frac{v_{C3f}}{R3f} + f(-v_{C3f}) - f(v_{C3f} - v_{C4}) \right) \\ \frac{dv_{C4}}{dt} &= \frac{1}{C4} (f(v_{C1a} - v_{C4}) + f(v_{C2a} - v_{C4}) + f(v_{C3a} - v_{C4}) \\ &\quad + f(v_{C1b} - v_{C4}) + f(v_{C2b} - v_{C4}) + f(v_{C3b} - v_{C4}) \\ &\quad + f(v_{C1c} - v_{C4}) + f(v_{C2c} - v_{C4}) + f(v_{C3c} - v_{C4}) \\ &\quad + f(v_{C1d} - v_{C4}) + f(v_{C2d} - v_{C4}) + f(v_{C3d} - v_{C4}) \\ &\quad + f(v_{C1e} - v_{C4}) + f(v_{C2e} - v_{C4}) + f(v_{C3e} - v_{C4}) \\ &\quad + f(v_{C1f} - v_{C4}) + f(v_{C2f} - v_{C4}) + f(v_{C3f} - v_{C4}) \\ &\quad - i_{LL} \\ &\quad \frac{di_{LL}}{dt} = \frac{1}{L_L} (v_{C4} - R_L i_{LL} - V_{res}) \end{aligned}$$

Os resultados da simulação encontram-se nas Figuras (5.9), (5.10), (5.11) e (5.12). Na Figura (5.9), encontram-se todas as tensões de entrada e a tensão na linha de cubas. Na Figura (5.10) encontram-se as tensões de entradas de todas as diferentes defasagens da linha 1, além da tensão na linha de cuba. Na Figura (5.11), encontra-se a tensão de entrada para a fase 1, do lado primário dos transformadores defasadores, além da tensão na linha de cubas. Finalmente, na Figura (5.12), encontra-se a corrente na linha de cubas.

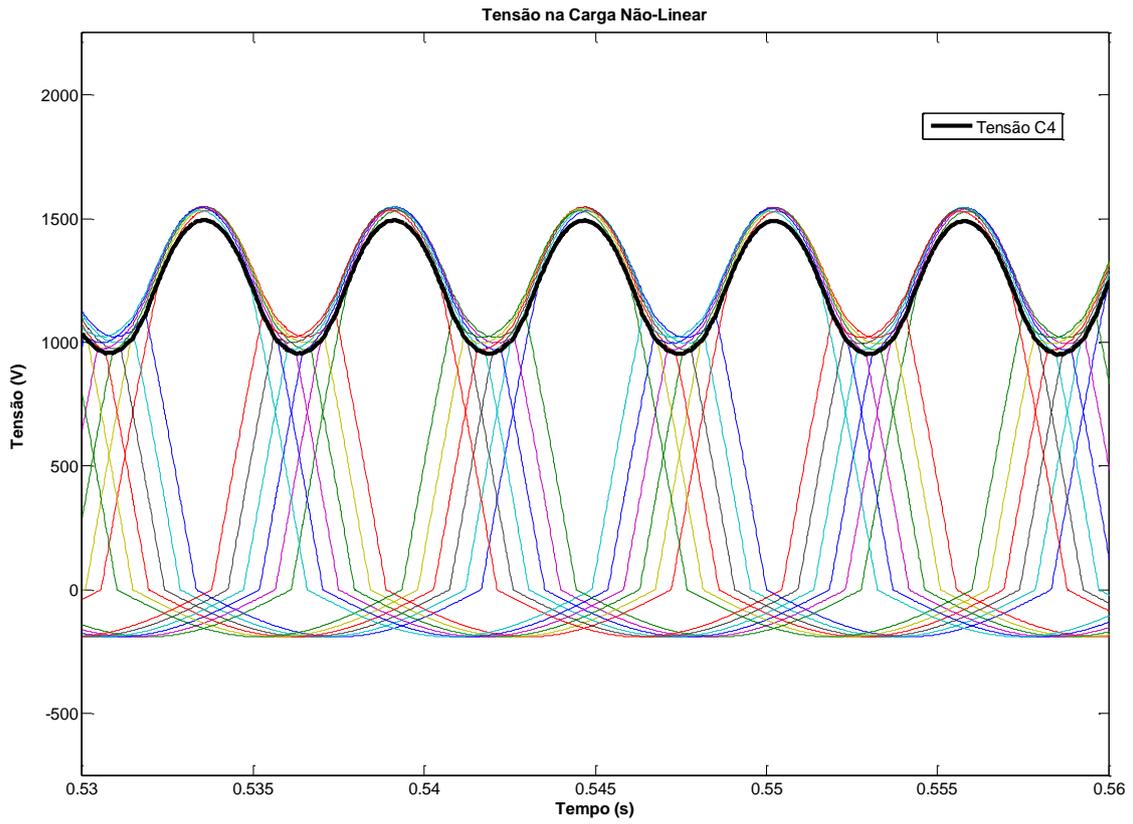


Figura 5.9– Tensões na carga não-linear

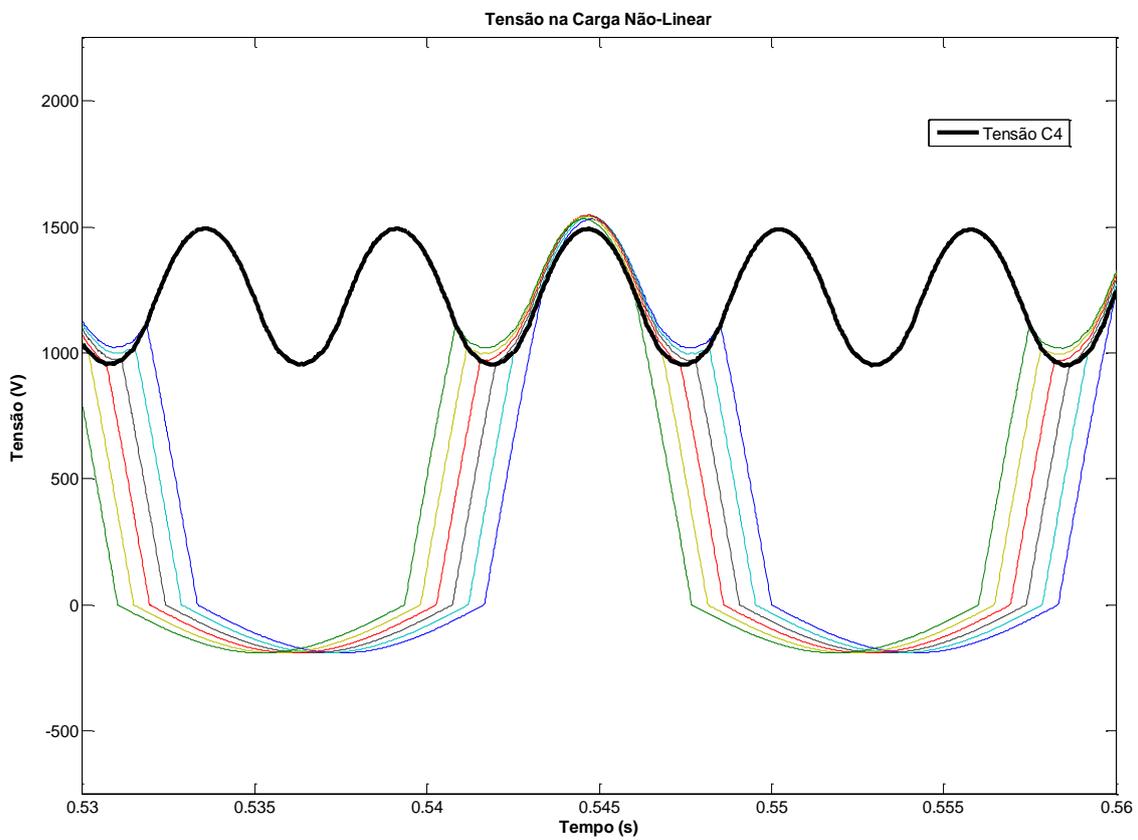


Figura 5.10– Tensões da fase 1 e da linha de cubas

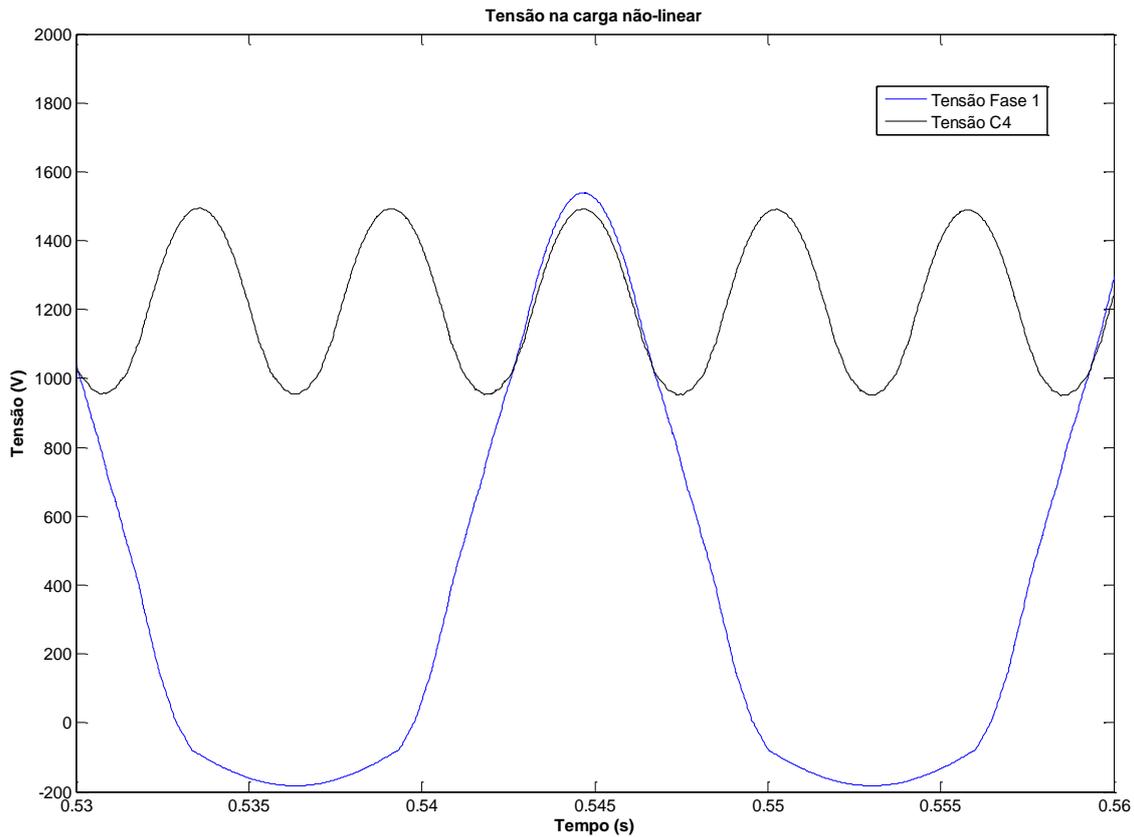


Figura 5.11– Tensão da fase 1 e da linha de cubas

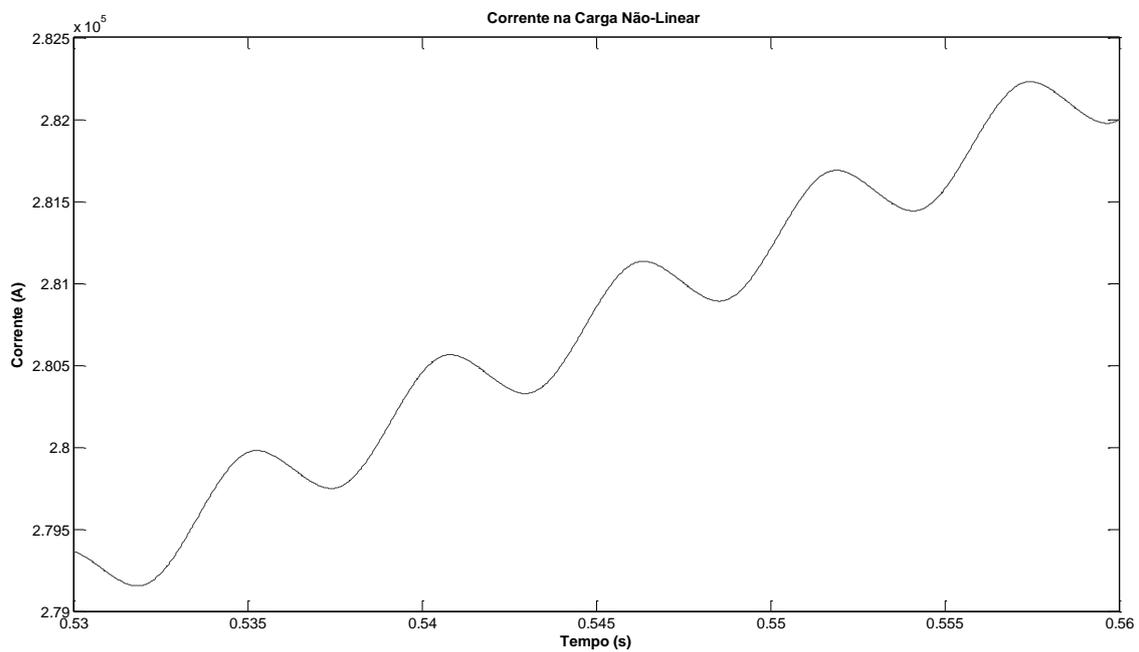


Figura 5.12– Corrente na linha de cubas

Na Figura (5.11), encontra-se a soma algébrica de todas as defasagens da fase 1 mais a tensão na linha de cubas. Pode-se perceber, comparando esta figura com a Figura (5.5), que o formato da tensão da entrada está mais parecido com

uma senóide, o que sugere uma diminuição nos harmônicos gerados pela carga não-linear.

Na Figura (5.13), está o gráfico da magnitude da resposta em frequência da tensão da entrada de uma das fases, que é a soma de todas as defasagens da fase em questão. Pode-se perceber uma redução considerável no nível dos harmônicos, quando comparada com o caso sem a presença dos transformadores defasadores (Figura (5.7)).

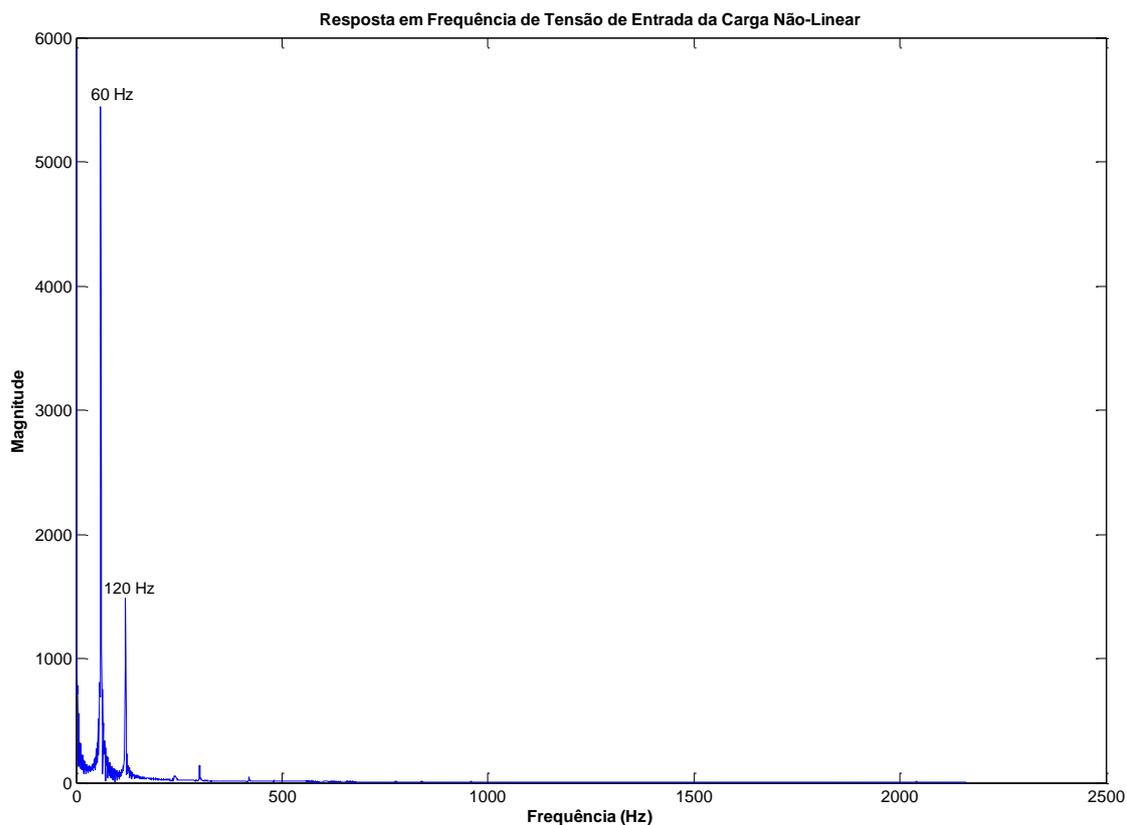


Figura 5.13– Resposta em frequência da tensão de entrada da carga não-linear

Note-se que restaram apenas o segundo harmônico e o nível contínuo, que naturalmente são eliminados pela própria rede de potência.

A seguir será apresentada a simulação do sistema completo, incluindo a rede linear que alimenta a carga não-linear através de uma linha de transmissão.

5.3 Carga não-linear alimentada por rede linear

Na Figura (5.14) encontra-se o diagrama do sistema completo.

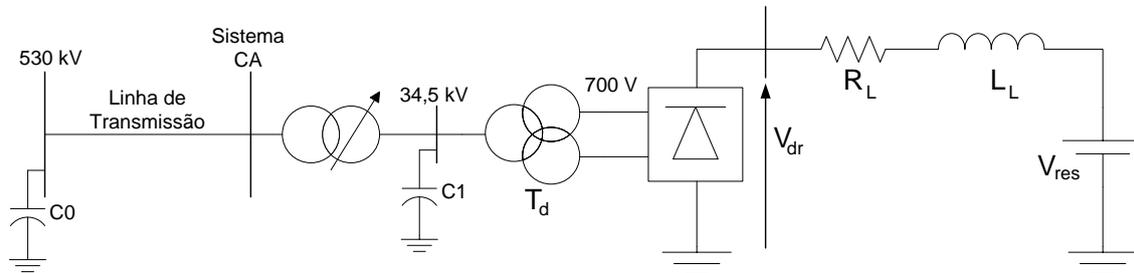


Figura 5.14 – Diagrama do caso exemplo

De modo a simplificar o modelo, todos os transformadores foram acoplados ao modelo da linha de transmissão. Como os transformadores defasadores têm como principal objetivo cancelar os harmônicos gerados pelo processo, além de reduzir o nível de tensão no secundário, eles podem ser acoplados ao modelo da linha como uma relação de transformação e um filtro projetado de forma a fazer o mesmo cancelamento de cc e harmônicos que seria efetuado pelos transformadores da rede.

A seguir é descrito o modelo da linha de transmissão utilizado nesta simulação.

5.3.1 Modelo da Linha de Transmissão

Foi utilizado neste exemplo, o modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos [9,20,21], descrito no Apêndice A, representado na Figura (5.15).

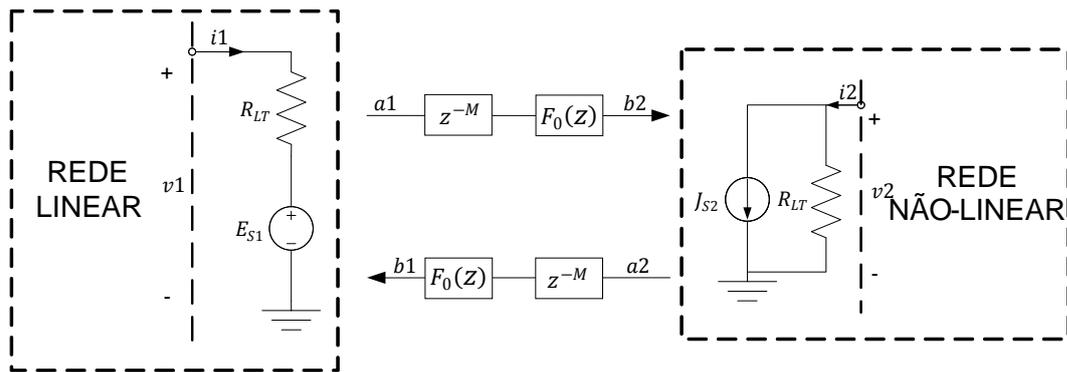


Figura 5.15 – Modelo de linha de transmissão

onde os respectivos pares (a_i, b_i) representam as ondas incidentes e refletidas no acesso i , e

$$\begin{aligned} b1 &= z^{-M} F_0(z) a2 \\ b2 &= z^{-M} F_0(z) a1 \end{aligned} \quad (5.3)$$

$z^{-M} F_0(z)$ é a resposta ao impulso da linha de transmissão, sendo M o inteiro representando o atraso da linha de transmissão dividido pelo período de amostragem. $a1, b1, a2$ e $b2$ são definidos como

$$\begin{aligned} a1 &= v1(z) + R_{LT} i1(z) \\ b1 &= v1(z) - R_{LT} i1(z) \\ a2 &= v2(z) + R_{LT} i2(z) \\ b2 &= v2(z) - R_{LT} i2(z) \end{aligned} \quad (5.4)$$

onde R_{LT} é a impedância característica da linha de transmissão, que em geral varia com a frequência. Neste trabalho, utilizamos um modelo simplificado que considera ser esta impedância constante na faixa de frequências de interesse.

Para adaptar este modelo de linha de transmissão às redes linear e não-linear, optamos por inserir na rede linear um elo resistivo, de valor R_{LT} em série com uma fonte de tensão, cujo valor é atualizado a cada iteração, a partir das Equações (5.3) e (5.4), como visto na Figura (5.15). Desta forma

$$E_{S1} = b1 \tag{5.5}$$

Correspondentemente, inserimos na rede não-linear um elo resistivo, de valor R_{LT} em paralelo com uma fonte de corrente, cujo valor é atualizado a cada iteração, a partir das equações (5.3) e (5.4). Assim

$$J_{S1} = -\frac{b2}{R_{LT}} \tag{5.6}$$

Desta forma, a rede da Figura (5.15) tem exatamente os pares (a, b) desejados, assim como a impedância característica selecionada. Podemos portanto utilizar alternativamente só acessos (a, b) , só (v, i) , ou mesmo mistos, um acesso por (v, i) e outro por (a, b) .

Optamos por representar os transformadores ideais por filtros de onda digitais, de modo a simplificar as equações da carga não-linear. Assim podemos com facilidade adicionar os transformadores no modelo da linha de transmissão, também representada por filtros digitais. Isto é apresentado a seguir.

O modelo de um transformador ideal por filtro de onda digital é bastante simples e encontra-se representado na Figura (5.16) [22].

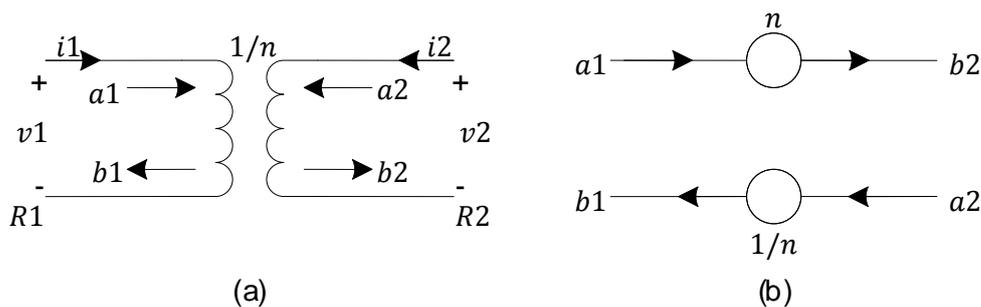


Figura 5.16 – Modelo do transformador ideal

onde

$$\begin{aligned}
 v_2 &= nv_1 \\
 i_1 &= -ni_2 \\
 R_2 &= n^2 R_1 \\
 a_1 &= v_1 + R_1 i_1 \\
 b_1 &= v_1 - R_1 i_1 \\
 a_2 &= v_2 + R_2 i_2 \\
 b_2 &= v_2 - R_2 i_2 \\
 b_2 &= na_1 \\
 b_1 &= \frac{1}{n} a_1
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Na sequência veremos que é possível adicionar o modelo do transformador a filtros digitais ao modelo de linha de transmissão por filtros digitais apresentado anteriormente. Naturalmente, também é possível incluir outros filtros neste modelo, como, por exemplo, o filtro supressor de harmônicos, como visto na Figura (5.17).

O filtro supressor de harmônicos introduz um atraso na sua saída, que eventualmente precisaria ser compensado [23,24]. Caso este atraso não ultrapasse o atraso da linha de transmissão, podemos facilmente compensar os dois atrasos, como se observa, já que $F_1(z)$ está em série com z^{-M}

O modelo da linha de transmissão incorporando todas as facetas mencionadas é denominado modelo generalizado e pode ser visto dentro da Figura (5.17). Neste modelo foram incorporados todas as relações de transformação, além do filtro supressor de harmônicos introduzidos pela carga não-linear, representado na Figura (5.17) por $F_1(z)$. No caso analisado neste trabalho, não temos informações sobre os valores exatos dos parâmetros da linha de transmissão. Sendo assim, não foi feita a compensação do atraso introduzido pelo filtro supressor de harmônicos.

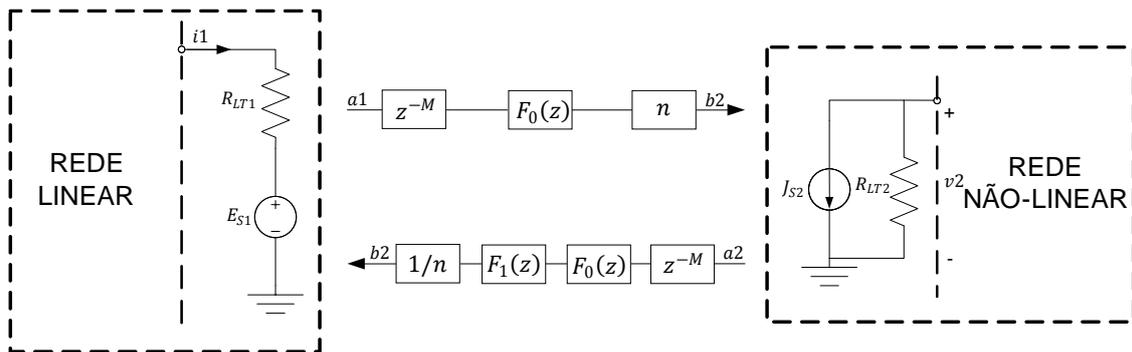


Figura 5.17 – Modelo generalizado da linha de transmissão

Os parâmetros utilizados para a simulação da linha são bastante comuns [19] e encontram-se na Tabela (5.3). O filtro $F_0(z)$ é na realidade passa baixa suave com pouca perda em 60 Hz. Aqui o selecionamos como uma constante, sem maiores influências no nosso estudo.

Parâmetro	Valor
R_{LT1}	7Ω
E_{s1}	$b1$
$a1$	$2R_{LT1}i1 + b1$
R_{LT2}	$7n^2\Omega$
J_{s2}	$-\frac{b2}{R_{LT1}n^2}$
$a2$	$2v2 - b2$
M	$4T_s$
n	0,003
$F_0(z)$	0,99
T_s	$\frac{1}{f_s} = \frac{1}{4319,7} s$

Tabela 5.3 – Valores para os parâmetros da linha de transmissão generalizada

A frequência de amostragem foi escolhida para que o atraso da linha de transmissão fosse um número inteiro de períodos de amostragem.

A equação do filtro $F_1(z)$, assim como sua resposta em frequência, encontra-se no Apêndice B.

Em seguida, será realizada a simulação da rede completa.

5.3.2 Simulação

A rede linear simulada, incluindo o elo equivalente do modelo da linha de transmissão encontra-se na Figura (5.18). A simulação da rede linear foi feita utilizando a técnica de análise nodal apresentada no Capítulo 2. A frequência de amostragem da simulação da rede linear foi de 4319,7 Hz.

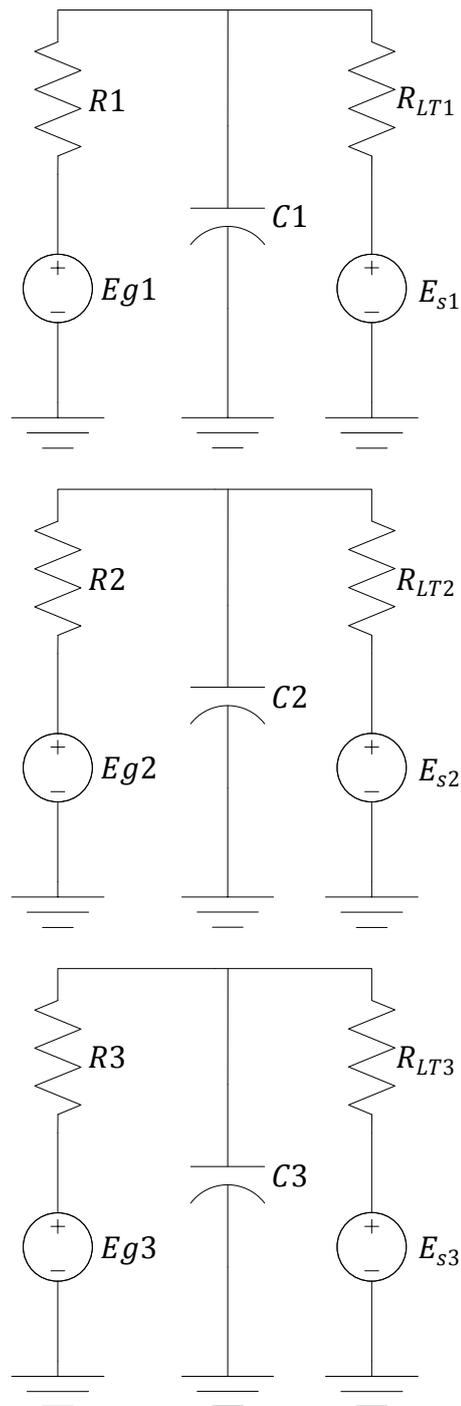


Figura 5.18 – Rede linear

Os valores dos elementos encontram-se na Tabela (5.4)

Elemento	Valor
$Eg1, Eg2$ e $Eg3$	$230 \times 10^3 \sin(2\pi 60t + fase)$
$R1, R2$ e $R3$	$0,01\Omega$
$C1, C2$ e $C3$	$1\mu F$
R_{LT1}, R_{LT2} e R_{LT3}	7Ω

Tabela 5.4– Valores dos elementos da rede linear

onde *fase* é igual a $0^\circ, 120^\circ$ e 240° para as fase 1, 2 e 3 respectivamente.

A rede não-linear simulada, incluindo os elos equivalentes do modelos da linha de transmissão encontra-se na Figura (5.19). Esta rede é idêntica a rede da Figura (5.4), exceto que neste caso, as entradas são atualizadas a cada iteração, vindas da rede linear.

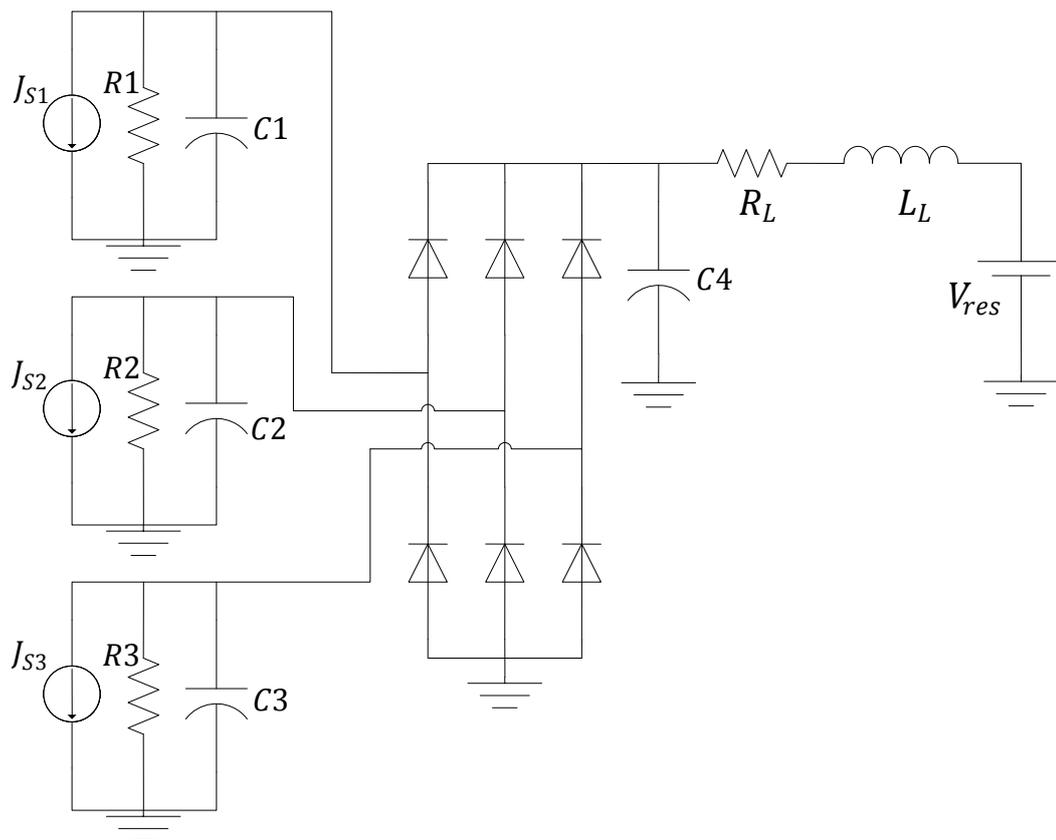


Figura 5.19 – Rede não-linear

Os valores dos elementos encontram-se na Tabela (5.5)

Elementos	Valor
$R1, R2$ e $R3$	$7n^2\Omega$
$C1, C2$ e $C3$	$14,263\mu F$
$C4$	$15\mu F$
R_L	$0,00294\Omega$
L_L	$1,0126mH$
V_{res}	$293,8V$

Tabela 5.5 – Valores dos elementos da rede não-linear

onde $R1, R2$ e $R3$ são as resistências em paralelo com as fontes J_{S1}, J_{S2} e J_{S3} , respectivamente.

Os resultados da simulação encontram-se nas Figuras (5.20), (5.21) e (5.22).

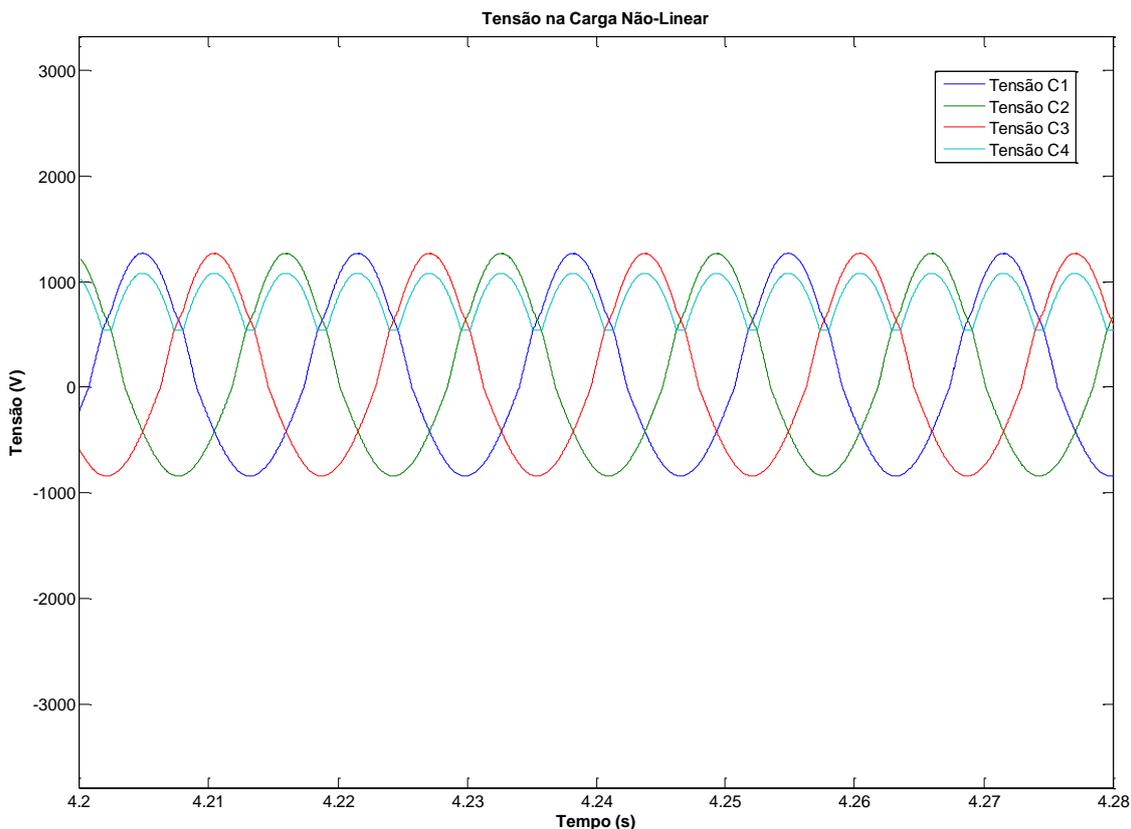


Figura 5.20 – Tensão na carga não-linear

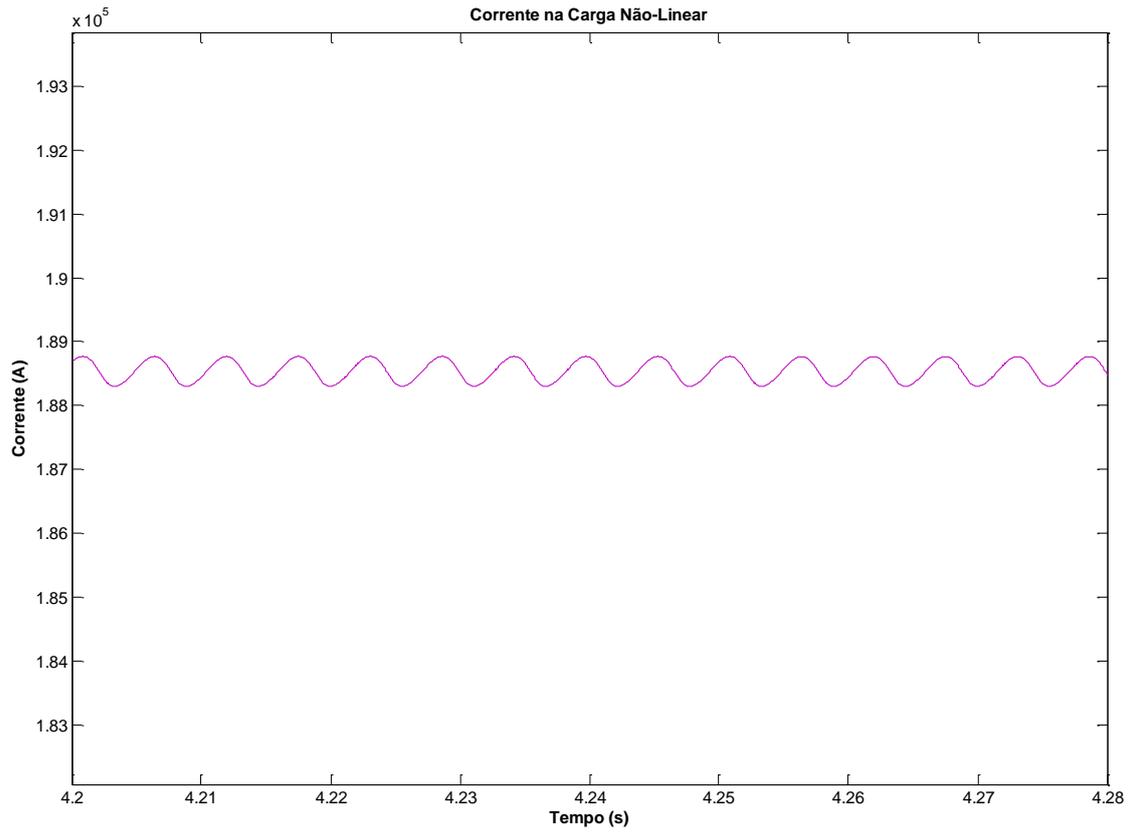


Figura 5.21– Corrente na linha de cubas

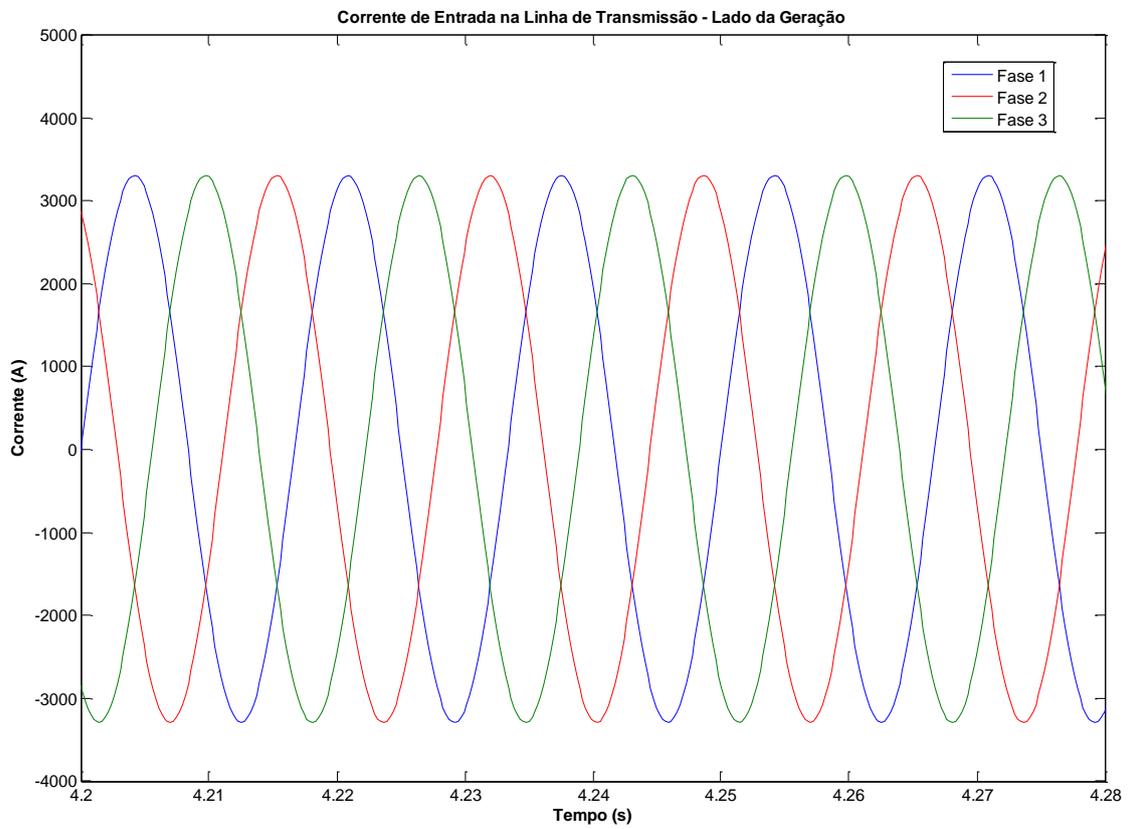


Figura 5.22 – Corrente na rede linear

5.4 Conclusão

Este capítulo apresentou algumas possíveis aplicações para as formulações propostas neste trabalho.

Primeiramente, foi feita uma simulação para uma rede não-linear mais complexa, incluindo pontes retificadoras trifásicas. Foi possível analisar a influência de transformadores defasadores em uma carga retificadora, mostrando a diferença entre as respostas em frequência da carga com e sem a presença dos transformadores defasadores. Foi possível notar uma notável redução de harmônicos, quando são utilizados transformadores defasadores na entrada da rede não-linear,. Os resultados das simulações mostraram-se bastante coerentes, apresentando níveis de tensão e corrente próximos dos níveis esperados para a carga em questão.

Em seguida, apresentou-se a simulação de uma rede completa, contendo sub-redes lineares, linha de transmissão e sub-rede não-linear. Foi utilizado um modelo de filtros digitais para linha de transmissão a parâmetros distribuídos. Mostra-se que usando este modelo é possível a troca de informação entre as sub-redes em taxa mais baixa. Este método permite a simulação de cada sub-rede com taxas diferentes, permitindo realizar a simulação da rede não-linear em taxa mais alta e até mesmo variável, aumentando a precisão da simulação, mas mantendo baixa a taxa do resto do sistema, o que reduz o custo computacional total do processo.