

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualizações, motivação e objetivo geral

Dentre as razões para se monitorar a energia elétrica, a de maior destaque refere-se ao fator econômico. Contudo, se a energia elétrica estiver fora dos seus parâmetros admissíveis (baixa qualidade), pode-se provocar danos em equipamentos sensíveis, interrupção de processos e outras anomalias que representam prejuízos financeiros para o consumidor. Por isto, existe uma grande preocupação com os diversos aspectos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Este tema tem se tornado cada vez mais importante, principalmente devido ao fato das indústrias possuírem cargas de natureza intrinsecamente perturbadoras e também pela proliferação destas cargas não lineares nos setores comercial e residencial. Em especial, o setor industrial está ligado à rede de distribuição, sujeito às normas específicas do setor elétrico, muitas vezes sem atender as especificidades da indústria e do setor elétrico. Assim sendo, torna-se necessário conhecer o perfil de cada segmento desse consumidor, visto que os mesmos apresentam características específicas em relação ao comportamento da energia elétrica.

No Brasil, a agência nacional de energia elétrica (ANEEL) estabelece normas sobre os procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST). O Módulo 8 do PRODIST, em vigência desde 01/02/2012, tem-se preocupado em estabelecer os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia elétrica.

Um ramo industrial de grande destaque na economia é o da indústria metalúrgica, que na maioria utilizam máquinas de soldagem no seu processo produtivo. Entender como se comportam essas cargas elétricas ao longo do tempo torna-se interessante na medida em que contribui no sentido de prever, restringir e até mesmo antecipar prováveis perturbações à rede elétrica.

O setor de soldagem é um dos que mais cresce no Brasil. Uma empresa fornecedora de oxigênio e gases de soldagem informa em seu site que nos últimos cinco anos tem tido

um crescimento considerável neste setor, principalmente em relação às indústrias de base naval, mineração, siderúrgica e de açúcar e álcool, as quais fizeram importantes investimentos, tanto em novos equipamentos, quanto na manutenção dos ativos (MONTEIRO, 2012). Informa também que, neste mesmo período houve forte investimento em novos equipamentos e no treinamento de mão de obra, não disponível no País. Porém, somente duas concessionárias de energia elétrica (CPFL e ELEKTRO), possuem normas que estabelecem critérios e limites quantitativos a serem utilizados quando da ligação, no sistema de distribuição, de consumidores possuidores de máquinas de soldagem a fim de assegurar a manutenção da qualidade do fornecimento a todos os demais consumidores. Estas concessionárias estabelecem modelos de cálculo com a finalidade de quantificar os efeitos causados por esta carga nas redes de distribuição.

Diante deste quadro, ou seja, do efetivo crescimento do setor industrial na área de soldagem e da necessidade das agências reguladoras do setor elétrico em estabelecer normas, procedimentos, critérios e recomendações devido à possibilidade de uma má qualidade da energia gerada por instalações industriais com cargas elétricas perturbadoras à rede elétrica, esta tese tem como objetivo geral apresentar um estudo do comportamento de uma unidade industrial com máquinas de soldagem, analisando os efeitos causados por este tipo de carga, de caráter intermitente e aleatório à rede elétrica, a fim de elucidar as causas destas perturbações e proporcionar uma ferramenta de simulação que efetivamente contribua na possível solução atual ou em futuras soluções.

1.2 Etapas Metodológicas

Esta tese propõe desenvolver um modelo para simulação do arco elétrico de soldagem para o processo MIG/MAG (o de maior aplicação na indústria metal-mecânica). Procurar-se-á modelar também o circuito eletromagnético da máquina de soldagem convencional ou analógica. A seguir, deve-se associar o modelo do arco elétrico (tido como a carga elétrica para a máquina de soldagem) com o modelo eletromagnético da máquina de soldagem. Esta associação de modelos tem por finalidade obter o comportamento das correntes e tensões instantâneas na entrada da máquina de soldagem e no arco elétrico, dando condições para que estes dados sejam suficientes a qualificar e quantificar os efeitos do processo e soldagem MIG/MAG sobre a Qualidade da Energia elétrica (QEE).

Planeja-se ainda criar uma sistemática para simular várias máquinas de soldagem em funcionamento. Para cada máquina de soldagem, deve-se inicialmente caracterizar o modo de transferência metálica e o tempo de funcionamento. Em cada simulação deve ser

permitindo observar e armazenar os oscilogramas de corrente e tensão, sendo estes na entrada do transformador e no arco de soldagem, a fim de permitir a observação das perturbações no ponto de entrega da alimentação de cada máquina e também no ponto de entrega do fornecimento energia da concessionária.

Desta forma, espera-se obter um melhor entendimento do comportamento de uma máquina de soldagem, através de suas particularidades, tais como, o modo de transferência metálica e a característica intermitente de seu acionamento. Objetivamente, tem-se a pretensão de vislumbrar a ocorrência de uma situação mais abrangente, servindo como base de informações para a melhoria das instalações industriais e, por conseguinte na QEE na rede elétrica da concessionária.

A seguir são apresentadas as descrições de cada etapa propostas para a obtenção dos objetivos propostos

1ª etapa

- Encontrar na literatura um modelo dinâmico para o arco de soldagem do processo MIG/MAG que seja possível a implementação em um *software* comercial;
- Realizar a modelagem completa de uma máquina de soldagem analógica composta por um transformador trifásico e um retificador não controlado o qual recebe a conexão do modelo do arco de soldagem como a carga elétrica. Nesta simulação deve-se contemplar a possibilidade da entrada cada parâmetro necessário à simulação do arco de soldagem (ex. tensão em vazio, características do arame-eletrodo, distância bico de contato-peça, resistências e indutâncias do circuito de soldagem, possíveis perturbações nas variáveis do sistema, entre outros) e do circuito eletromagnético da máquina de soldagem (ex. parâmetros do transformador: potência, tensão primária e secundária, resistências, indutâncias, entre outros).

2ª etapa

- Realizar ensaios com o processo de soldagem MIG/MAG nos modos de transferência metálica por curto-circuito, globular, goticular e pulsado;
- Confrontar os resultados obtidos experimentalmente e simulados, para uma máquina de soldagem, em todos os modos de transferência metálica, a fim de validar o modelo completo. As grandezas utilizadas como forma de comparação entre os dados experimentais e simuladas são as tensões e correntes do arco de soldagem, as tensões e correntes instantâneas na entrada da rede elétrica (entrada do transformador), bem como seus espectros de frequência.

3ª etapa

- Realizar simulações de uma unidade industrial contendo várias máquinas de soldagem, sendo que cada carga apresenta um modo de transferência metálica previamente estabelecida com operação aleatória. Todos os parâmetros do sistema elétrico devem ser inseridos no programa, ou seja, desde a fonte fornecedora de energia, cabos da rede de distribuição e o transformador da subestação da unidade industrial (no secundário do transformador está o denominado ponto de acoplamento comum (PAC)). Cada máquina de soldagem deve ser configurada para estabelecer o processo MIG/MAG com um pré-determinado modo de transferência (curto-circuito, globular, goticular ou pulsado) com tempo de operação aleatório.

1.3 Contribuições esperadas da tese

A originalidade desta tese se sustenta no fato de que pouca dedicação tem-se dado na literatura ou nas normalizações ao estudo específico à soldagem a arco. A constatação dos distúrbios sobre a QEE provocada pelos processos de soldagem pode permitir que regulamentações do sistema elétrico fossem mais bem sucedidas nos seus desígnios. Em novas instalações industriais ou ampliações, as mesmas já poderiam ser realizadas sob o novo prisma, ou seja, objetivando as devidas correções ou adequações. As aquisições de novos equipamentos de soldagem já poderiam ser realizadas sob a ponderação do rendimento elétrico e dos efeitos que equipamentos específicos causariam sobre a QEE.

Uma vez constatada a significativa influência dos processos de soldagem sobre a QEE, benefícios expressivos podem ser obtidos frente ao grande número (e crescente) de empresas empregando soldagem a arco. A ABNT, por exemplo, poderia propor metodologias para mensurar o rendimento elétrico e os efeitos sobre a QEE das máquinas de soldagem, proporcionando os caminhos necessários para que os fabricantes pudessem melhorar e/ou aperfeiçoar os seus produtos. Assim sendo, o consumidor seria beneficiado diretamente por ter uma ferramenta de comparação entre diversos fornecedores no momento da compra ou editais. O alcance dessa meta poderá abrir caminho para se criar uma nova categoria específica entre as máquinas de soldagem, por exemplo, um selo de qualidade da energia elétrica (ProQEE) semelhante ao selo do Procel. Com esta atitude, essa norma beneficiará as concessionárias de energia elétrica, os usuários de máquinas de soldagem bem como os demais consumidores.

Tendo contextualizado o tema e estabelecidas às diretrizes que norteiam a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, assim como os alcances do uso dos resultados previstos, esta tese visa apresentar as seguintes contribuições:

- Uma metodologia para a simulação de uma máquina de soldagem implementada em um *software* comercial tendo como parâmetros de entrada a tensão a vazio, as tensões anódica e catódica, à distância bico de contato a peça, a velocidade de alimentação do arame-eletrodo, as resistências e indutâncias do circuito, o diâmetro do eletrodo, entre outros;
- Um procedimento para a análise dos índices de QEE (avaliados através da sensação instantânea de *flicker*, índice de severidade de *flicker* ou severidade de curta duração, harmônicos e inter-harmônicos) através dos espectros de frequência da tensão instantânea oriundos de simulação de uma máquina de soldagem, contemplando os diversos modos de transferência metálica;
- Por fim, a criação de uma ferramenta computacional que avalie os impactos causados por uma unidade industrial no PAC proporcionado pelos distúrbios causados pelo acionamento de várias máquinas de soldagem trabalhando simultaneamente e de forma aleatória.

1.4 Estrutura da tese

Uma revisão bibliográfica dos princípios básicos que envolvem os fundamentos dos processos de soldagem e da QEE são apresentados no Capítulo 2. Inicialmente são abordadas as modelagens para o arco elétrico de soldagem considerando o processo MIG/MAG, bem como as influências das variáveis ou parâmetros no modelo do arco. São também verificadas algumas topologias das fontes ou máquinas de soldagem. A seguir é realizado um resumo dos índices sobre a QEE frente às perturbações na rede elétrica, dando enfoque à flutuação de tensão (cintilação luminosa ou efeito *flicker*), ao medidor *flickermeter*, e aos harmônicos e inter-harmônicos gerados pelas máquinas de soldagem.

A simulação de uma máquina de soldagem analógica juntamente com a carga elétrica, ou seja, o arco elétrico de soldagem é apresentado no Capítulo 3.

Os Capítulos 4 e 5 apresentam respectivamente os ensaios experimentais para cada modo de transferência metálica citado anteriormente e a análise do desempenho computacional para a validação do modelo de uma fonte de soldagem com cada carga.

No Capítulo 6, apresentam inicialmente a simulação de duas ou mais máquinas de soldagem com modos de transferência diversos. Esta possibilidade de simulação permite a

compreensão do comportamento das correntes e tensões em relação aos índices da qualidade de energia elétrica no PAC. Finalmente a simulação de uma unidade industrial com várias máquinas de soldagem é analisada.

No Capítulo 8 é apresentada a conclusão do trabalho, ou seja, o que seu desenvolvimento permitiu atingir em relação aos objetivos propostos.

Na sequência são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

Por se tratar de um tema que abrange o conhecimento envolvendo os processos de soldagem MIG/MAG, sendo este o possível causador de problemas relacionados à má qualidade da energia elétrica (cintilação luminosa ou efeito *flicker* devido a flutuação de tensão e geração de frequências inter-harmônicas), tem-se a seguir a intenção de apresentar uma breve revisão sobre os temas acima mencionados.

2.2 - Descrição do processo de soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG possibilita a união entre metais principalmente devido à energia gerada pelo efeito Joule (decorrente do fluxo de corrente elétrica através do eletrodo) e pelo calor imposto pelo arco elétrico (mantido entre o eletrodo no consumível e a peça). Nos procedimentos de soldagem, o arco elétrico, o metal fundido na ponta do eletrodo e a poça de fusão, são protegidos por uma atmosfera de gás inerte (Ar, He) ou ativo (CO₂) ou mistura deles (no caso, incluindo como gás ativo o O₂ e o N₂). O processo é denominado MIG (advindo do inglês - *Metal Inert Gas*) se o gás de proteção utilizado for inerte ou denomina-se MAG (advindo do inglês - *Metal Active Gas*) se o gás de proteção for ativo. O gás de proteção tem também a função de ser um meio ionizante, conferindo as propriedades de estabilidade do arco e influenciando a transferência metálica, consumo e fusão do metal de base (SCOTTI; PONOMAREV, 2008; MARQUES; MODENESI, 2009).

A Figura 2.1 mostra simplificada os equipamentos básicos de um processo MIG/MAG, sendo estes uma máquina de soldagem (alguns autores preferem denominar como fonte de soldagem), uma tocha de soldagem, uma fonte de gás protetor (ou gases misturados), um alimentador do arame-eletrodo e um sistema de refrigeração. Na Figura 2.1

exemplifica-se a presença do arco elétrico de soldagem, da transferência metálica, bem como a distância bico de contato peça (DBCP).

O eletrodo consumível, denominado de arame-eletrodo, a partir do bico de contato (ponto de contato elétrico do bico com a tocha de soldagem) passa atuar como condutor elétrico. A forma como o metal de adição (arame-eletrodo) se transfere para a poça de fusão se dá principalmente por três mecanismos considerados como naturais: curto-circuito, globular e goticular. O MIG pulsado é outra forma de transferência metálica, com característica controlada, sendo possível de ser realizado apenas através de máquinas de soldagem modernas. Este modo de transferência será abordado em maiores detalhes a seguir.

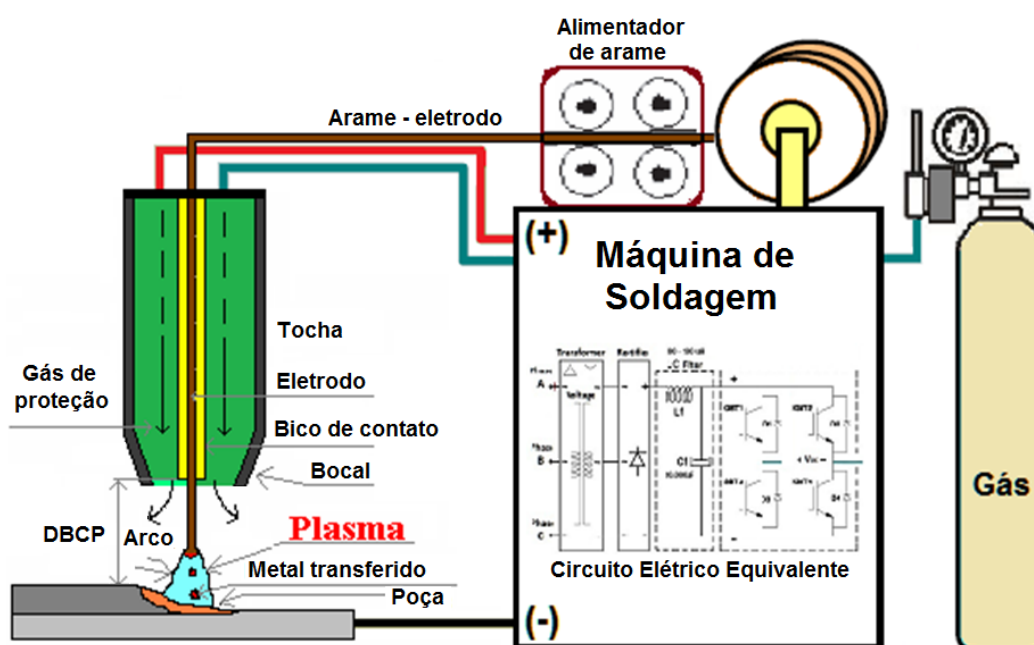


Figura 2.1 - Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG e ilustrações (arco, transferência metálica, poça de fusão, bico de contato, distância bico de contato - peça (DBCP))

2.3 - Tipos de modos de transferência metálica do processo MIG/MAG

A transferência metálica do eletrodo para o metal de base tem no processo MIG/MAG, como em outros processos a arco com eletrodos consumíveis, diversas formas. Estes modos de transferência metálica são definidos pelas diferentes maneiras pelos quais a transferência de metal fundido (gota) ocorre da ponta do eletrodo para a poça de fusão. Existe um grande número de variáveis operacionais que de certa forma afetam o modo de transferência metálica. Assim sendo, várias classificações são apresentadas com a

finalidade de facilitar o entendimento. Scotti (2000) cita e descreve os modos básicos de transferência metálica, a saber, globular, curto-circuito, goticular, goticular com alongamento e rotacional. Descreve ainda sobre a combinação de dois ou mais modos básicos de transferência. A fim de sintetizar todos os modos de transferência metálica atualmente verificada, Ponomarev et al (2009), Scotti; Ponomarev; Lucas (2012) propuseram uma classificação mais abrangente dos tipos de transferência em modos, grupos e classes, conforme mostra a Fig. 2.2.

A seguir, tem-se a descrição do comportamento de cada modo de transferência.

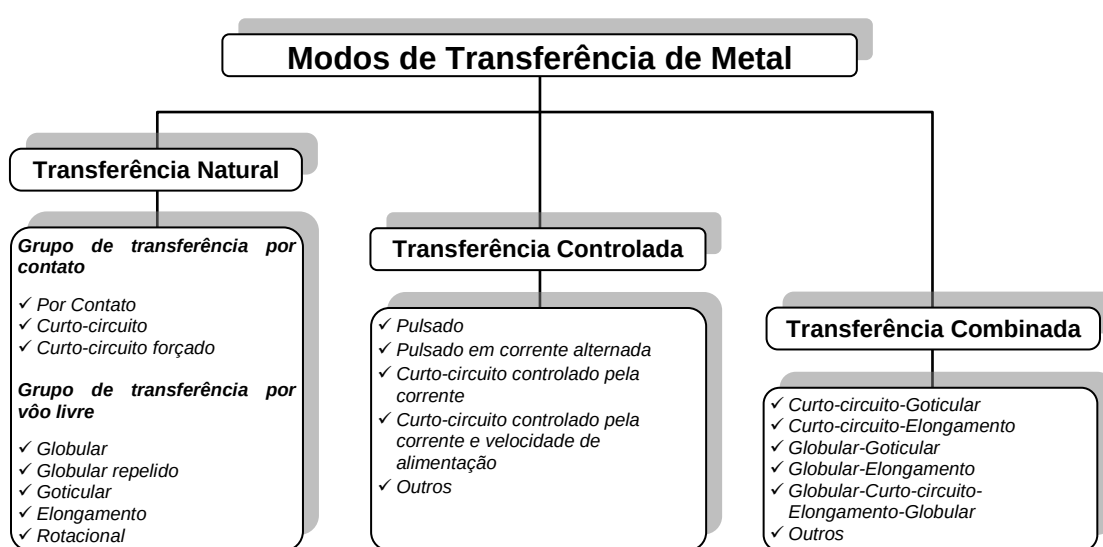


Figura 2.2 - Classificação dos modos de transferência metálica proposta por Ponomarev et al (2009) e Scotti; Ponomarev; Lucas (2012)

2.3.1 Curto-circuito

A transferência por curto-circuito é característica da soldagem com um pequeno comprimento de arco (menores valores de tensão de soldagem). Nesta, o eletrodo toca periodicamente (frequência de curto-circuito entre 20 a 200 Hz) a peça (ou poça de fusão), ocorrendo um curto-circuito. Esta forma de operação é muito usada industrialmente para a soldagem de aços carbono com arames de menor bitola (0,6 a 1,2 mm), com proteção de CO₂ e correntes relativamente baixas, para a soldagem de juntas de pequena espessura e, frequentemente, fora da posição plana. Este modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação, sendo indicado para soldagem de seções finas em todas as posições.

Neste modo de transferência, as gotas tocam a poça de fusão antes de se destacarem e a cada toque ocorre à extinção momentânea do arco e a gota é transferida por tensão superficial. Assim, esta forma de transferência metálica é de natureza aleatória,

ou seja, existe uma variabilidade da duração do período de curto-circuito (variação do tempo de arco aberto, do tempo de curto-circuito ou ambos) e nas formas irregulares das curvas de tensão e corrente de soldagem (valores máximos e mínimos). Esta aleatoriedade é dependente da regulação da indutância e da tensão aplicada, para uma determinada velocidade de alimentação e combinação entre eletrodo e gás de proteção (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Além disto, pode ocorrer curto-circuito do tipo incidental, ou seja, aqueles que possuem variações abruptas de corrente gerando contato do eletrodo com a poça de fusão em um período muito curto de tempo e sem nenhuma transferência de metal, originando altas frequências de curto-circuito.

A Figura 2.3 mostra um ciclo completo dos oscilogramas de tensão e corrente durante a transferência por curto-circuito.

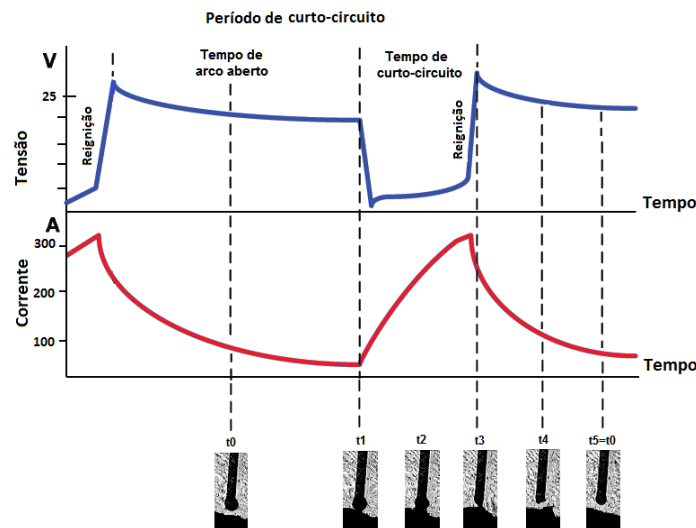


Figura 2.3 – Oscilogramas típicos de tensão e corrente de soldagem em um modo de transferência por curto-circuito (SOUZA, 2010)

O modo de transferência por curto-circuito é fortemente influenciado por algumas características do equipamento. A principal delas é a indutância, devendo ser ajustada adequadamente pois a regularidade do processo de soldagem bem como a formação de respingos está fortemente relacionada à indutância de subida.

As máquinas de soldagem eletromagnéticas realizam o controle da indutância por meio de um indutor ligado em série com o arco. A variação da indutância é alterada pela quantidade de bobinas do indutor, modificando o valor da indutância. Em máquinas modernas, existe um circuito que simula o efeito do indutor (age de forma a variar a taxa de subida e descida da corrente), sendo o valor da indutância regulada eletronicamente por

uma malha de controle, fazendo com que a corrente de saída tenha uma resposta dinâmica idêntica à obtida se houvesse um indutor na saída.

Segundo Roca et al. (2005), as características dinâmicas de tensão e corrente do arco possuem vários índices que influenciam este modo de transferência. Afirmam também que quando a transferência do metal ocorre de maneira uniforme, os oscilogramas de tensão e corrente mantêm um formato regular. Porém, quando a transferência torna-se irregular, ocorre um incremento dos salpicos, sendo então irregulares as formas de ondas dos sinais de tensão e corrente.

Neste modo de transferência, a regularidade do processo de soldagem, bem como a formação de respingos, está fortemente relacionada à indutância de saída. O ajuste da indutância não evita a ocorrência de respingos, apenas contribui para achar o ponto de operação, onde os mesmos são minimizados.

2.3.2 Globular

Este modo de transferência tradicionalmente é caracterizado por algumas características, sendo estas ausências de curtos-circuitos, correntes baixas e moderadas, tensões mais elevada do que no curto-circuito, o tamanho da gota excede o diâmetro do arame (antes do destacamento), é instável e possui uma excessiva geração de respingos, a transferência da gota se dá basicamente por ação gravitacional. Contudo, este tipo de transferência é pouco pretendido na soldagem.

A Figura 2.4 mostra uma sequência de gotas durante o modo de transferência globular. Verifica-se também a inexistência de contato do eletrodo com a poça de fusão e a característica do diâmetro da gota superior ao do eletrodo.

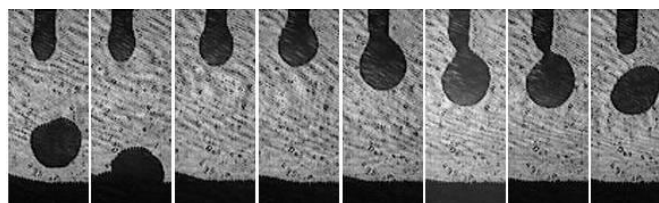


Figura 2.4 – Gotas durante a transferência no modo globular (SOUZA, 2010)

2.3.3 Goticular

Para que ocorra a mudança do modo de transferência por curto-circuito ou globular para o goticular, é necessário que a corrente de soldagem seja superior a um nível de corrente denominado de corrente de transição (i_t). Neste caso, a taxa de transferência de gotas aumenta de umas poucas para centenas por segundo e os tamanhos das gotas

diminuem. A corrente de transição é aquela acima da qual as forças eletromagnéticas são suficientemente grandes para vencer a força produzida pela tensão superficial, produzindo o destacamento da gota para a poça de fusão. Diversos fatores contribuem para a mudança da faixa de transição, como o gás de proteção, DBCP e a extensão energizada, diâmetro, composição e revestimento do arame-eletrodo (SOUZA, 2010).

Este modo de transferência é caracterizado pela ausência de respingos, por possuírem altas tensões e correntes de soldagem (acima da corrente de transição) e por terem gotas com diâmetros menores que do eletrodo, sendo transferidas a uma alta taxa de fusão. Por isto é empregadas em soldagens de chapas grossas na posição plana. A Figura 2.5 mostra uma sequência de gotas durante o modo de transferência goticular, verificando-se também a inexistência de contato do eletrodo com a poça de fusão e a característica do diâmetro da gota inferior ao do eletrodo.

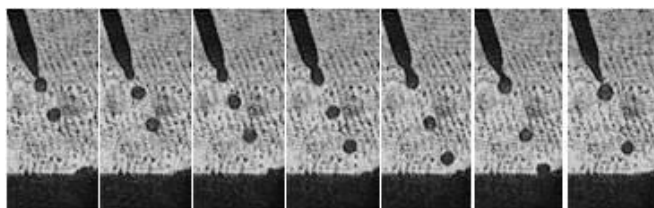


Figura 2.5 – Gotas durante a transferência no modo goticular (SOUZA, 2010)

2.3.4 MIG Pulsado

Este modo de transferência surgiu com uma expectativa de aliar as melhores características dos modos de transferências por curto-circuito (baixa corrente, menor aporte térmico e com possibilidade de soldagem em chapas finas) e goticulares (alta produtividade, menor quantidade de respingo, bom acabamento do cordão de solda e maior estabilidade do arco). O objetivo deste modo de transferência é obter a transferência goticular durante os pulsos de alta corrente enquanto se mantém um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição. Isto é obtido através da modulação da corrente em dois níveis: corrente de base (I_b) e corrente de pulso (I_p) nos períodos tempo de base (t_b) e o tempo de pulso (t_p), respectivamente. A frequência de pulso (f_p) é o inverso do período de pulso (soma dos tempos de base e de pulso) conforme mostra a Equação 2.1. Segundo Galhardo e Verdelho (1999), a frequência de pulso pode variar entre 10 Hz a 300 Hz. A corrente média (I_m) e o fator de trabalho (FC) são dados pelas Equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$f_p = \frac{1}{t_b + t_p} \quad (2.1)$$

$$I_m = \frac{I_b \cdot t_b + I_p \cdot t_p}{t_b + t_p} \quad (2.2)$$

$$FC = \frac{t_p}{t_b + t_p} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

A Figura 2.6 mostra esquematicamente a forma de onda da corrente do processo MIG pulsado (PALANI; MURUGAN, 2006; PRAVEEN; YARLAGADDA; KANG, 2005). Em alguns casos práticos, não se consegue uma forma perfeitamente retangular, conforme mostra essa figura. Neste caso, formas de onda mais prováveis, mesmo que ainda simplificando, seriam a trapezoidal ou exponencial. Para estes formatos, alguns pesquisadores apresentam outros valores de corrente média, diferente da Equação 2.2 (BÁLSAMO; VILARINHO; SCOTTI, 2002, MOTA, 2002, SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

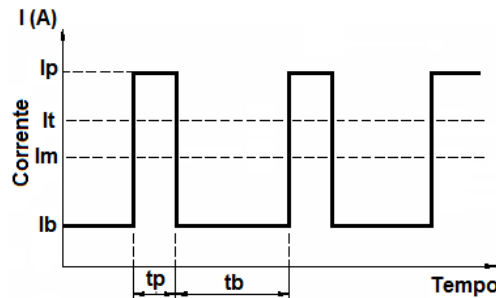


Figura 2.6 – Esquemática do processo MIG pulsado

Scotti e Ponomarev (2008) citam que o maior problema (desvantagem) em se utilizar tal processo é resultante da dificuldade de obter parâmetros adequados e pela qualificação dos soldadores. Os parâmetros devem estar de acordo com o tipo de material empregado, diâmetro do eletrodo, comprimento do eletrodo e misturas do gás de proteção.

2.4 - Modelagem do arco elétrico

O arco elétrico pode ser classificado por suas características aleatórias (natureza) ou por estarem associados a aplicações específicas (ex. soldagem elétrica e sistemas de potência). Os arcos de caráter aleatório são aqueles relacionados a fenômenos naturais ou

aqueles relacionados com alguns acontecimentos que ocorrem no sistema elétrico, devido a perturbações que geram sobretensões ou perda de isolamento em alguma parte do sistema. Alguns arcos elétricos específicos podem estar associados a aplicações relacionadas a manobras ou atuação de dispositivos elétricos.

Na literatura, encontram-se diversos estudos do arco elétrico em diferentes situações, por exemplo, em equipamentos utilizados nos sistemas elétricos (ex. equipamentos de manobra e proteção de sistemas elétricos) em grandes siderúrgicas (ex. fornos a arco), em processos de fabricação (ex. soldagem), entre outros.

Em equipamentos utilizados no sistema elétrico, como por exemplo, em disjuntores, a maioria dos modelos encontrados na literatura técnica tem optado por uma modelagem matemática relativamente simplificada. No caso dos fornos a arco, os modelos matemáticos empregados utilizam equações diferenciais para representar o comportamento do arco elétrico, sendo os principais modelos desenvolvidos por *Cassie* e *Mayr* citados por Tseng; Wang; Vilathgamuwa, 1997 e Gustavsson, 2004.

2.4.1 - Arco elétrico em fornos

Em estudos de fornos a arco, os fatores que afetam a operação são os materiais, as etapas de fusão e refino, a posição do eletrodo, o controle do braço do eletrodo, a tensão e a impedância do sistema de alimentação.

Em geral, os modelos já criados podem ser classificados pelo domínio no tempo (resistência não linear pelo método de *Mayr* e aproximação não linear das características $v - i$), como os propostos por Plata e Tacca (2005) e Vervenne; Reusel; Belmans (2007), pelo domínio da frequência (que representam a tensão e a corrente do arco por seus componentes harmônicos) e pelo método do balanço de energia (equação diferencial não linear do raio do arco e a corrente de arco), como citado por Vervenne; Reusel; Belmans (2007).

Outros autores (SOUSA et al., 2005; OZGUN; ABUR, 2002; GOLKAR; BINA; MESCHI, 2007) propõem a modelagem de um forno a arco elétrico utilizando a teoria do caos (obtém-se um modelo que associa a característica estocástica e de não linearidade) juntamente com um conjunto de equações diferenciais que descrevem seu comportamento. A tensão do arco é simulada a partir da solução das equações diferenciais que reproduzem as características dinâmicas, determinística, não linear e multivalores da corrente e tensão do sistema do forno a arco. É imposta sobre este sistema uma modulação de característica caótica de baixa frequência, obtida a partir do circuito de *Chua*, com o intuito de simular a ocorrência do efeito *flicker* (CHO et al., 2008).

Mas devido à primazia da tese, o estudo do arco elétrico no forno não será tratado

com maiores detalhes. Apenas o arco elétrico de soldagem será abordado com maiores detalhes, conforme Item a seguir.

2.4.2 - Arco elétrico em soldagem

Segundo Modenesi (2009), o arco elétrico é a fonte de calor mais comumente utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, apresentando uma combinação ótima de características que incluem uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores. A literatura sobre este assunto é bastante extensa, devido à grande importância da física do arco.

As Figuras 2.7 (a) e (b) mostram a distribuição das quedas de tensão nos arcos elétrico de soldagem de uma forma global. Geralmente a queda de tensão no arco se dá em três regiões distintas, a saber, na região anódica, na região catódica (ambas correspondem a finas camadas existentes na interface entre os eletrodos e a coluna do arco elétrico com espessuras da ordem de 10^{-6} m) e na coluna do arco (corresponde à maior queda de tensão). A Figura 2.7(c) apresenta o perfil elétrico de um arco de soldagem de forma mais detalhada, verifica-se que a tensão no arco é composta pelo somatório das quedas de tensão ao longo do eletrodo, da gota em transferência e da coluna do arco. Na representação em um circuito elétrico equivalente, as quedas de tensão podem ser representadas por resistências elétricas (SCOTTI; PONOMAREV; RESENDE, 2006, SCOTTI; PONOMAREV, 2008), apesar de não corresponderem à realidade física.

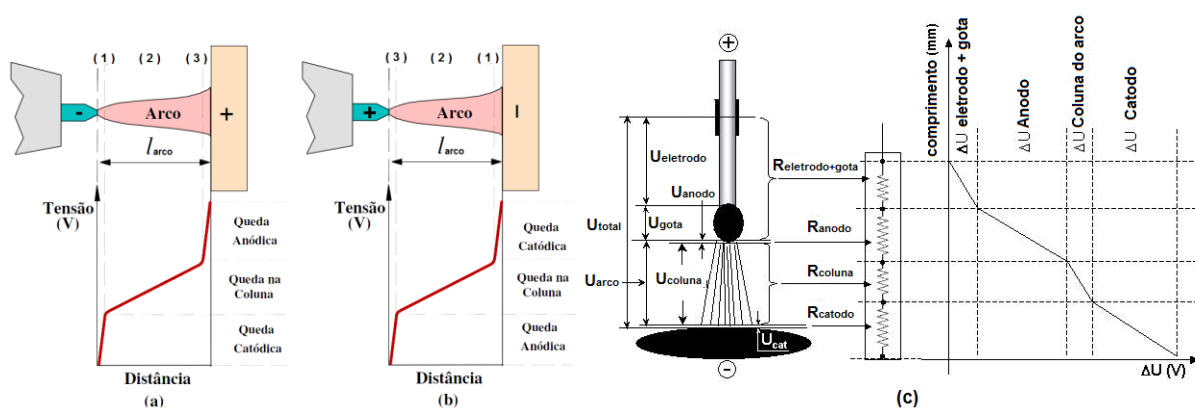


Figura 2.7 – Distribuição esquemática do potencial em um arco e suas regiões: (a) Polaridade direta; (b) Polaridade inversa (MODENESI, 1990, 2007); e (c) Resistências e quedas de tensão no eletrodo, gota, anodo, catodo e coluna do arco (SCOTTI; PONOMAREV; RESENDE, 2006, SCOTTI; PONOMAREV, 2008)

A compreensão do comportamento da tensão no arco é fundamental, pois sobre o mesmo está a maior parte da tensão do circuito elétrico de soldagem. Para o modo de tensão constante ou corrente constante, a tensão no arco é fundamental para a determinação da corrente ou tensão, respectivamente (BINGUL, 2000).

A Tabela 2.1 apresenta de forma resumida as diversas expressões para a tensão no arco proposta por diversos autores. A Equação para a tensão no arco proposta nesta tese segue a apresentada por Terasaki e Simpson (2005) e Ngo et al. (2007), porém, acrescida de uma resistência que representa o contato entre o eletrodo e a poça de fusão, com o propósito de variar a tensão mínima no instante de curto-circuito.

Tabela 2.1 - Resumo das equações obtidas na literatura para a tensão no arco de soldagem

Equação para V_{arco}	Fonte
$15,94 + 0,515.l_{arco} + (1,1 + 0,187.l_{arco})10^{-2}i$ $+ (18,807 - 0,937l_{arco})10^6 e^{-0,086I}$	Bingul (2000)
$14 + 118,6 \left\{ \exp \left[-0,0857 (l_{arco} + 1,054) \right] - 1 \right\} e^{\left[-0,000487(i+349,2) \right] - 1}$	Xu; Rados; Simpson (1999)
$A_1 + B_1.i + (C_1 + D_1.i).l_{arco}$	Choi; Lee; Yoo, 2001
$A_2 + B_2.i + \frac{(C_2 + D_2.l_{arco})}{i}$	Terasaki e Simpson (2005)
$A_3 + B_3.i + (C_3 + D_3.i).l_{arco}$	Terumi; Kazuo et al. (2002)
$A_4 + B_4.i + C_4.e^{D_4.i}$	Bingul (2002)
$E_a.l_{arco} + \varepsilon.V_{ac} + \varepsilon.R_{arco}.i$	Terasaki e Simpson (2004) e Ngo et al. (2007)
$E_a.l_{arco} + \varepsilon.V_{ac} + \varepsilon.R_{arco}.i + R_c(1 - \varepsilon).i$	Silva et al. (2011)

Nas duas últimas equações da Tab. 2.1, observa-se a utilização de um denominador fator chave (ε) que é uma variável condicional utilizada para considerar a energia nula no momento do curto-circuito, sendo empregada também por outros autores (NGO et al., 2007, SANTANA; MODENESI, 2009). No entanto, alguns autores preferem não incluir o fator chave, dificultando este entendimento. O fator chave torna-se nulo apenas quando o comprimento do eletrodo energizado é igual à DBCP, tornando-se unitário em qualquer outra condição o valor, ou seja:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0 & \rightarrow (l_e = \text{DBCP}) \text{ curto-circuito} \\ 1 & \rightarrow (l_e < \text{DBCP}) \text{ arco aberto} \end{cases}$$

As constantes A_x , B_x , C_x e D_x , com índices 1 a 4, são obtidas de forma empírica, sendo dependentes das condições operacionais. A Tabela 2.2 apresenta os valores para as constantes A_1 , B_1 , C_1 e D_1 (Santana. 2010).

Tabela 2.2 - Valores das constantes A_1 , B_1 , C_1 e D_1 (SANTANA, 2010)

Arame [mm]	A_1 [V]	B_1 [V]	C_1 [V]	D_1 [V]	Fonte
1,2	15,1	0,0212	0,992	0,011	Fugimura; Ide; Inoue, (1998)
1,2	16,24	0,02376	0,553	$6,395 \cdot 10^{-4}$	Choi; Lee; Yoo, (2001)

2.5 Modelo dinâmico do conjunto máquina eletromagnética e arco de soldagem

A Figura 2.8 mostra uma representação simplificada de um circuito elétrico equivalente de uma máquina de soldagem eletromagnética ou analógica (processo de soldagem MIG/MAG) com as variáveis do processo. Observando a Fig. 2.8, pode-se obter a distancia bico de contato-peça (DBCP) pela soma dos comprimentos do eletrodo energizado e do comprimento do arco, conforme Equação 2.4.

$$DBCP = l_{arco} + l_e \text{ [m]} \quad (2.4)$$

No processo de soldagem MIG/MAG, a taxa de variação do comprimento do eletrodo no tempo é dada pela relação entre a velocidade de alimentação (f - variável pré-regulada pelo operador para a realização da soldagem), a taxa de fusão do arame (W - depende da energia fornecida ao arame na forma de calor) e taxa de variação da DBCP no tempo (v_c - mesmo num processo automatizado, não consegue manter a DBCP constante em todo instante devido até oscilações naturais da poça, imperfeições na chapa, etc.), conforme Equação 2.5 (TIPI, 2010a, 2010b).

$$\frac{dl_e}{dt} = f - W + v_c \text{ [m/s]} \quad (2.5)$$

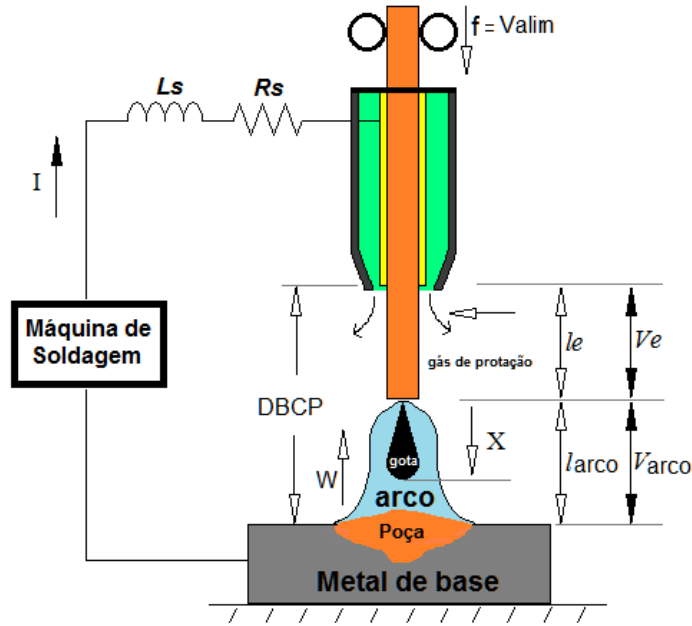


Figura 2.8 – Circuito elétrico equivalente do processo de soldagem MIG/MAG, com a máquina (L_s - indutância interna da máquina de soldagem; R_s - resistência elétrica interna da máquina de soldagem) e algumas variáveis do processo de soldagem ($DBCP$ – distância bico de contato-peça, l_{arco} - comprimento do arco; l_e - comprimento energizado do arame ou comprimento do eletrodo, f - velocidade alimentação; W - taxa de fusão ou consumo; V_e – queda de tensão ao longo do eletrodo; V_{arco} – queda de tensão ao longo do arco)

A taxa de fusão (consumo) do arame-eletrodo dado pela Equação 2.6 (derivada da equação geral de consumos, citada largamente na literatura, como em SUBAN; TUSEK, 2001, MODENESI; REIS, 2007) e é composta pelo efeito de duas fontes de calor, o primeiro termo representando o aquecimento do eletrodo devido o arco elétrico e o segundo representando o aquecimento devido ao efeito Joule.

$$W = \alpha \cdot I \cdot \varepsilon + \beta \cdot l_e \cdot I^2 \quad [\text{m/min}] \quad (2.6)$$

Os coeficientes α e β da Equação 2.6 são quantificados conforme Equação 2.7 (LANCASTER, 1986, MODENESI; REIS, 2007).

$$\alpha = \frac{\kappa_A}{\rho A (\Delta H_{total})} \quad [\text{mm/s.A}] \quad \beta = \frac{\kappa_j}{\rho A^2 (\Delta H_{total})} \quad [1/\text{s.A}^2] \quad (2.7)$$

Sendo:

κ_A - tensão anódica [V];

κ_j - resistividade elétrica do arame-eletrodo, dependente da sua composição

química e da distribuição de temperatura ao longo do eletrodo durante a soldagem [$\Omega \text{ m}$];

ρ - Densidade do arame-eletrodo [kg/m^3];

A - Área da seção transversal do arame-eletrodo [m^2];

ΔH_{total} - Entalpia total contida no metal de adição no momento que a gota é destacada do arame-eletrodo [J/kg].

Suban e Tusek (2001) comprovaram experimentalmente que o coeficiente α , em uma primeira aproximação, dependente da corrente de soldagem, da composição do gás de proteção, do comprimento e tensão do arco e das condições superficiais do arame e a geometria da junta. O coeficiente β , por sua vez, representa a contribuição do efeito Joule no arame-eletrodo para a sua fusão e, portanto, depende principalmente da composição, do diâmetro e das condições de encruamento do arame. Os mesmos autores desenvolveram um modelo matemático a fim de comparar a taxa de fusão para 4 tipos de gases de proteção empregando arame maciço e tubular. Verificaram a influência do comprimento do eletrodo na taxa de fusão e observaram que o aumento da corrente e do comprimento energizado de eletrodo aumenta a taxa de fusão de forma similar, para ambos os arames-eletrodos. Observaram que, para correntes abaixo de 200 A, a taxa de fusão é menos afetada, em decorrência da mudança no comprimento energizado de eletrodo.

A partir do circuito equivalente da Fig. 2.8, Santana (2010) apresenta o modelo dinâmico do conjunto da fonte juntamente com o arco elétrico de soldagem através de uma equação diferencial (Equação 2.8). A esta equação diferencial é acrescida uma resistência que considera o contato entre arame-eletrodo e metal de base (R_c), o qual não é proposta por Santana (2010).

$$\frac{di}{dt} = -\frac{1}{L} \left[\underbrace{(R_f + R_b + R_e + M)}_{R_t} . i + \underbrace{E_a . I_{arco} + \varepsilon . V_{ac} + \varepsilon . R_{arco} . I + R_c . (1 - \varepsilon) . i - V_{cir}}_{V_{arco}} \right] \quad (2.8)$$

$$R_t = (R_f + R_b + R_e) \quad (2.9)$$

Sendo:

L - soma das indutâncias da fonte e do cabo [Vs/A];

V_{ac} - queda de tensão anódica-catódica [V];

V_{cir} - tensão em vazio da fonte [V];

R_t - somatório de resistências consideradas no circuito [Ω];

R_f - resistência parasita do circuito elétrico do processo MIG/MAG [Ω];

R_b - resistência entre o bico de contato e o arame-eletrodo [Ω];

d_e - diâmetro do arame-eletrodo [m];

ρ_e - resistividade de arame-eletrodo [$\Omega \cdot m$];

A_e - área da seção do arame-eletrodo $A_e = \pi \cdot d_e^2 / 4$ [m²];

R_e - resistência do eletrodo, sendo: $R_e = \rho_e \cdot l_e / A_e$ [Ω];

R_c - resistência de contato entre arame-eletrodo e metal de base [Ω];

R_{arco} - resistência do arco [Ω];

M - inclinação da característica estática da máquina [V/A];

E_a - campo elétrico na coluna do arco [V/mm].

O modelo dinâmico que representa o comportamento do processo MIG/MAG nos modos de transferência curto-circuito, globular e goticular é basicamente composto pelas equações diferenciais apresentadas como Equações 2.5 e 2.8.

A partir da solução destas equações, pode-se obter o comprimento do eletrodo energizado (l_e) e a corrente no arco (I). O comprimento do arco elétrico de soldagem (l_{arco}) é determinado pela simples subtração da DBCP ao valor de l_e .

O comportamento da tensão de saída (eficaz) em relação à corrente de soldagem (eficaz) pode ser constatado através da inclinação entre estas variáveis, o qual corresponde à característica estática da máquina de soldagem (a característica dinâmica de uma máquina de soldagem é observada pelo comportamento da tensão e da corrente em relação ao tempo). Os fabricantes de máquinas de soldagem geralmente fornecem em seus manuais as características estáticas. Existem duas classificações de curva característica estática, a saber, corrente constante (CC) e tensão constante (VC), como ilustrado pela Figura 2.9. Nas máquinas modernas as características estáticas são ideais, sendo limitadas apenas pela potência máxima, corrente média e tensão máxima.

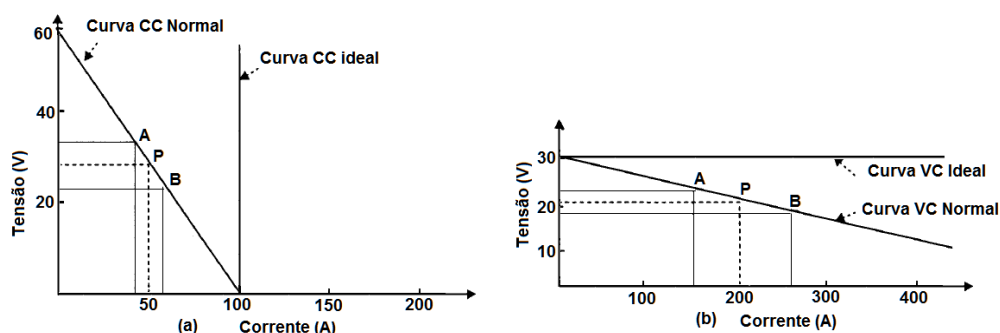


Figura 2.9 – Característica estática típica de uma máquina de soldagem: (a) corrente constante (CC); (b) tensão constante (VC) (adaptada de Naidu; Ozcelic; Moore, 2003)

Em corrente constante, a máquina fornece uma tensão em vazio (V_{cir} , tensão na ausência de carga) relativamente alta, porém essa tensão cai rapidamente durante a operação. Neste caso, são fornecidas correntes praticamente constantes, não importando a carga conectada a elas. Considera-se nestes casos uma variação maior que 7V/100A (na faixa de 20 a 30 V maior que 20V/100A).

Em tensão constante, a máquina de soldagem apresenta uma tensão praticamente constante ao longo de toda a curva, não importando a carga que seja conectada a ela, tendo-se uma variação menor que 7V/100A (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Estas variações (afastamento da condição ideal) são inerentes aos transformadores. Mas as fontes eletrônicas podem, frequentemente, produzir saídas ideais, ou seja, apresentam uma queda nula de tensão em relação à corrente (0V/A) quando operando em tensão constante ou queda infinita (curva característica perpendicular ao eixo da corrente) quando operando em corrente constante (SCOTTI; PONOMAREV, 2008, SANTANA, 2010).

2.5.1 Comportamentos do modelo para os períodos de arco aberto e curto-circuito

Considerando apenas o modo de transferência por curto-circuito, alguns autores realizam a análise do comportamento do modelo do arco de soldagem em estágios ou etapas, ou seja, os períodos de arco aberto e de curto-circuito. Segundo Tipi (2010a), a Fig. 2.10(a) apresenta três estágios contínuos e um critério para o destacamento da gota no período do arco. O primeiro estágio ocorre durante o crescimento da gota, o segundo quando o eletrodo toca o metal de base (ou poça de fusão) e o terceiro não é um estágio permanente (ocorre apenas durante o destacamento da gota). Neste período, algumas variáveis não são consideradas, retornando apenas nos períodos de arco.

Tipi (2010a, 2010b) utiliza um modelo dinâmico considerado mais completo para o processo MIG/MAG, visto que incorpora as forças atuantes nos processo (força

eletromagnética, força superficial, força gravitacional). Três condições são utilizadas para o modo de transferência por curto-circuito:

- 1) Quando a DBCP é inferior à extensão do eletrodo somada ao comprimento da gota;
- 2) Quando o diâmetro da ponte do metal fundido é inferior a um limiar fixado pelas características elétricas e mecânicas do metal;
- 3) No período de arco aberto, a tensão superficial da gota é inferior à força total que puxa ou atrai a gota.

Já no trabalho de Planckaert et al. (2006), apenas dois estágios são consideradas, sendo um para o período de arco aberto e outro para o período de curto-circuito. A Figura 2.10 (b) mostra estes estágios.

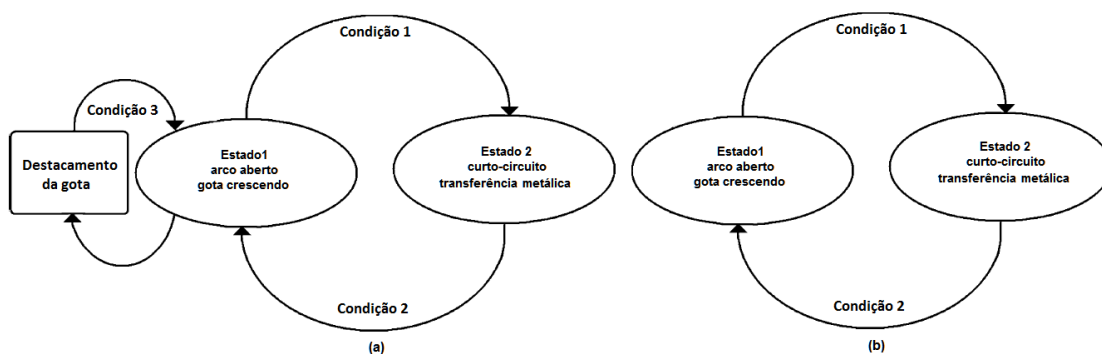


Figura 2.10 – Estados do comportamento da transferência metálica: a) arco aberto, curto-circuito e destacamento da gota (Adaptado de Tipi, 2010a); b) arco aberto e curto-circuito (adaptado de Planckaert et al., 2006)

Comprovadamente as amplitudes das correntes nos períodos de arco aberto e curto-circuito são completamente diferentes. De Scotti; Ponomarev (2008) e Modenesi (2007), deduz-se que o modo de transferência por curto-circuito pode ser analisado como um sistema híbrido, ou seja, separado em dois períodos. Assim sendo, podem-se determinar circuitos equivalentes para cada período estabelecido.

A Figura 2.11 mostra o comportamento da corrente de soldagem nos estados de arco aberto e curto-circuito, bem como a corrente de pico instantânea i_{Smax} (este valor pode variar entre i_{min} e i_{max} , dependendo das circunstâncias ocorridas no curto-circuito). No período de arco aberto, a corrente de soldagem pode atingir um valor mínimo denominado i_{min} , enquanto no curto-circuito a amplitude máxima possível é denominada i_{max} . De acordo com a condição definida (curto-circuito ou arco aberto), pode-se observar

que as amplitudes das correntes ficam dentro de certos limites variáveis (corrente máxima no curto-circuito e corrente mínima com arco aberto).

No curto-circuito a amplitude da corrente aumenta com uma taxa de crescimento, enquanto no tempo de arco aberto existe uma taxa de decrescimento da corrente até uma possível estabilização (caso não ocorra outro curto-circuito e estabeleça outro modo de transferência – globular ou goticular). As amplitudes das correntes nos períodos de arco e curto-circuito dependem das variáveis do processo.

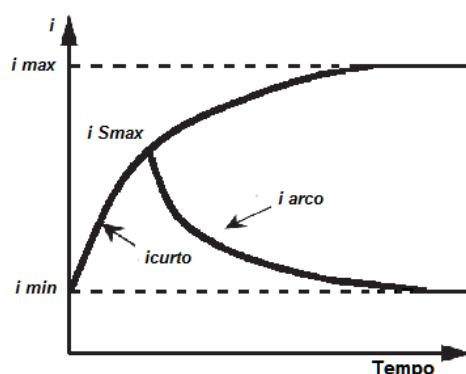


Figura 2.11 – Comportamento da corrente em dois estágios: corrente máxima de soldagem (i_{max}); corrente mínima de soldagem (i_{min}); corrente de pico instantânea no curto-circuito (i_{Smax}) (Jiluan, 2003)

Os parâmetros que limitam a corrente de soldagem são as resistências (R_t) e a característica estática da máquina. Este novo circuito caracterizado (curto-circuito) possui uma nova constante de tempo. A frequência de curto circuito, por sua vez, depende dos períodos de arco aberto e de curto-circuito. Hermans (1997) define a frequência de curto-circuito como sendo a razão entre o número de curto-circuito ocorrido em um determinado período. A seguir são detalhados os períodos de arco aberto e curto-circuito.

a) Período de Arco aberto em soldagem com transferência por curto-circuito

A Figura 2.12 elucida o comportamento do arco no período em que o arco permanece aberto. Neste período, o comprimento do eletrodo é menor que a DBCP. Esse período de arco aberto surge logo após a transferência da gota para a poça de fusão (um curto-circuito ocorreu em um tempo imediatamente anterior). Neste caso, o fator chave torna-se igual à unidade ($\varepsilon=1$) e o comprimento do eletrodo é uma função direta do comprimento do arco sendo determinado pela Equação 3.1.

$$i_{\min} = \frac{V_{cir} - V_{ac} - E_a \cdot I_{arco}}{R_t + M + R_{arco}} \quad (2.11)$$

$$i_{arco} = i_{\min} + (i_{Smax} - i_{\min}) \cdot e^{-\frac{(R_t + M + R_{arco}) \cdot t}{L}} \quad (2.12)$$

$$\frac{di_{arco}}{dt} = -(i_{Smax} - i_{\min}) \cdot \left(\frac{R_t + M + R_{arco}}{L} \right) \cdot e^{-\frac{(R_t + M + R_{arco}) \cdot t}{L}} \quad (2.13)$$

b) Período de Curto-circuito em soldagem com transferência por curto-circuito

O período de curto-circuito é caracterizado pela igualdade entre o comprimento do arame-eletrodo e a DBCP, ou seja, quando existe o equilíbrio entre a velocidade de alimentação (f) e a taxa de fusão do arame (W).

A Figura 2.13 demonstra o comportamento no período de curto-circuito. Este comportamento surge quando a ponta do eletrodo atinge a poça de fusão, ocorrendo à extinção do arco e a transferência da gota para a poça de fusão por tensão superficial.

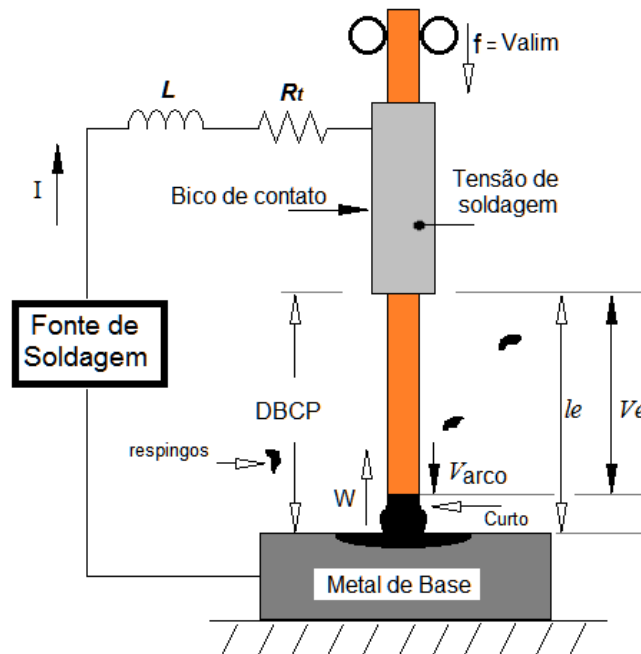


Figura 2.13 – Esquema de um arco durante o período de curto-circuito em transferência por curto-circuito

Nesse período de curto-circuito, o fator chave apresenta-se nulo ($\varepsilon=0$), assim sendo, a Equação 3.6 torna-se igual à Equação 2.14.

A corrente máxima de curto-circuito ($i_{\max}$), conforme Fig. 2.11, é determinada pela Equação 2.15. A corrente instantânea de curto-circuito é dada pela Equação 2.16. A taxa de crescimento da corrente no período de curto-circuito a qualquer instante é dada pela Equação 2.17, sendo dependentes do inverso da constante de tempo ($\tau_{\text{curto}} = L_{\text{curto}} / (R_t + M + R_c)$) e da diferença entre as correntes constantes antes e após o curto-circuito ($i_{\min}$ e $i_{\max}$), os quais são dependentes das características de saída da fonte de soldagem. Verifica-se que, com a variação da indutância, a constante de tempo da fonte irá variar, porém, conforme a Equação 2.15, a corrente $i_{\max}$ permanece inalterada.

Considerando a mudança no valor da resistência da fonte de soldagem (R_f), a mesma altera tanto a constante de tempo (τ_{curto}) quanto o valor da corrente máxima de soldagem ($i_{\max}$). Para o instante inicial ($t=0s$), esta taxa de crescimento é dada pela Equação 2.18, sendo inversamente proporcional a constante de tempo no curto-circuito.

Outra característica é que a tensão cai bruscamente e a corrente aumenta a taxas elevadas, dependendo da indutância. Em alguns casos, dependendo do valor da corrente, podem surgir respingos indesejáveis. Para Jiluan (2003), a característica dinâmica é regulada pela indutância (L) e a característica de saída é regulada pela resistência (R_t). A regulação da resistência R_t modifica o processo transitório, ou seja, a taxa de crescimento e decrescimento da corrente de curto-circuito, simultaneamente.

$$\frac{di_{\text{curto}}}{dt} = -\frac{1}{L}[(R_t + M + R_c).i - V_{\text{cir}}] \quad (2.14)$$

$$i_{\max} = \frac{V_{\text{cir}}}{R_t + M + R_c} \quad (2.15)$$

$$i_{\text{curto}} = i_{\max} - (i_{\max} - i_{\min}).e^{-\frac{(R_t + M + R_c).t}{L}} \quad (2.16)$$

$$\frac{di_{\text{curto}}}{dt} = (i_{\max} - i_{\min}).\left(\frac{R_t + M + R_c}{L}\right).e^{-\frac{(R_t + M + R_c).t}{L}} \quad (2.17)$$

$$\left(\frac{di_{\text{curto}}}{dt}\right)_{t=0} = (i_{\max} - i_{\min}).\left(\frac{R_t + M + R_c}{L}\right) \quad (2.18)$$

Substituindo (2.11) e (2.15) em (2.18), obtém-se a equação (2.19)

$$\left(\frac{di_{curto}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{V_{cir}}{L} - \left(\frac{V_{cir} - V_{ac} - E \cdot I_{arco}}{L} \right) \left(\frac{R_t + M + R_c}{R_t + M + R_{arco}} \right) \quad (2.19)$$

Verifica-se que a taxa de variação da corrente diminui com o aumento da resistência, visto que R_{arco} é pouco superior a R_c . Porém esta variação da resistência produz uma ligeira alteração na taxa de variação da corrente.

Segundo Jiluan (2003), as taxas de variação das correntes antes (di_{arco}/dt) e durante o curto-circuito (di_{curto}/dt) são influenciadas pelos parâmetros resistência, indutância e tensão a vazio. Uma combinação ótima destes parâmetros pode resultar em uma melhor condição de soldagem. O oscilograma da corrente durante e após o tempo de curto-circuito torna-se importante meio de observação do comportamento dinâmico da fonte de soldagem. O comportamento dinâmico do circuito de soldagem depende não apenas dos parâmetros da máquina de soldagem, mas também dos demais parâmetros que influenciam o arco (E_a, I_a, R_e, V_{ac}).

Segundo Jiluan (2003), os parâmetros do arco e a frequência de curto-circuito podem ser alterados de modo contínuo. As vantagens do método de medição são:

- a) o comportamento dinâmico do processo de soldagem com diferentes cargas podem ser medidas diretamente; e
- b) como a frequência de curto-circuito pode ser mantida estável, através do oscilograma da corrente de curto-circuito, pode-se determinar a taxa de variação da corrente e outros parâmetros relacionados.

2.6 - Topologias das máquinas de soldagem utilizadas no processo MIG/MAG

As máquinas de soldagem são empregadas para atender às necessidades elétricas específicas dos vários processos de soldagem, podendo ser controladas manualmente ou automaticamente. Muitos dos recentes desenvolvimentos na área da soldagem a arco têm sido possível devido à evolução da eletrônica e do controle, possibilitando melhores projetos envolvendo as máquinas de soldagem.

Basicamente, as máquinas de soldagem podem ser separadas em duas classes, a saber, as convencionais ou eletromagnéticas e as eletrônicas ou modernas. As

configurações do controle são os grandes diferenciais entre estas classes. As máquinas convencionais são controladas por meio de efeitos eletromagnéticos (variação da impedância). As máquinas modernas são controladas por componentes semicondutores (tiristores, transistores, mosfet, ou igbt), ou seja, por meio de eletrônica de potência. Tanto as máquinas convencionais quanto as modernas são amplamente utilizadas com eficiência, dependendo da aplicação e relação custo/benefício (ASM, 1993; GOHR, 2002, SCOTTI; PONOMAREV, 2008; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Segundo Gohr (2002), as máquinas transistorizadas analógicas não são mais fabricadas devido ao seu baixo rendimento (grande perda de energia nos transistores), mesmo reproduzindo qualquer sinal na saída e com ausência de ondulação de corrente na saída. As máquinas transistorizadas chaveadas possuem maior rendimento se comparada com as máquinas consideradas analógicas, isto se dá devido à redução nas perdas de energia no chaveamento dos transistores (utilizado como uma chave controladora da variável de soldagem desejada) (SCOTTI; PONOMAREV, 2008; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, SANTANA, 2010).

As máquinas de soldagem tiristorizadas são caracterizadas pela sua simplicidade, robustez e pela possibilidade de controlar o sinal de saída (corrente de vários ampéres) com apenas pequenos sinais eletrônicos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, SANTANA, 2010).

As Figuras 2.14 e 2.15 mostram os diagramas da máquina de soldagem inversora no lado secundário e no lado primário do transformador, respectivamente.

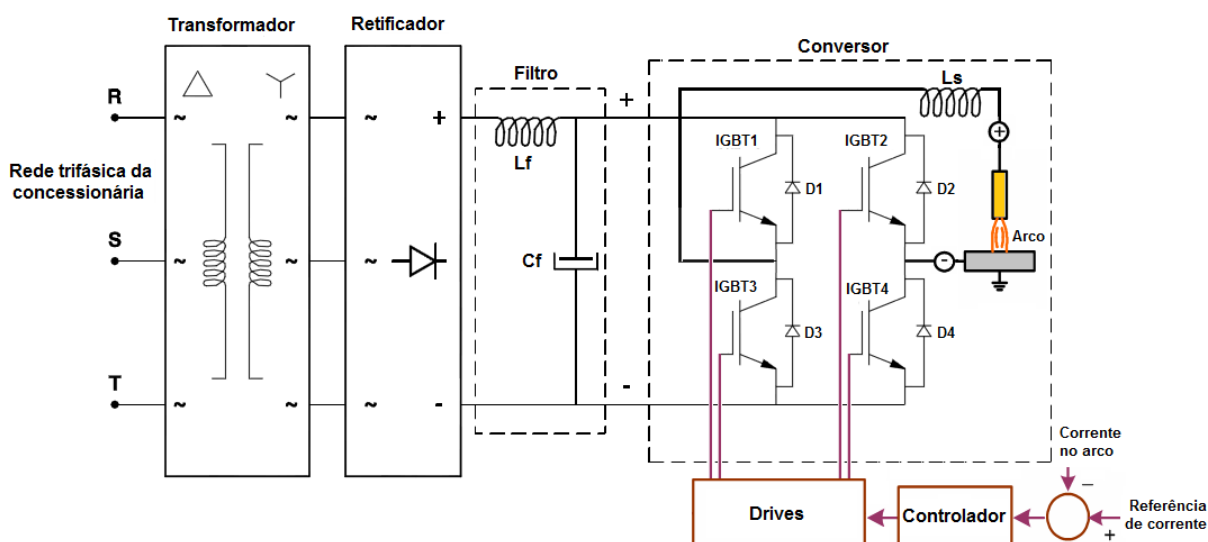


Figura 2.14 – Diagrama de uma máquina de soldagem inversora com chaveamento no lado secundário do transformador (GOHR, 2002)

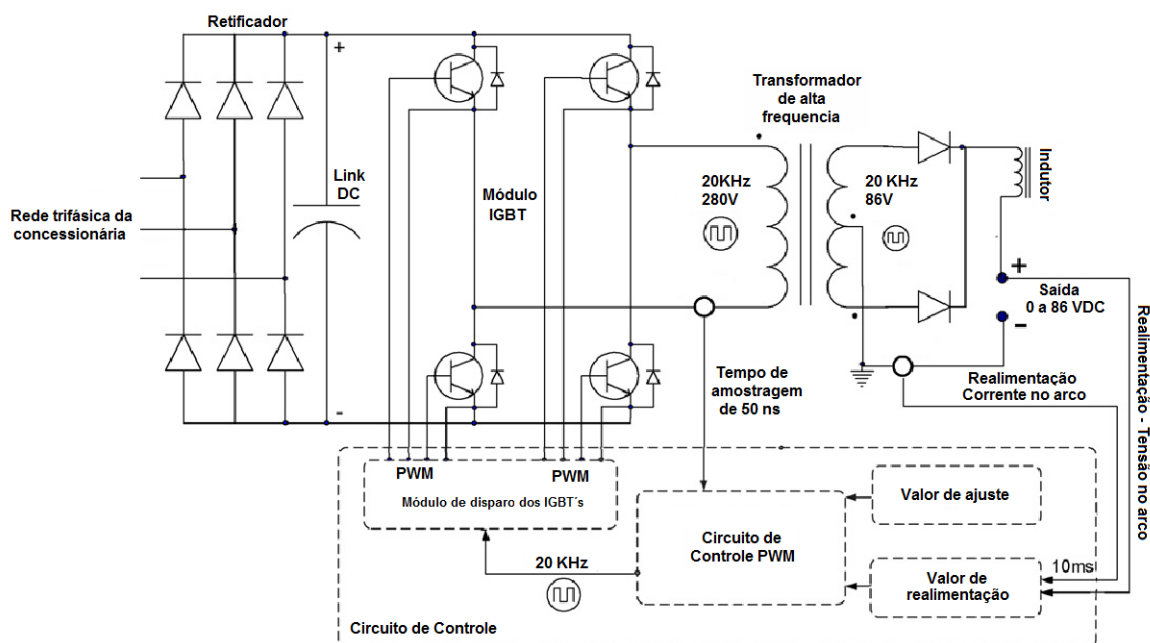


Figura 2.15 – Diagrama de uma máquina de soldagem inversora com chaveamento no lado primário do transformador (NGO et al., 2007)

Atualmente, alguns fabricantes de máquinas de soldagem têm utilizado o transformador planar de alta frequência devido às suas grandes vantagens (pequena indutância de dispersão, as baixas perdas por corrente *Foucault*, a elevada eficiência e boa condutividade térmica). A Figura 2.16(a) mostra a estrutura de um transformador planar de alta frequência, desenvolvidos pela Payton exclusivamente para as aplicações em soldagem.

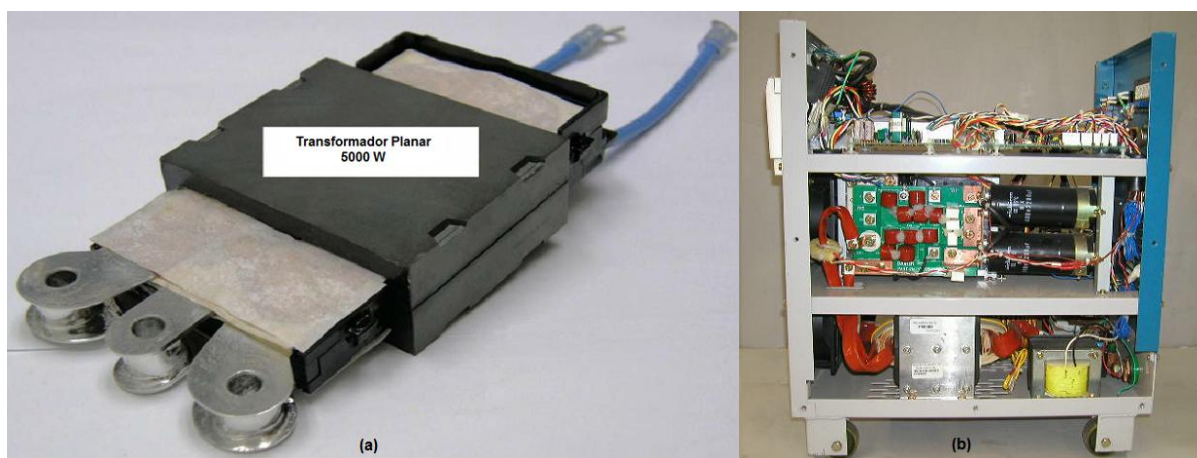


Figura 2.16 – a) Transformador planar de alta frequência de 5 kW, com dissipador de calor para melhoria na refrigeração (How2Power Today); b) Foto de uma máquina de soldagem moderna que utiliza transformador planar (FATHY et al., 2007)

2.7 - Qualidade da Energia Elétrica

O termo qualidade da energia elétrica (QEE) tem sido empregado para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores. Segundo a agência nacional de energia elétrica (ANEEL), no módulo 8 dos procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST), as normas referentes às redes de distribuição tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

Dentre os aspectos ponderados na qualidade do produto, nesta tese, serão abordados apenas os itens relacionados com flutuação de tensão (cintilação luminosa), os harmônicos e os inter-harmônicos.

A seguir, apresentam-se breves conceitos sobre os itens citados.

2.7.1 Cintilação luminosa

O fenômeno de cintilação luminosa, também conhecida pelos termos em inglês “*flicker*”, refere-se à percepção pelo olho humano das variações do fluxo luminoso de lâmpadas (principalmente as do tipo incandescentes) provocadas pela flutuação da tensão na rede de energia.

Comumente, o termo flutuação de tensão e cintilação luminosa são empregados como representativos de um mesmo fenômeno. Porém, existe uma diferença importante entre as duas terminologias. Se uma determinada tensão apresentar flutuação, necessariamente não significa que a existência de cintilação luminosa. Portanto, a cintilação luminosa deve ser considerada como sendo apenas um dos vários efeitos relacionados com as flutuações de tensão, conforme será mostrado no próximo Item.

2.7.2 - Flutuação de tensão

Segundo o PRODIST, no seu Módulo 8, a flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. Outros termos utilizados para designar o distúrbio na tensão pode ser variação de tensão.

Macedo Jr. (2009) acrescenta a esta definição um novo conceito mais amplo e abrangente para o fenômeno da flutuação de tensão devido à presença de componentes inter-harmônicas nos sinais de tensão das redes de energia elétrica, sendo: “*As flutuações de tensão são variações repetitivas, aleatórias ou esporádicas do valor eficaz, ou pico, da tensão de fornecimento, provocadas pela operação de cargas capazes de produzir*

componentes de frequências inter-harmônicas nos sinais de tensão das redes de energia elétrica”.

Nas Tabelas 2.3, 2.4 e 2.5 são apresentadas as terminologias propostas pelo PRODIST no módulo 8, aplicáveis às formulações de cálculo da sensação de cintilação (P_{st} e P_{lt}), aos valores de referência e aos fatores de transferência, respectivamente.

O Indicador de Severidade de Curta Duração (P_{st}) é uma grandeza destinada a medir a severidade de *flicker* baseada em um tempo de observação típico de 10 minutos. Este índice é um indicador utilizado para análise e planejamento das redes elétricas. O Indicador de Severidade de Longa duração (P_{lt}) equivale a um valor representativo de doze amostras consecutivas de P_{st} , correspondentes a duas horas de observação.

Tabela 2.3 – Terminologia utilizada pelo PRODIST – Módulo 8

Identificação da Grandeza	Símbolo
Severidade de Curta Duração	P_{st}
Severidade de Longa Duração	P_{lt}
Valor diário do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 24 h.	$P_{stD95\%}$
Valor semanal do indicador P_{lt} que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período sete dias completos e consecutivos	$P_{ltS95\%}$
Fator de Transferência	FT

Tabela 2.4 – Valores de referência definida pelo PRODIST – Módulo 8

Valor de Referência	$P_{stD95\%}$	$P_{ltS95\%}$
Adequado	< 1 p.u. / FT	< 0,8 p.u. / FT
Precário	1 p.u. – 2 p.u. / FT	0,8 p.u. – 1,6 p.u. / FT
Crítico	> 2 p.u. / FT	> 1,6 p.u. / FT

Tabela 2.5 – Fatores de transferência definida pelo PRODIST – Módulo 8

Tensão Nominal do Barramento	FT
Barramento de tensão nominal ≥ 230 kV	0,65
69 kV $\leq$ Barramento de tensão nominal < 230 kV	0,80
Barramento de tensão nominal < 69 kV	1,00

Observa-se a delimitação de três faixas para classificação dos indicadores de severidade de cintilação luminosa, sendo estes o valor adequado, o valor precário e o valor crítico. Esses valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados (PRODIST).

O fator de transferência (FT) deve ser calculado pela relação entre o valor do $P_{ItS95\%}$ do barramento do sistema de distribuição e o valor do $P_{ItS95\%}$ do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição eletricamente mais próximo.

Para os casos em que os FT entre os barramentos envolvidos não sejam conhecidos através de medição, a Tab. 2.5, a seguir, fornece valores típicos a serem aplicados para a avaliação da flutuação de tensão nos barramentos dos sistemas de distribuição.

2.7.3 - Flickermeter

O Padrão Internacional que trata das especificações funcionais e de projeto do medidor de cintilação luminosa encontra-se na publicação da *International Standard IEC 61000-4-15 "Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications"*. A nova versão, publicada em 2010, baseia-se numa implementação digital do *flickermeter*, porém implementações analógicas são permitidas desde que apresentem os mesmos resultados. Verifica-se o emprego de fatores de correção para o P_{st} e P_{It} , considerando outros níveis de tensão e frequência não contemplados nas versões anteriores (230 V em 50 Hz e 120 V em 60 Hz), conforme mostra a Tabela 2.6 (IEC, 2010).

Tabela 2.6 Fatores de correção para novas combinações de tensão e frequência (IEC, 2010)

Tensão e Frequência	Fator de Correção	Tabela de Referência
220 V, 50 Hz	0,97	230 V, 50 Hz
220 V, 60 Hz	0,97	230 V, 60 Hz
100 V, 50 Hz	0,90	120 V, 50 Hz
100 V, 60 Hz	0,90	120 V, 60 Hz

O diagrama funcional do *flickermeter* definido pelo protocolo IEC 61000-4-15 pode ser simplificado de forma a tornar seu entendimento mais didático, conforme diagrama de blocos ilustrados na Fig. 2.17.

A arquitetura do *flickermeter* é composto por duas partes, uma realizando a tarefa de simular a resposta da cadeia lâmpada-olho-cérebro (blocos 1 a 4) e outra tarefa realiza a análise estatística do sinal de cintilação luminosa (bloco 5) obtido da saída do bloco 4.

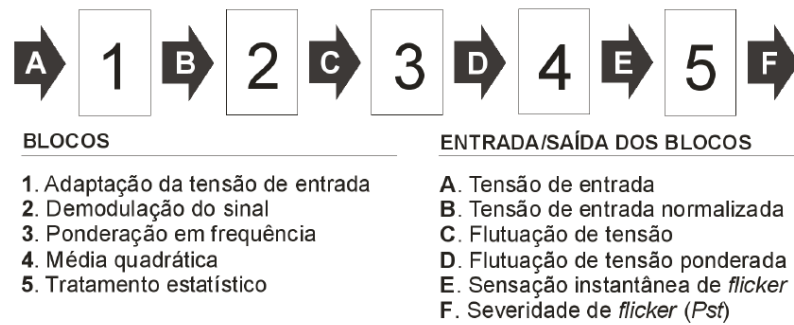


Figura 2.17 – Diagrama simplificado do flickermeter IEC (MACEDO JR., 2009)

Breve descrição de cada bloco:

- Bloco 1 – Adaptação da tensão de entrada e circuito de calibração;
- Bloco 2 – Demodulação quadrática do sinal adaptado;
- Bloco 3 – Filtragem e ponderação em frequência;
- Bloco 4 – Média quadrática;
- Bloco 5 – Tratamento estatístico.

O bloco 5 realiza a análise estatística dos registros dos níveis de sensação instantânea de flicker (S_i) e por sua vez, é responsável pelo cálculo dos indicadores de severidade de curta duração (P_{st}) e de longa duração (P_{lt}).

O indicador P_{st} representa a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos, sendo calculado a partir dos níveis instantâneos de cintilação, medidos conforme a Equação 2.14.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1S} + 0,0657P_{3S} + 0,28P_{10S} + 0,08P_{50S}} \quad (2.20)$$

Onde:

P_i = percentil $i_{\%}$ do sinal amostrado;

P_{st} = indicador de severidade de flicker de curta duração.

P_i corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassada durante $i_{\%}$ do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas normas IEC 61000-4-15. Os valores de P_i são obtidos da curva de frequência acumulada em 0,1; 1; 3; 10 e 50% do tempo de simulação, conforme mostra a Fig. 2.18.

Em cada valor dos percentis da Equação 2.20, exceto o caso do percentil $P_{0,1}$ (uma vez que o mesmo não permite variações bruscas do sinal de entrada para percentil de

apenas 0,1%), o sufixo S indica a necessidade de aplicação de um amortecimento no valor calculado. A Equação 2.21 mostra como os valores amortecidos são determinados.

$$\begin{aligned}
 P_{1S} &= (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3 \\
 P_{3S} &= (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3 \\
 P_{10S} &= (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5 \\
 P_{50S} &= (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Após obter o valor de P_{st} (para cada 10 minutos de observação), o indicador P_{lt} (que representa a severidade dos níveis de cintilação causados pela flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 horas) é determinado pela Equação 2.22.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{sti})^3}{N}} \tag{2.22}$$

Onde: P_{sti} = valores consecutivos de P_{st} ($i = 1, 2, 3, \dots, N$).

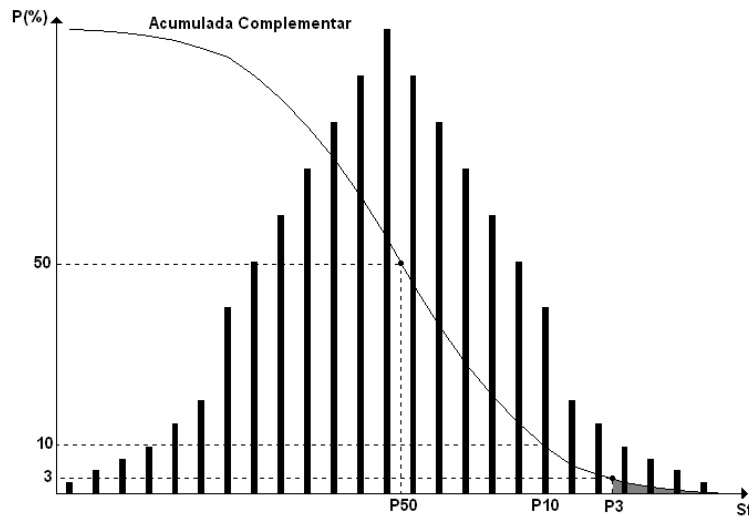


Figura 2.18 – Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação (Prodinst, módulo 8, 2010)

Por outro lado, define-se $P_{stD95\%}$ como sendo o valor do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 (um) dia (24 horas) e; $P_{ltS95\%}$ como sendo o valor do indicador P_{lt} que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de uma semana, ou seja, de 7 (sete) dias completos e consecutivos.

Para determinar o indicador P_{st} , o número de classes a ser considerada é um item de grande importância, ou seja, quanto maior o número de classes maior será a precisão dos resultados. A desvantagem devido o aumentado do numero de classes, reside no acréscimo do tempo de resposta e no custo de implementação do equipamento de medição. Neste sentido, Macedo Jr. (2009) propõe uma nova metodologia para a implementação do bloco 5, sendo mais atraente, devido à comprovação da redução no tempo de processamento e no esforço computacional.

2.7.4 Inter-harmônicas

Inter-harmônicas são tensões ou correntes cuja frequência não é um inteiro múltiplo da frequência fundamental da alimentação. Podem gerar flutuações de tensão nos valores de picos e/ou eficazes. Isto deve-se ao fato das frequências inter-harmônicas não estarem sincronizadas com a frequência fundamental.

A frequência de modulação de um sinal (f_m) pode ser denominada também por frequência de flutuação ou de envelope. Esta frequência de modulação é determinada pelo módulo da diferença entre a frequência inter-harmônica (f_i), sobreposta ao sinal fundamental, e a frequência harmônica imediatamente adjacente (f_h). A Equação 2.23 mostra esta relação (LI; XU; TAYJASANANT 2003, KEPPLER et al., 2003, TAYJASANANT et al., 2005, TESTA et al. 2007, KIM et al., 2009).

$$f_m = |f_i - f_h| \quad (2.23)$$

Segundo Li; Xu; Tayjasanant (2003), para uma frequência de modulação de 8 Hz, com amplitude de 0,5 pu, considerando as frequências inter-harmônicas relacionadas com a frequência de modulação por: $(\omega_f \pm \omega_m)$, $(\omega_f \pm 2\omega_m)$, ..., $(\omega_f \pm n\omega_m)$, tem-se as seguintes frequências inter-harmônicas visíveis no espectro: 36, 44, 52, 60, 68, 76, 84 Hz. Para a frequência de modulação de 172 Hz têm-se frequências inter-harmônicas de 112, 232, 284, 404, 456, 567 Hz, visíveis no espectro de frequência.

A Figura 2.19 mostra os oscilogramas de corrente e seus respectivos espectros de frequência para os casos de uma frequência de modulação de 8 Hz e 172 Hz. Verifica-se um comportamento diferenciado nas modulações das correntes de 8 Hz e 172 Hz, ou seja, os envelopes oscilam no mesmo sentido (positivos e negativos) e em sentidos opostos (forma senoidal), respectivamente.

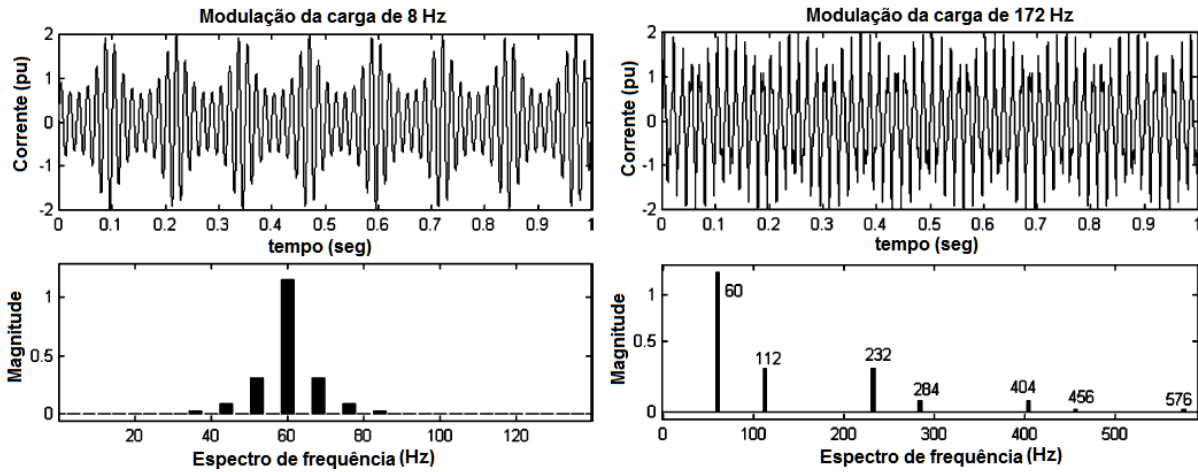


Figura 2.19 – Frequências inter-harmônicas geradas por variações de cargas proporcionando baixa frequência de modulação (8 Hz) e alta frequência de modulação (172 Hz)

Li; Xu; Tayjasanant et al. (2003) assumem que a taxa de amostragem do sinal contínuo analisado é dado por $T_s = T/N$, sendo T o período do sinal e N o número de amostras por ciclo. A resolução espectral ($\Delta\omega$), determinada pela relação entre a frequência fundamental do sinal (ω_l) e o número de ciclos da janela amostral (p), é dada pela Equação 2.24. O tamanho da janela utilizada para a análise do espectro é de 15 ciclos, o que determina uma resolução espectral de 4 Hz. A norma IEC 61000-4-7 define uma resolução espectral de 5 Hz, tanto para a frequência fundamental de 60 Hz ou 50 Hz.

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{p.T} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\omega_l}{p} \quad (2.24)$$

Neste caso, para uma frequência fundamental de 60 Hz, considerando uma janela amostral de 60 ciclos, a resolução espectral é de 1 Hz. Portanto, para que um sinal contendo frequências inter-harmônicas seja perfeitamente representado no espectro de frequência, o número de janelas amostral deve ser bem escolhido. Desta forma, caso alguma frequência inter-harmônica presente no sinal original, não seja múltiplo da resolução espectral, o sinal original pode não ser facilmente identificado pelo espectro. Assim sendo, irá ocorrer o efeito do espalhamento de espectro, surgindo várias frequências fantasmas na composição do espectro resultante, dificultando a identificação das componentes fisicamente presentes no sinal original (MACEDO JR., 2009).

Alguns autores analisaram a presença de frequências inter-harmônicas quando da presença de cargas não lineares. Galhardo e Verdelho (1999) observaram a presença de frequências inter-harmônicas em um processo MIG pulsado. Tayjasanant et al. (2005),

analisaram a presença de um envelope no sinal da tensão em um cicloconversor. Verificaram que quando a frequência inter-harmônica encontra-se próximo da harmônica ímpar, surge um envelope na forma de onda da tensão com oscilações no mesmo sentido, e quando a frequência inter-harmônica encontra-se próximo de harmônicas pares, surge um envelope em forma senoidal.

Testa et al. (2007) apresentam maiores detalhes sobre inter-harmônicas em um trabalho desenvolvido em força tarefa, os quais, elucidam algumas questões mais marcantes relacionadas com a teoria (definição e conceito), modelagem e caracterização das fontes geradoras.

2.8 - Normatização do setor elétrico contemplando cargas como máquinas de soldagem

No Brasil, as concessionária de energia elétrica CPFL e Elektro têm estabelecido critérios (em normas específicas) para o fornecimento de energia, em casos de cargas elétricas como máquinas de soldagem. Esta preocupação reside no fato de que as máquinas de soldagem são cargas não lineares com característica de funcionamento intermitente (GED 238, 2000, ND-50, 2013).

A norma técnica da rede de distribuição (Projeto - Ligações de Clientes da CPFL) estabelece os procedimentos técnicos e critérios básicos para a elaboração de projetos para ligação de consumidores nas Redes de Distribuição Urbanas, nos municípios da área de concessão da CPFL (Piratininga e CPFL- Paulista). Em um dos itens relacionados com os procedimentos de análise para ligação de consumidores, determina-se que em ligações trifásicas que envolvam equipamentos que podem afetar a qualidade de fornecimento e causar perturbações a outros consumidores, devem ser analisadas pelas áreas de projetos, com base nas normas técnicas estabelecidas. Para o caso de máquinas de soldagem, a norma técnica vigente é a GED 238 (Critério para Atendimento a Máquina de Solda).

Para estas concessionárias de energia elétrica, as indústrias que utilizam máquinas de soldagem a arco podem causar a flutuação de tensão na rede de distribuição, devido à variação brusca da demanda instantânea. Através do arco elétrico de soldagem (formado no secundário desse tipo de equipamento), a rede elétrica fica submetida às variações rápidas da corrente, que correspondem em variações no nível de tensão. Além destas variações, existe também o ponto de partida do processo, que corresponde a uma corrente de curto-circuito, proporcionando maior amplitude na flutuação de tensão. De acordo com as normas

estabelecidas por ambas às concessionárias, o completo processo de operação de uma máquina de soldagem é realizado em 4 etapas distintas, conforme mostra a Fig. 2.17.

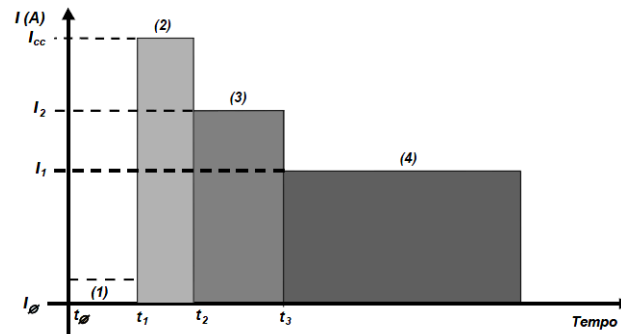


Figura 2.17 – Processo completo de operação de uma máquina de soldagem (GED 238, 2000, ND-50, 2008)

A sequência das etapas são:

Etapa 1 – instante (t_0) de energização da máquina de soldagem, correspondendo a um valor da corrente em vazio (I_0), em geral corresponde à corrente do motor de refrigeração da máquina de solda (quando houver);

Etapa 2 – instante (t_1) do curto-circuito dos eletrodos com a peça a ser soldada, correspondendo a maior corrente absorvida (I_{cc} = corrente de curto-circuito);

Etapa 3 – instante (t_2) do início do arco voltaico, correspondendo a uma corrente intermediária (I_2);

Etapa 4 – instante (t_3) referente ao início da solda propriamente dita, correspondendo a corrente nominal ($I_1 = I_{nom}$).

Vale salientar que este caso é válido apenas para as máquinas de soldagem analógicas. Em nenhum momento as normas vigentes abordam o tratamento para as máquinas de soldagem modernas. No funcionamento de mais de uma máquina de soldagem, a norma NR 50 considera, para o cálculo da flutuação de tensão, a potência curto-circuito total da máquina de solda de maior porte e 60% da potência de curto-circuito das demais máquinas de soldagem.

No processo de soldagem MIG/MAG, a frequência da transferência metálica proposta nas normas acima citadas varia de 50 a 300 Hz. Para a transferência globular, é adotada como média crítica de 100 gotas por segundo. Para a transferência goticular, consideram a transferência de 100 a 300 gotas por segundo. Para a transferência pulsada consideram a transferência de 60 a 200 gotas por segundo. Diante de todas as variedades de frequência da transferência metálica mencionadas acima, as normas adotam (para todas

as potências das máquinas de soldagem) uma flutuação de tensão admissível de 5,08%, fator de trabalho limite de 60%, uma frequência da flutuação de tensão média de 60/hora (provocada pela ignição e extinção do arco provocado pelo operador).

Contudo, considerando apenas os dados fornecidos pelas normas acima citadas, os mesmos não correspondem fielmente aos vários modos de transferência metálicos do processo MIG/MAG, conforme item 2.4. As normas atuais não consideram as características das máquinas modernas.

Assim, para o caso da instalação elétrica, devem-se conhecer as características elétricas (nível de curto-circuito, nível de tensão, impedância dos elementos da rede e do transformador de distribuição) até o PAC da instalação considerada. Quanto menor o valor da impedância dos elementos da rede até o ponto de entrega (PAC), menor a flutuação de tensão, conseqüentemente, menos efeito na cintilação luminosa, considerando que ainda existe a dependência da frequência da flutuação de tensão. Portanto, considerando a análise para uma mesma carga, em instalações diferenciadas, tem-se resultados desiguais de flutuação de tensão no PAC, este fato deve-se às impedâncias da rede serem distintas em cada local.

No projeto de novas instalações, torna-se necessário conhecer previamente as características elétricas do PAC e devem-se levar em consideração as impedâncias até o novo ponto de alimentação. Esta precaução deve-se ao fato das cargas provocarem distúrbios na própria instalação bem como em seus vizinhos.

2.9 Considerações Finais

O presente capítulo contemplou o estado da arte sobre os temas relacionados com o processo de soldagem MIG/MAG e a qualidade da energia elétrica causada por cargas intermitentes, ou seja, as máquinas de soldagem. Com relação ao processo de soldagem MIG/MAG, destacou-se os modos de transferência naturais por curto-circuito, globular e goticular, bem como o modo de transferência controlado MIG pulsado. Com relação à QEE, foram destacados os itens relacionados com a flutuação de tensão, cintilação luminosa, *flickermeter* e os inter-harmônicos. As normas contemplando cargas perturbadoras, tais como as máquinas de soldagem, são ponderadas com a finalidade de avaliar os critérios estabelecidos a fim de servir de comparação, e caso for, proporcionar subsídio para estabelecer novos critérios.

Para atingir um dos objetivos propostos, especificamente alguns aspectos deveriam ser abordados, entre estes destacam-se a criação de um modelo de simulação para o arco

de soldagem. Por isto, foi realizada uma síntese dos principais modelos encontrados em documentos bibliográficos, sendo escolhido aquele modelo que de certa forma pudesse ser implementado em um software comercial. Acrescentado ao modelo escolhido foi estabelecido uma queda de tensão pertinente à resistência de contato entre o eletrodo e a poça de fusão, o qual considera a queda de tensão não nula obtida experimentalmente no momento do curto-circuito.

O capítulo a seguir apresentará a simulação do modelo do arco de soldagem e da fonte contemplando uma máquina de soldagem.

CAPÍTULO III

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

3.1 Considerações iniciais

A soldagem a arco necessita de um equipamento que tenha a capacidade de fornecer tensão e corrente dentro de patamares estabelecidos para o processo e impor o modo de transferência metálica desejada. No processo de soldagem MIG/MAG, as tensões utilizadas situam entre 10 e 40 V, enquanto as correntes encontram-se geralmente entre 10 a 1200 A. Assim sendo, tem-se que a caracterização do processo de soldagem se dá por uma grande faixa de corrente e uma pequena faixa de tensão. Mas, apesar desta característica, torna-se possível prever o comportamento de um equipamento de soldagem a arco (MIG/MAG) através da simulação. Para tal, deve-se escolher a topologia da máquina de soldagem desejada e posteriormente inserir a sua carga elétrica. No caso, a carga elétrica para a máquina de soldagem é o arco de soldagem, que dependendo dos parâmetros de entrada pode proporcionar diversos modos de transferência metálica.

Para a realização da simulação do conjunto completo, ou seja, do circuito eletromagnético da máquina e do arco de soldagem, foi utilizado um software comercial (plataforma *Matlab/Simulink*). A proposta de simulação para o arco de soldagem foi operacionalizada através do modelo do arco de soldagem apresentado no capítulo anterior, sendo o mesmo composto por vários parâmetros, tais como indutâncias, resistências e tensão a vazio. Assim, a estrutura para a simulação do processo de soldagem MIG/MAG apresentada a seguir inicia-se pela simulação do arco de soldagem, seguido pela a topologia da máquina de soldagem e, finalmente, pela a composição das duas partes simuladas. Com a completa da simulação de uma máquina de soldagem, torna-se possível ajustar os parâmetros a fim de estabelecer as faixas de transição entre os modos de transferência metálica, sendo interessante no estudo e conhecimento destes fenômenos. Desta forma, com a simulação completa, pode-se prever o comportamento dos sinais de corrente e tensão de soldagem, bem como os sinais de corrente e tensão na entrada da máquina de soldagem.

3.2 Estrutura de simulação do arco de soldagem para processo MIG/MAG

A estrutura da simulação do arco de soldagem desenvolvida no *Simulink* é apresentada na Fig. 3.1, sendo composta por blocos e funções para a solução das equações diferenciais propostas no capítulo anterior, bem como os parâmetros de entrada e saída e os blocos que geram perturbações nas variáveis do processo. O *Simulink* foi escolhido por ser um ambiente de simulação do Matlab que possibilita definir o sistema através de diagramas de blocos, facilitando dessa forma a análise e alteração dos parâmetros dos blocos, como por exemplo, os blocos de perturbações. Além disso, existem também alguns pontos de relevância tais como: possibilidade de uma observação do comportamento dos sistemas de uma forma prática e fácil; cooperação entre o Matlab e o *Simulink*, podendo exportar e importar dados entre ambos ambientes; existência de um conjunto de blocos pré-definidos e a capacidade de utilização de bibliotecas em tempo real.

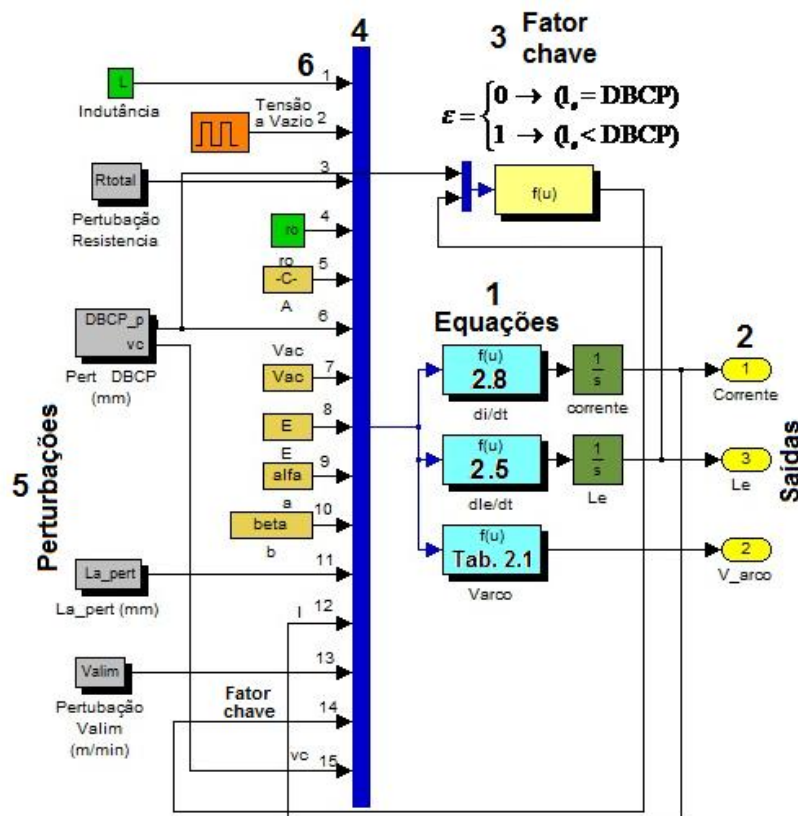


Figura 3.1 - Estrutura de programação do *Simulink* para a simulação do arco de soldagem: 1- blocos de funções para as equações 2.5, 2.8 e V_{arco} da Tabela 2.1; 2 - variáveis de saída (corrente de soldagem, comprimento do eletrodo e tensão no arco); 3 - determinação do fator chave pela equação 3.4; 4 - barramento multiplexador para entrada de parâmetros; 5 - parâmetros adicionado a perturbações; 6 - entrada dos parâmetros no barramento multiplexador

Os parâmetros utilizados na simulação (fatores de entrada) que podem ser selecionados e configurados pelo usuário são: a resistividade elétrica média do arame-eletrodo, o diâmetro do arame-eletrodo, os valores médios de resistências elétricas do circuito (resistência parasita, resistência entre bico e arame-eletrodo, resistência dos cabos), o coeficiente alfa, o coeficiente beta, o campo elétrico no arco, o *slope* da fonte, a queda de tensão anódica e catódica, a distância entre o bico de contato e a peça, a velocidade de alimentação do arame, as indutâncias no período de arco aberto e curto-circuito e, por fim, as declarações das condições iniciais da corrente de soldagem e do comprimento do eletrodo.

As equações diferenciais utilizadas na simulação do arco são as equações 2.5 e 2.8, acrescida da última tensão no arco de soldagem apresentada na Tabela 2.1 (faz-se opção por esta equação por incluir o fator chave e a resistência de contato entre eletrodo e poça de fusão para o momento do curto circuito). Vale salientar que estas equações não correspondem apenas ao modelo do arco de soldagem por incluírem os parâmetros da fonte e dos cabos de alimentação. As variáveis de saída da simulação do arco de soldagem, conforme mostra a Fig.3.1 são as correntes de soldagem, o comprimento do eletrodo e a tensão no arco.

Após montado todo o ambiente, a operacionalidade de programa se inicia com a configuração dos parâmetros de simulação (fatores de entrada). Para tal, deve-se clicar duplamente sobre cada bloco, onde irá abrir uma caixa de dialogo a fim de inserir os valores dos parâmetros. Deve-se ainda selecionar os valores iniciais de cada variável e definir o tipo de algoritmo de integração numérica a ser usado para resolver as equações diferenciais. Neste trabalho utilizou-se a função ode23 com passo de integração automático.

3.3 Inclusão de perturbações nos parâmetros do arco elétrico de soldagem

A fim de reproduzir de forma mais realística os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem, em alguns parâmetros foram inseridos perturbações com características em degrau, com comportamento linear, senoidal e/ou o conjunto destes. Cada uma destas perturbações são limitadas por blocos de saturação que tem a função de limitar os parâmetros nos seus limites máximos e mínimos aplicáveis em situações reais. Por exemplo, os limites mínimos e máximos para o comprimento do arco devem estar entre zero e a DBCP, respectivamente. Para a indutância e outras variáveis, pode-se considerar que os limites máximos e mínimos estejam dentro de faixas percentuais dos valores nominais. O usuário deve ter o conhecimento destes limites para não inserir magnitudes fora dos valores existenciais.

A Figura 3.2 exemplifica os blocos destinados à perturbação na DBCP e para as demais variáveis que possuem perturbação. Os demais blocos de perturbação tem o mesmo formato.

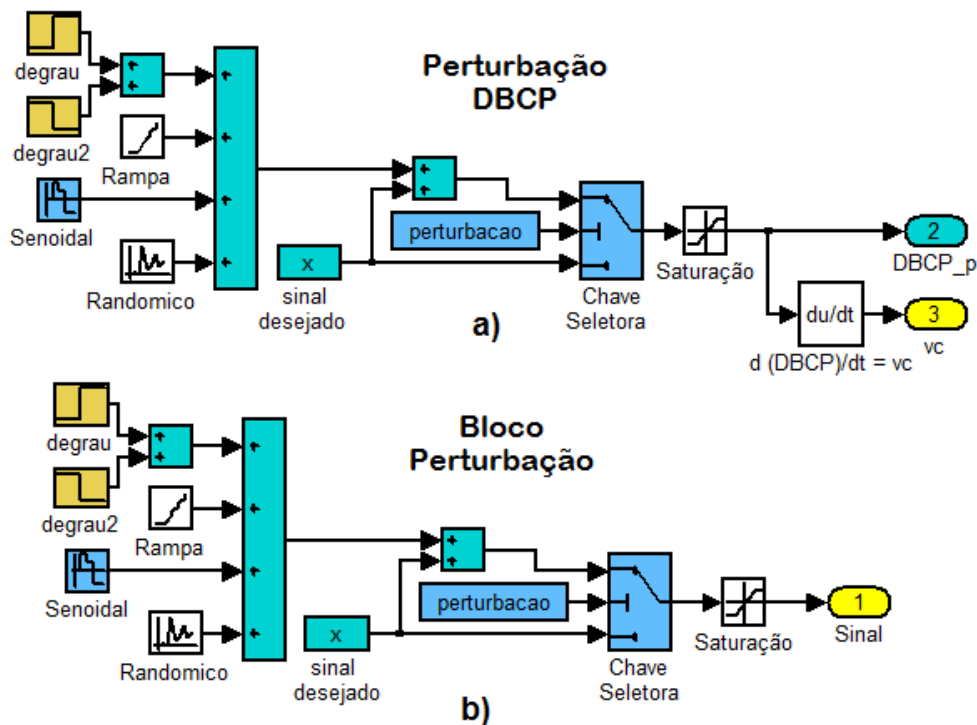


Figura 3.2 – Blocos das perturbações: a) perturbação da DBCP; b) perturbação para as demais variáveis (resistência, comprimento do arco e velocidade de alimentação do arame)

A perturbação na velocidade de alimentação tenta reproduzir uma oscilação na resposta de controle do motor CC que alimenta o arame-eletrodo. As perturbações no comprimento do arco e no comprimento do arame-eletrodo tentam simular o efeito das oscilações do metal líquido na ponta do eletrodo e na poça de fusão. A perturbação na distância do bico de contato à peça seria uma resposta da imperfeição humana quando este controla manualmente a tocha, mas existiria até mesmo em sistema automatizado, frente a imperfeição no alinhamento entre tocha e a chapa (empenos, tolerância geométrica da superfície da chapa, etc.). A perturbação na resistência e na indutância é inserida a fim de considerar o crescimento progressivo da gota antes do destacamento e o respectivo comportamento destes parâmetros sobre os sinais elétricos durante os períodos de arco aberto e de curto-circuito.

A Figura 3.3 mostra um bloco do Simulink que simula o arco no processo de soldagem MIG/MAG. Assim sendo, com um duplo clique sobre o bloco, abre-se uma caixa

de diálogo possibilitando ao usuário inserir todos os parâmetros dos subsistemas através de uma única caixa de diálogo.

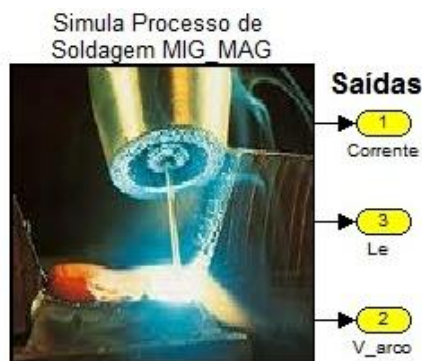


Figura 3.3 – Bloco com máscaras da simulação do arco de soldagem

3.4 Integração entre fonte e arco de soldagem

A Figura 3.4 mostra a estrutura da simulação realizada no Simulink para uma máquina de soldagem que se comporta como uma fonte transistorizada analógica devido a sua configuração. Esta estrutura é composta por um transformador trifásico, um retificador trifásico, uma fonte de corrente controlada utilizada como interface entre os blocos de funções com os blocos do *Power System Blockset*, um medidor de corrente de soldagem e um bloco com máscara da estrutura para a simulação do arco de soldagem, já mostrado na Fig. 3.3.

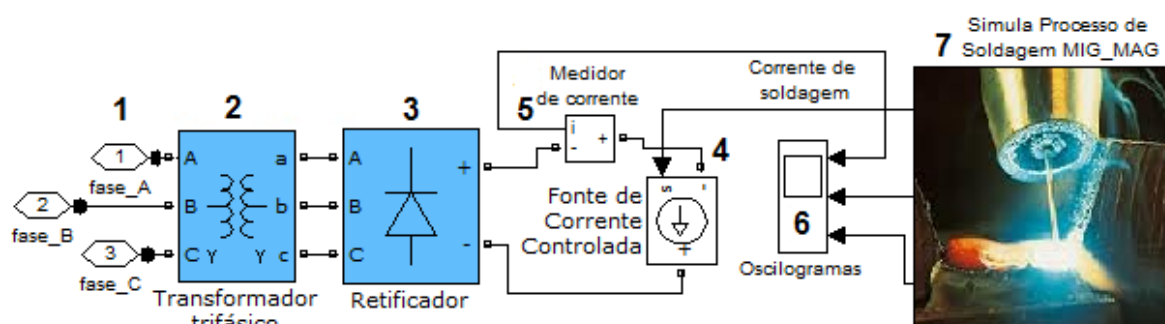


Figura 3.4 – Estrutura de programação do Simulink para a simulação de uma máquina de soldagem: 1 - tensão trifásica de alimentação para a máquina de soldagem; 2 - transformador trifásico; 3 - retificador trifásico; 4 - fonte de corrente controlada; 5 - medidor de corrente de soldagem; 6 - Oscilogramas (corrente, tensão no arco e comprimento do eletrodo); 7 - bloco com máscara da estrutura de programação do Simulink para a simulação do arco de soldagem (Fig. 3.1).

Para realizar a interligação dos blocos do *Power System Blockset* (transformador e retificador trifásico) e o bloco com máscaras (utilizado para simular o arco de soldagem através de blocos de funções), torna-se necessário utilizar o bloco de uma fonte de corrente controlada com um medidor de corrente.

Observando o esquema de uma máquina de soldagem apresentado na Fig. 2.14, percebe-se a existência de um inversor logo após o retificador trifásico. Como a simulação ocorre apenas em corrente contínua, os chaveamentos dos IGBT ocorrem apenas no sentido de manter a tensão constante, não existindo a inversão do sinal da tensão. Neste caso, pode-se suprimir o inversor do diagrama, sendo o seu efeito apenas considerado no tempo do chaveamento dos IGBT em porcentagem.

Verifica-se que o sinal da corrente de soldagem (uma das saídas do item 7) é inserido na entrada de sinal da fonte de corrente controlada, a fim de considerar a corrente solicitada pela soldagem na saída do retificador. Para o retificador e o elo CC não foram apresentados modelos matemáticos representativos, visto que todos os componentes que constituem estes equipamentos estão prontamente disponibilizados nas bibliotecas do *Simulink*.

O filtro LC logo após o retificador (conforme mostrado na Fig. 2.14) está considerado no modelo do arco de soldagem através da indutância total e o efeito do capacitor está considerado na manutenção da tensão a vazio sempre constante. Vale salientar que esta consideração não tem o mesmo efeito se os elementos fossem inseridos após o retificador. Entretanto, a partir de simulações com e sem o filtro LC após o retificador, notou-se que o tempo de resposta foi mais favorável para a situação sem o filtro LC, porém, sem comprometer nos sinais da tensão e corrente de soldagem. Deste modo, mesmo sem o Filtro LC, a resposta foi considerada satisfatória.

3.5 Ligação da máquina de soldagem à rede de alimentação

A Figura 3.5 mostra o referido arranjo representativo da rede elétrica de distribuição até o ponto de alimentação de uma máquina de soldagem na unidade industrial. Todos os componentes relativos à rede de alimentação elétrica possuem blocos de relativa simplicidade. Suas partes são formadas por fontes de tensão e elementos passivos. Estes recursos já se encontram disponibilizados na biblioteca do *Simulink*, não demandando maiores detalhamentos sobre a modelagem dos mesmos. A fonte fornecedora de energia elétrica deve ser configurada com os valores de tensão de linha, nível de curto-circuito e relação entre reatância e resistência. Para a impedância da rede de distribuição, é considerado o tipo e o comprimento do cabo (resistência/km e reatância/km de cabo). O

transformador da unidade industrial é configurado através dos seus parâmetros (potência nominal, tensões nominais, resistências e reatâncias do primário, secundário e de magnetização).

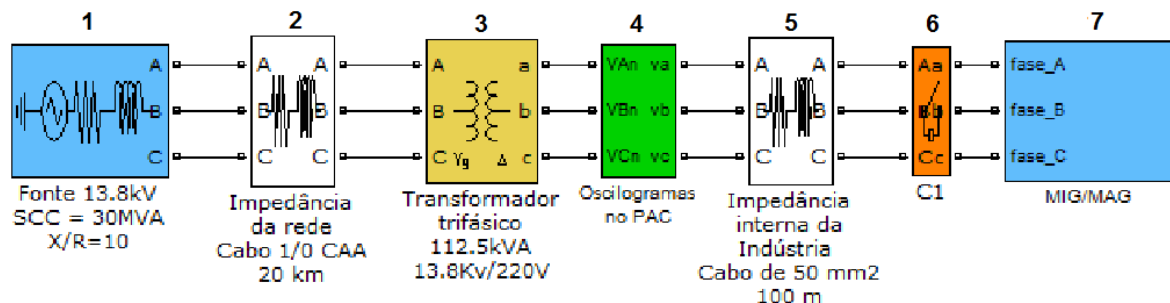


Figura 3.5 – Estrutura de programação do Simulink para a simulação de uma máquina de soldagem desde a fonte fornecedora da energia elétrica: 1 - fonte fornecedora de energia elétrica trifásica; 2 - impedância da rede de distribuição; 3 - transformador trifásico de entrada da unidade industrial; 4 - oscilogramas de corrente e tensão de linha no PAC; 5 - impedância da rede da unidade industrial até os terminais de ligação da máquina de soldagem; 6 - chave que simula os períodos em que a máquina esta ligada ou desligada; 7 - estrutura computacional de uma máquina de soldagem mostrada na Fig. 3.4

A impedância da rede de alimentação (por exemplo, dentro da indústria) é configurada a partir do conhecimento do tipo e comprimento do cabo (resistência/km e reatância/km de cabo) até a entrada da máquina de soldagem. Para obter os sinais de corrente e tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) que está na posição 4 da Fig. 3.6, são necessários vários medidores de tensão e corrente.

A Figura 3.6 mostra como obter os sinais de corrente e tensão instantâneos e eficazes no PAC. Neste ponto, são analisadas as quedas de tensão ou flutuação de tensão devido à soldagem, considerando o processo de soldagem MIG/MAG com vários modos de transferência metálica.

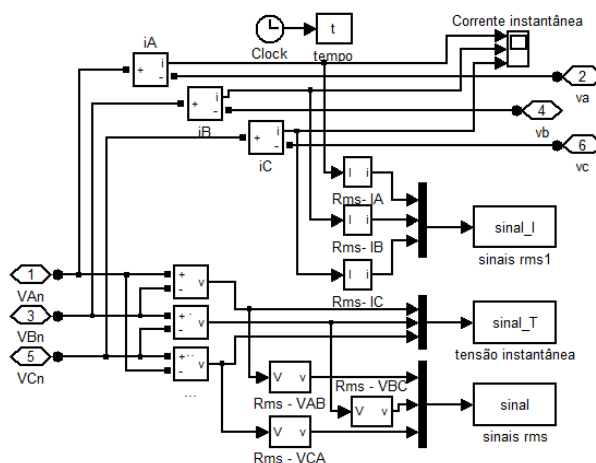


Figura 3.6 - Bloco que captura os sinais de corrente e tensão de linha no PAC.

3.6 Análise de desempenho do programa

A fim de avaliar a consistência do programa de simulação proposto, pretende-se analisar a correspondência entre os oscilogramas de tensão no arco e corrente de soldagem, obtidos a partir da simulação do processo MIG/MAG diante os diversos modos de transferência metálica, tais como os observados na prática de soldagem.

Os parâmetros de operação utilizados na simulação do arco de soldagem para cada modo de transferência são apresentados na Tabela 3.1, enquanto os parâmetros de operação característicos do sistema elétrico estão apresentados na Tab. 3.2. Para estes últimos parâmetros, são aproveitados os blocos da biblioteca do *SimPowerSystems* do ambiente *Matlab/Simulink*. Os blocos componentes aproveitados foram: fonte de tensão trifásica; elementos concentrados RLC; transformador trifásico; componentes de eletrônica de potência; e elementos de medição. Em alguns destes blocos, torna-se necessário realizar a parametrização.

Tabela 3.1 – Parâmetros operacionais utilizados nas simulações do processo MIG/MAG nos modos de transferência por curto-circuito, globular, goticular e pulsado

Parâmetros	Curto-circuito	Globular	Goticular	Pulsado
$DBCP$ (mm)	12	16	16	16
f (m/min)	4,5	5,5	10	6
α (mm/s.A)	0,27	0,294	0,2383	0,275
β (1/s.A ²)	$5,9 \times 10^{-5}$	$4,608 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5}$	$5,93 \times 10^{-5}$
L (μ Vs/A)	(200 - 600)	350	350	350
M (V/A)	0,039	0,039	0,039	0,039
E_a (V/mm)	0,700	0,700	0,700	0,700
V_{ac} (V)	19	23	25	
R_{arco} (Ω)	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235
R_c (Ω)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
V_{cir} (V)	24	36	40	
R_t (Ω)	0,003+0,04	0,003+0,04	0,003+0,04	0,003+0,04
d_e (mm)	1,2	1,2	1,2	1,2
ρ_e ($\Omega.m$)	12×10^{-6}	12×10^{-6}	12×10^{-6}	12×10^{-6}

Obs: Em todas as simulações, o valor da resistividade do eletrodo é considerado constante, mesmo esta sendo dependente da distribuição de temperatura ao longo deste.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados no sistema elétrico

Fonte de Alimentação	Cabo da Rede de Distribuição	Transformador Da Subestação	Cabos da rede Industrial
Níveis de Curto-circuito	ALUMINIO 1/0 AWG	Potência 225 kVA	Comprimentos
$S_{cc} = 30 \text{ MVA}$	$L_d = 20 \text{ km}$	$V1 \text{ (rms)} = 13800 \text{ V}$	$L = 100 \text{ m}$
		$V2 \text{ (rms)} = 220 \text{ V}$	50 mm^2
Relação X/R	$R = 0,604 \text{ } \Omega / \text{km}$	$R1 \text{ (pu)} = 0.01$	$R = 0,7355 \text{ } \Omega / \text{km}$
10	$Xl = 0,45 \text{ } \Omega / \text{km}$	$R2 \text{ (pu)} = 0.01$	$Xl = 0,16 \text{ } \Omega / \text{km}$
		Corrente exc. max. = 2.1%	75 mm^2
		Perdas a vazio max. = 0.3%	$R = 0,5256 \text{ } \Omega / \text{km}$
		Perdas totais max. = 1.5%	$Xl = 0,11 \text{ } \Omega / \text{km}$

A seguir são apresentados os oscilogramas da tensão no arco e da corrente de soldagem correspondentes a cada modo de transferência.

Através dos parâmetros fornecidos na Tabela 3.1, obtém-se os oscilogramas de tensão no arco e corrente de soldagem para o modo de transferência por curto-circuito, conforme mostra a Fig. 3.7. Nota-se uma correspondência entre os sinais obtidos na simulação com os encontrados na literatura.

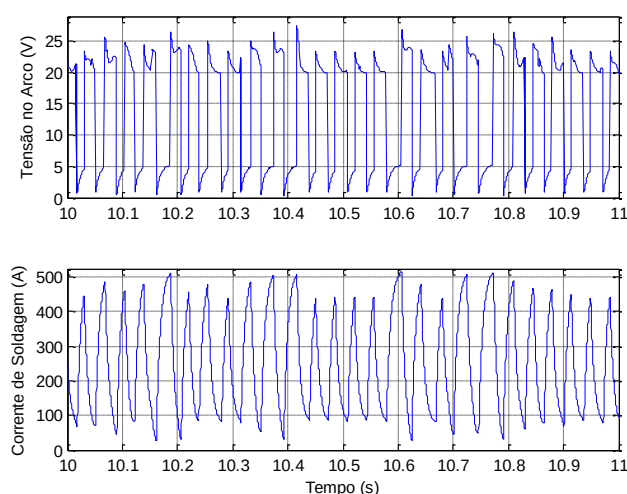


Figura 3.7 - Oscilogramas da tensão no arco e corrente de soldagem para o modo de transferência por curto-circuito, considerando os parâmetros apresentados na Tab. 4.1.

A fim de analisar o desempenho do modelo proposto, faz-se uma modificação no valor da velocidade de alimentação do arame para 5 m/min. e uma redução de 50% nos valores das indutâncias em relação ao Item anterior, mantendo-se os demais parâmetros

conforme Tabela 3.1. Desta forma, verifica-se um acréscimo na frequência de curto-circuito pela redução nos intervalos de arco aberto e de curto-circuito, conforme mostra a Fig. 3.8.

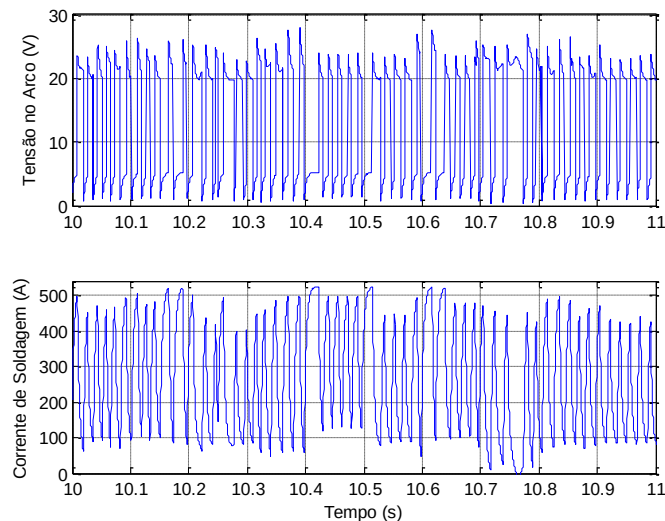


Figura 3.8 - Oscilogramas da tensão no arco e corrente de soldagem para o modo de transferência por curto-circuito, para uma velocidade de alimentação do arame para 5 m/min, uma redução de 50% no valor da indutância, mantendo os demais parâmetros da Tab. 3.1.

Inserindo os parâmetros correspondentes ao modo de transferência globular definidos na Tabela 3.1, obtêm-se os oscilogramas de tensão no arco e corrente de soldagem mostrados na Fig. 3.9. Neste caso, verifica-se uma maior variação nas amplitudes dos sinais de tensão e corrente de soldagem, sendo características deste modo de transferência.

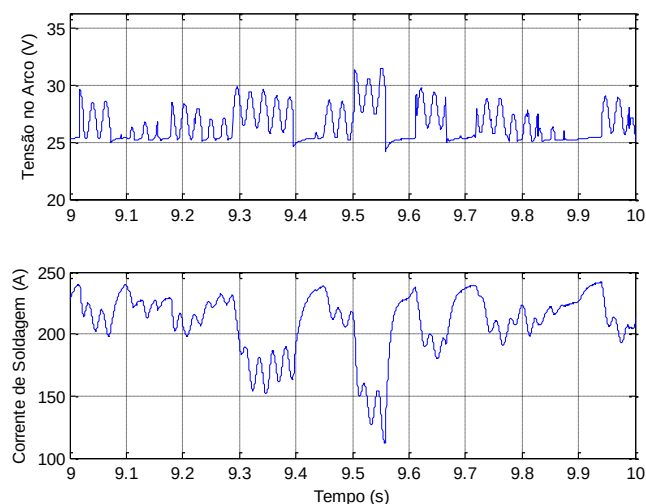


Figura 3.9 - Oscilogramas da tensão no arco e corrente de soldagem para o modo de transferência globular.

A partir da inclusão dos parâmetros correspondentes ao modo de transferência goticular, determinados na Tabela 3.1, obtêm-se os oscilogramas de tensão no arco e corrente de soldagem mostrados na Fig. 3.10. Nota-se uma pequena variação nas amplitudes dos sinais de tensão e corrente de soldagem destes sinais, os quais são características predominantes deste modo de transferência.

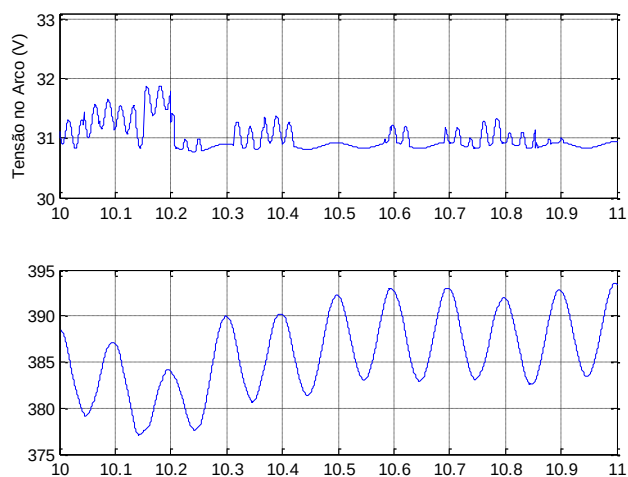


Figura 3.10 - Oscilogramas da tensão no arco e corrente de soldagem para o modo de transferência goticular.

A Figura 3.11 apresenta os oscilogramas de tensão no arco e corrente de soldagem para o MIG pulsado, sendo as correntes de base e de pulso de 50 A e 300 A, com os tempos de base e de pulso de 25 ms e 4 ms, respectivamente. Observa-se que a resposta da tensão e corrente de soldagem equivale aos resultados obtidos experimentalmente.

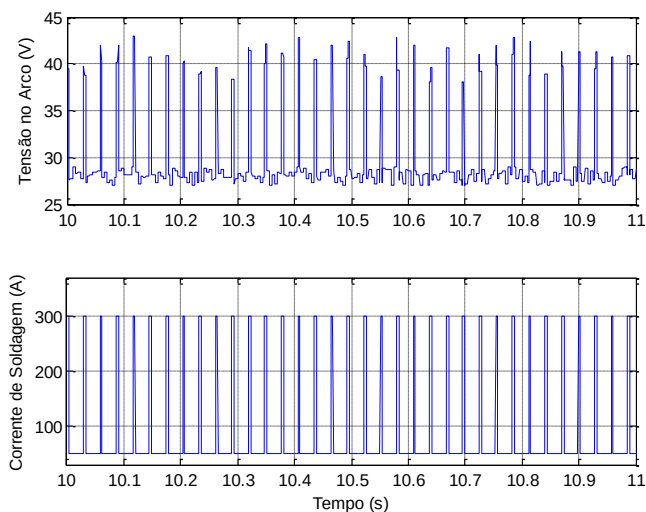


Figura 3.11 - Oscilogramas da tensão no arco e corrente de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 34,5 Hz.

3.7 Considerações Finais

Para atingir o objetivo proposto, especificamente alguns aspectos deveriam ser abordados, entre estes se destacam a criação de um modelo de simulação para o arco de soldagem. Através da síntese dos principais modelos encontrados em documentos bibliográficos, o modelo escolhido foi aquele que de certa forma pudesse ser implementado em um software comercial. Acrescentado ao modelo escolhido foi estabelecido uma queda de tensão pertinente à resistência de contato entre o eletrodo e a poça de fusão, o qual considera a queda de tensão não nula obtida experimentalmente no momento do curto-circuito. Uma vez realizada esta tarefa, para concretizar a modelagem do circuito de potência da máquina de soldagem, foi constituída uma composição entre a estrutura da fonte de soldagem eletromagnética e o arco de soldagem que corresponde a carga elétrica. Assim procedendo torna-se, agora, possível à simulação de uma máquina de soldagem contemplando os diversos modos de transferência metálica. É importante destacar que o modelo proposto não contemplou todas as possíveis variações existentes no meio de soldagem, desta forma, a fim de ter uma resposta mais próxima das encontradas experimentalmente, tanto para o sinal da tensão no arco quanto para a corrente de soldagem, foram inseridas perturbações paramétricas. Observando os sinais obtidos, ficou evidenciada a capacidade de representação dos fenômenos proporcionados no arco de soldagem, evidenciando a potencialidade oferecida pela simulação da máquina de soldagem para o processo MIG/MAG considerando os modos de transferência por curto-circuito, globular, goticular e pulsado.

A seguir será realizada a avaliação experimental a fim de obter a validação do modelo proposto.

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SOLDAGENS MIG/MAG

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo aborda os ensaios experimentais a fim de obter os dados necessários à validação do modelo determinado para simular a máquina de soldagem, proporcionado no capítulo anterior.

Os ensaios realizados correspondem ao processo de soldagem MIG/MAG operando nos modos de transferência por curto-circuito, globular, goticular e pulsado. No ensaio em MIG pulsado, foram realizadas soldagens com várias frequências de pulso. Apesar de não ser possível sua modelagem devido à imposição de corrente, o MIG pulsado foi realizado com o objetivo de constatar a relação entre a frequência de pulso e a frequência inter-harmônica gerada.

Durante os ensaios, os sinais de corrente e tensão no arco de soldagem e ao mesmo tempo na entrada da máquina de soldagem foram adquiridos com o propósito de analisar a relação entre causa e o efeito sobre a QEE sob ação de diferentes modos de transferência. A partir dos oscilogramas destes sinais, foram determinados os valores da sensação instantânea de *flicker* (S_f) e dos índices de severidade de curta duração (P_{st}), para cada modo de transferência metálica.

4.2 Aparato experimental

A Figura 4.1 esquematiza uma máquina de soldagem (transformador, retificador, link DC, inversor, indutores e capacitores), o arco e seu ambiente (com detalhes das grandezas envolvidas no mesmo, tais como distâncias e tensões envolvidas, velocidade de alimentação, taxa de fusão) e os instrumentos de medição (sensores Hall para medição de corrente) para a obtenção das tensões e correntes no arco e no primário do transformador de entrada da máquina de soldagem. A Figura 4.2 mostra parte dessa montagem

experimental utilizado durante o desenvolvimento dos ensaios. Utilizou-se nos experimentos uma inversora chaveada no secundário, modelo DIGITEC 600, fabricada pela empresa IMC Soldagem, com potência nominal de 12 kVA e corrente máxima de saída igual a 600 A.

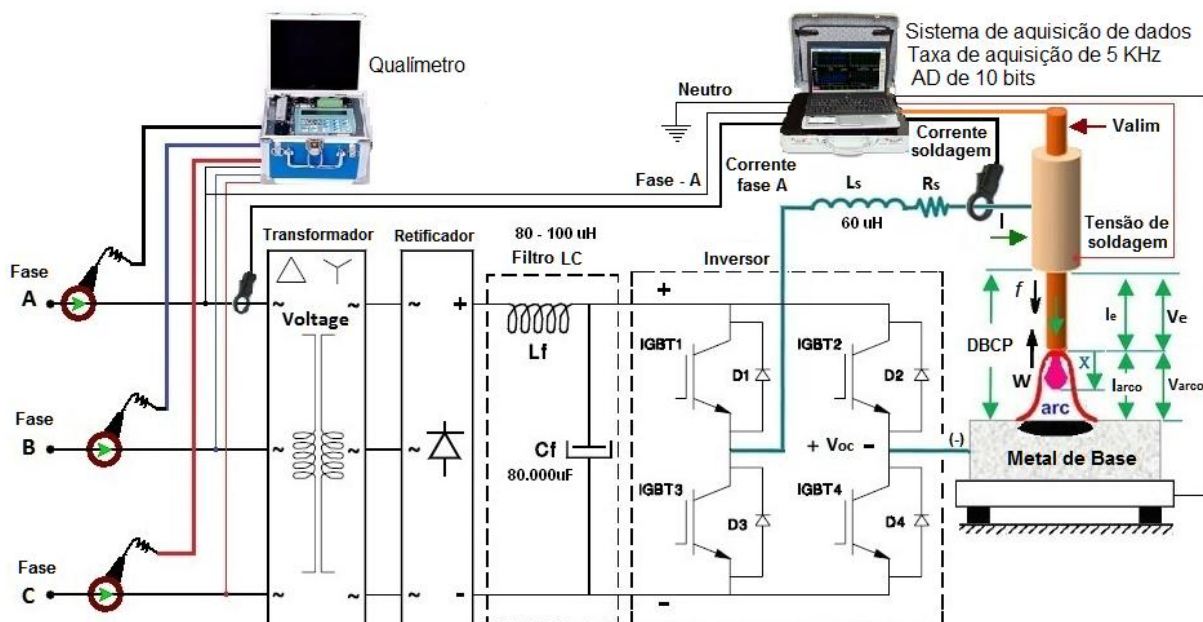


Figura 4.1 – Esquema da máquina de soldagem, arco de soldagem e equipamentos de medição usados nos ensaios para validação dos modelos

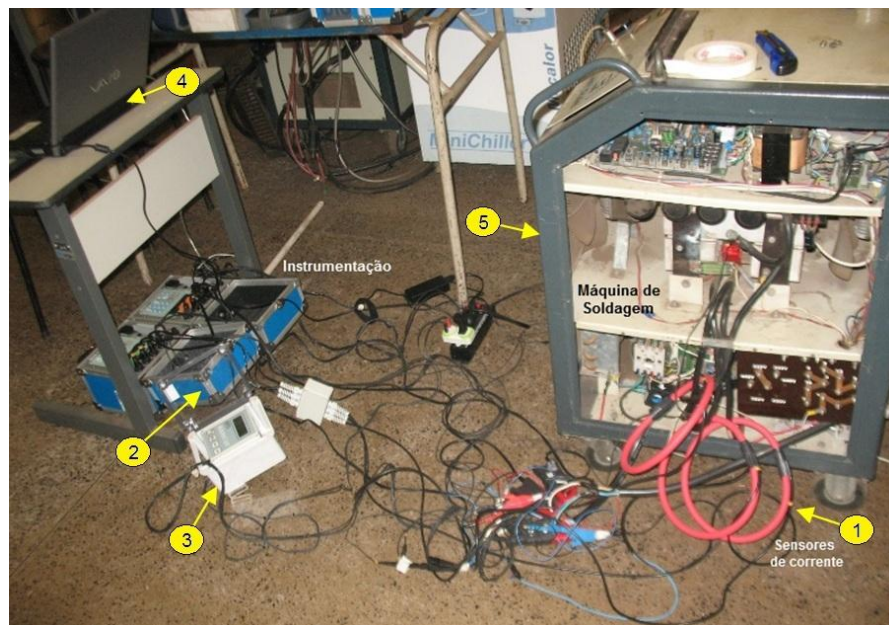


Figura 4.2 – Vista dos instrumentos de medição utilizados: 1) bobina de Rogowski para medir a corrente no primário (CA) em cada fase; 2) analisador de energia, harmônicas e oscilografia de perturbações (MARH-21); 3) medidor de flutuação de tensão (MARH-VF); 4) notebook para capturar dados e 5) máquina de soldagem da IMC Soldagem - Digitec 600

A Figura 4.3(a) ilustra o sistema de aquisição de dados portátil (SAP 4.0) utilizado para a captura dos sinais de corrente e tensão no arco de soldagem e também dos sinais de uma tensão e uma corrente na entrada da máquina de soldagem, bem como a velocidade de alimentação do arame, conforme esquema da Fig. 4.1. Este sistema foi modificado em relação à proposta original a fim de obter instantaneamente os sinais de tensão e corrente na soldagem e na entrada da máquina. Esse sistema de aquisição portátil é constituído de uma placa de aquisição (taxa de aquisição de 5 kHz, conversor AD de 10 bits), baterias, transdutor de velocidade de arame, sensores Hall para medição de corrente (valores máximos de 500 A para a soldagem e 60 A para a entrada da máquina), cabos para medição de tensão e um microcomputador portátil para executar os aplicativos e armazenar os dados recolhidos durante os ensaios (IMC-SOLDAGEM, 2010b).



Figura 4.3 – Equipamentos de medição utilizados nos ensaios: a) sistema de aquisição de dados SAP 4.0 da IMC Soldagem; e b) analisador de energia - RMS MARCH-21

A Figura 4.3(b), por sua vez, mostra o analisador de energia ou qualímetro (RMS MARH-21) utilizado para registrar as tensões e correntes trifásicas no lado primário do transformador da máquina de soldagem a uma taxa de 64 amostras por ciclo. O MARH-21 é um medidor e registrador digital de grandezas em tempo real, destinado ao registro das tensões, correntes, potências, energia, harmônicas e oscilografia de perturbações em sistemas elétricos de geração. Possui um programa específico para a análise dos dados através de gráficos e relatórios.

4.3 Ensaios experimentais para os diversos modos de transferência

Para validar o modelo do arco de soldagem em conjunto com a máquina de soldagem, foram realizados vários ensaios com o processo MIG/MAG nos modos de

transferência por curto-circuito, globular, goticular e pulsado. Em todos os ensaios, os parâmetros de entrada do planejamento experimental foram devidamente configurados com o intuito de produzir condições satisfatórias para a soldagem. O arame utilizado foi da classe AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Alguns dos parâmetros utilizados nos ensaios estão apresentados nas Tab. 4.1., Tab. 4.2 e Tab. 4.3, respectivamente.

Tabela 4.1 - Parâmetros de entrada para as soldagens nos modos de transferência por curto-circuito

Ensaio	Tensão (V)	DBCP (mm)	Gás de proteção	V _{alim} (m/min)
1	21	12	CO ₂	4,5
2	21	12	Ar + 25% CO ₂	4,4
3	23	12	CO ₂	6,5
4	21	12	Ar + 8% CO ₂	4,3
5	19	16	CO ₂	5,5
6	23	16	Ar + 8% CO ₂	6,5
7	21	16	CO ₂	6,8
8	21	12	Ar + 8% CO ₂	6,9
9	21	12	Ar + 25% CO ₂	6,7

Tabela 4.2 - Parâmetros de entrada para as soldagens nos modos de transferência globular e goticular

Transferência	Tensão (V)	DBCP (mm)	Gás de proteção	V _{alim} (m/min)
Globular	28	16	CO ₂	5
Goticular	30	16	Ar + 25% CO ₂	10

Tabela 4.3 - Parâmetros de entradas para as soldagens no modo MIG pulsado

Ensaio	Parâmetros Regulados					Calculados	
	I _p (A)	I _b (A)	t _p (ms)	t _b (ms)	V _{alim} (m/min)	I _m (A)	f _p (Hz)
1	300	50	4	25	2,7	84,5	34,5
2	300	50	4	18	3	95,5	45,5
3	300	50	4	15,3	3	101,8	51,8
4	300	50	4	14	3,3	105,6	55,6
5	300	50	4	12,7	3,5	109,9	59,9
6	300	50	4	10,5	4	118,5	68,8
7	300	50	4	7,6	4,3	136,2	86,2

4.3.1 Modo de transferência por curto-circuito

Neste modo de transferência, foram realizados 9 ensaios, porém, apenas um destes é apresentado, visto se tratar de resultados bem aproximados e terem as mesmas conclusões. Nos ensaios experimentais foram estabelecidos três níveis de tensão (19, 21 e 23 V), duas DBCP (12 ou 16 mm) e três misturas de gases de proteção (CO_2 , Ar + 25% CO_2 ou Ar + 8% CO_2) com vazão mantida a uma taxa de 15 l/min. Por meio do ajuste da velocidade de alimentação do arame-eletrodo (entre 4 e 7 m/min), a corrente média resultante variou entre 150 e 200 A. Não foram realizadas todas as combinações pois o objetivo do trabalho não é de verificar o comportamento de cada variação paramétrica, mas verificar o comportamento dos sinais de tensão e corrente característicos deste modo de transferência. Assim sendo, tem-se a preocupação em cada ensaio realizado de manter os parâmetros ajustados a fim de obter boa qualidade no cordão de solda. O ensaio 3 foi escolhido para apresentação dos resultados experimentais, tendo os ajustes para a tensão, DBCP e velocidade de alimentação do arame estabelecidos com 23 V, 12 mm e 6,5 m/min, respectivamente. O gás de proteção deste ensaio foi o CO_2 .

A Figura 4.4 mostra de forma sobreposta os oscilogramas das tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem para um tempo de 150 ms. Pode-se verificar que a frequência da corrente de soldagem não é constante, variando entre 30 Hz a 45 Hz, isto pode ser justificado pela dificuldade em manter a transferência por curto-circuito sempre de maneira estável. Os valores máximos (no momento da abertura do arco) e mínimos (no momento do início do novo curto-circuito) atingidos pelas correntes de soldagem neste intervalo têm pequenas variações.

A Figura 4.5 mostra separadamente os mesmos oscilogramas apresentados de forma sobreposta na Fig. 4.4, porém em um intervalo de tempo maior (500 ms). Na Figura 4.5(a), tem-se a tensão de curto-circuito no arco. Percebe-se que a frequência de curto-circuito neste intervalo é quase constante (aproximadamente 34 Hz), porém este fato não acontece permanentemente, devido às variações nos intervalos de curto-circuito. A corrente de curto-circuito, mostrada na Fig. 4.5(b), tem os valores de pico e mínimo próximos de 350 A e 75 A, respectivamente.

A flutuação da tensão na entrada da máquina de soldagem pode ser verificada na Fig. 4.5(c). Isto se deve à solicitação de correntes (pico e mínima) em frequências diferentes da rede de alimentação da máquina de soldagem. Na Figura 4.5(d) verifica-se uma variação do pico da corrente instantânea no primário da máquina de soldagem, oscilando entre 20 e 45 A. Estas oscilações são responsáveis pelo surgimento de frequências inter-harmônicas sobrepostas ao sinal fundamental, conforme mencionado no item 2.7.4, o que poderá causar a cintilação luminosa.

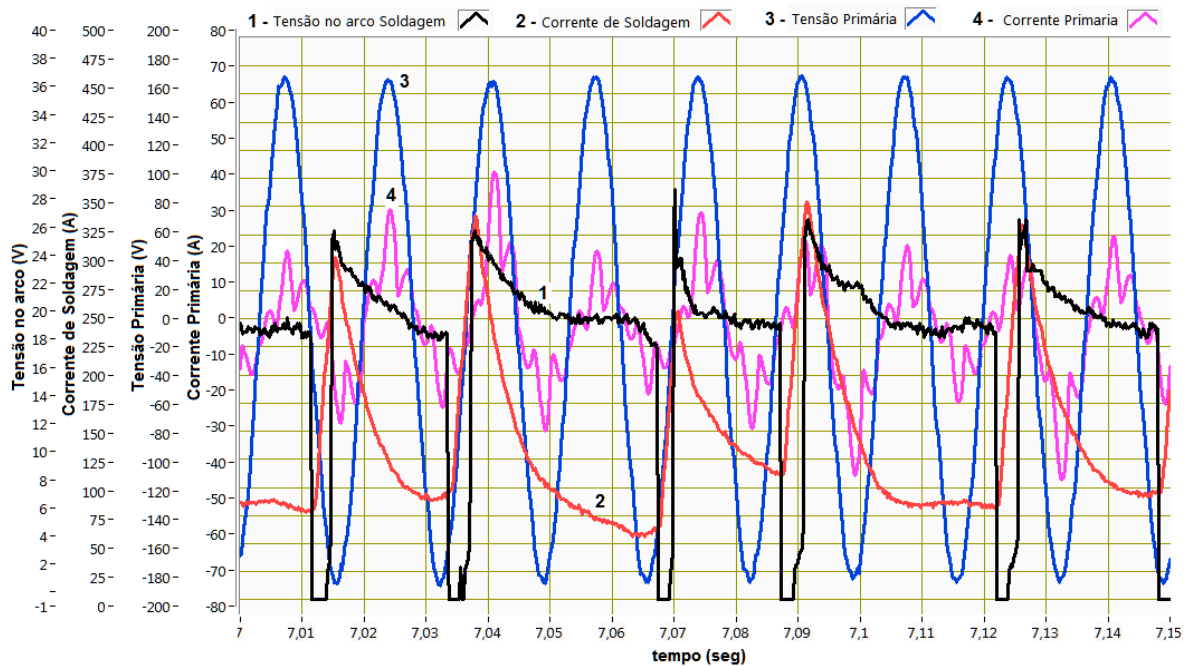


Figura 4.4 – Oscilogramas de tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem referente ao ensaio do modo de transferência por curto-circuito

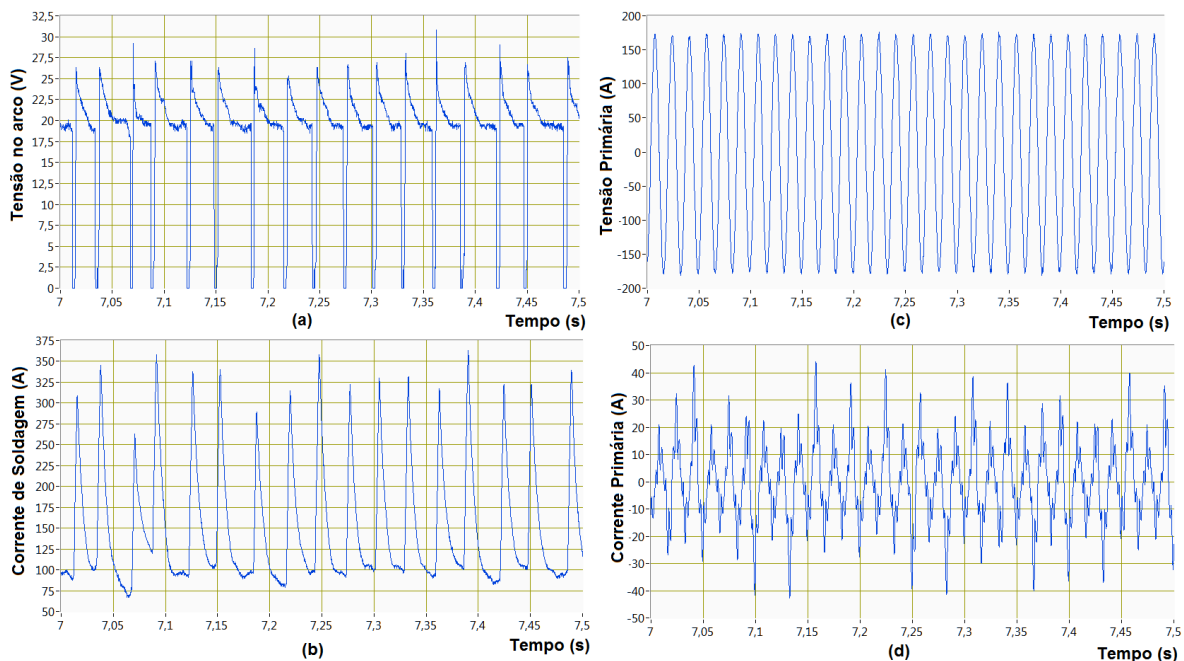


Figura 4.5 – Oscilogramas de tensões e correntes: a) tensão no arco; b) corrente de soldagem; c) tensão no primário da máquina de soldagem; d) corrente no primário da máquina de soldagem

Os picos de corrente no primário ocorrem quando a tensão na saída do transformador torna-se maior que a tensão no capacitor após o retificador, sendo que o valor do pico de corrente depende da diferença entre estas duas tensões.

A Figura 4.6 mostra a relação conjugada entre os sinais elétricos (V versus I) na entrada da máquina de soldagem e no arco elétrico de soldagem (carga). Neste caso, fica evidente a não linearidade entre tensão e corrente no processo de soldagem MIG/MAG. Isto certifica que as máquinas de soldagem são cargas não lineares com comportamento aleatório. Para a figura da tensão e corrente de soldagem fica evidente os intervalos de arco aberto e curto-circuito.

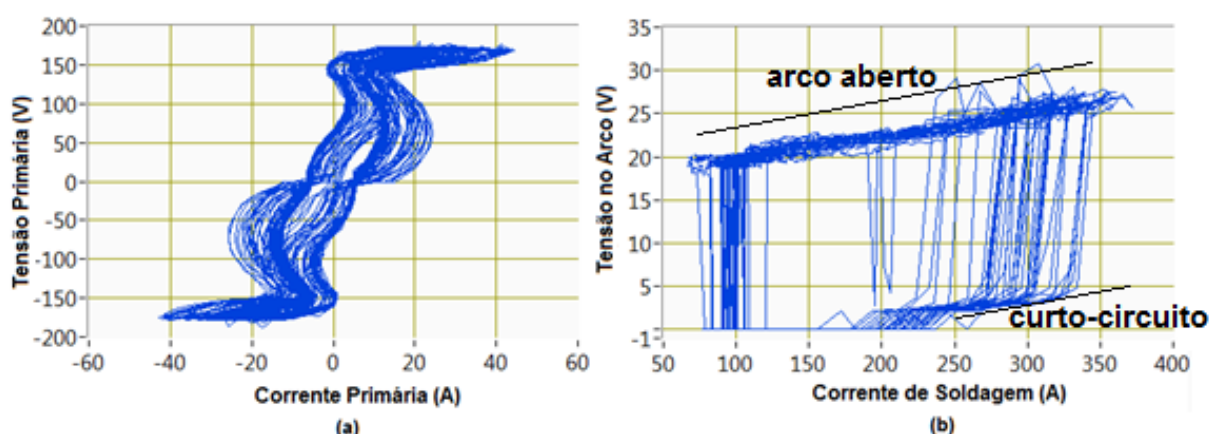


Figura 4.6 – Comportamento conjugado dos sinais elétricos (V versus I) para o modo de transferência por curto-circuito: a) primário na máquina de soldagem (fase - A); b) arco de soldagem

4.3.2 Modo de transferência globular

Neste ensaio foi usado um ajuste da tensão para 28 V, uma DBCP de 16 mm e o gás de proteção CO_2 com vazão mantida a uma taxa de 15 l/min. A velocidade de alimentação do arame-eletrodo foi de 6 m/min, tendo a corrente média sido de aproximadamente 180 A.

A Figura 4.7, mostra os oscilogramas das tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem (período de 300 ms). Verifica-se uma relação direta entre a corrente de soldagem e a corrente a suprida pela rede de alimentação, isto porque a tensão é constante. Pode-se comprovar pelo intervalo entre 10,04 a 10,12 segundos, onde, à medida que a corrente de soldagem reduz a valores próximos de 140 A, o valor da corrente de pico na rede de alimentação é reduzido de aproximadamente 45 A para 35 A.

Para uma melhor visualização dos sinais, os oscilogramas são separados e apresentados em um período de 2 segundos, conforme mostra as Fig. 4.8. Na Figura 4.8(a), a tensão no modo de transferência globular é totalmente diferente do modo em curto-circuito; pode-se verificar que os valores tornam-se mais constantes, sem a presença de tensões próximas de zero oriunda do intervalo de curto-circuito.

Na Figura 4.8(b), verifica-se uma oscilação na corrente de soldagem de aproximadamente 100 A, ou seja, entre 125 A e 225 A. Enquanto isto, a corrente de pico

instantânea do primário da máquina oscila em aproximadamente 10 A, conforme a Fig. 4.8(d). A flutuação de tensão do primário da máquina de soldagem, conforme a Fig. 4.8(c) é devido a variação da corrente no arco de soldagem e, por sua vez, da corrente no primário da máquina de soldagem. Esta flutuação de tensão poderia ser maior ou menor dependendo das características do sistema elétrico apresentado até o ponto de alimentação da máquina de soldagem. Assim sendo, para a mesma corrente solicitada, podem-se ter flutuações de tensão diferenciadas em cada caso.

A Figura 4.9 mostra a relação conjugada entre os sinais elétricos (*V versus I*) na entrada da máquina de soldagem e no arco elétrico de soldagem para este modo de transferência. Neste caso, verifica-se a mesma não linearidade entre tensão e corrente, com uma menor variação dos sinais de soldagem em comparação com o modo de transferência por curto-circuito. Fica evidenciado que a tensão no arco permanece mais estabilizada (entre 28 a 32V) considerando uma ampla faixa de corrente de soldagem (125 a 220 A).

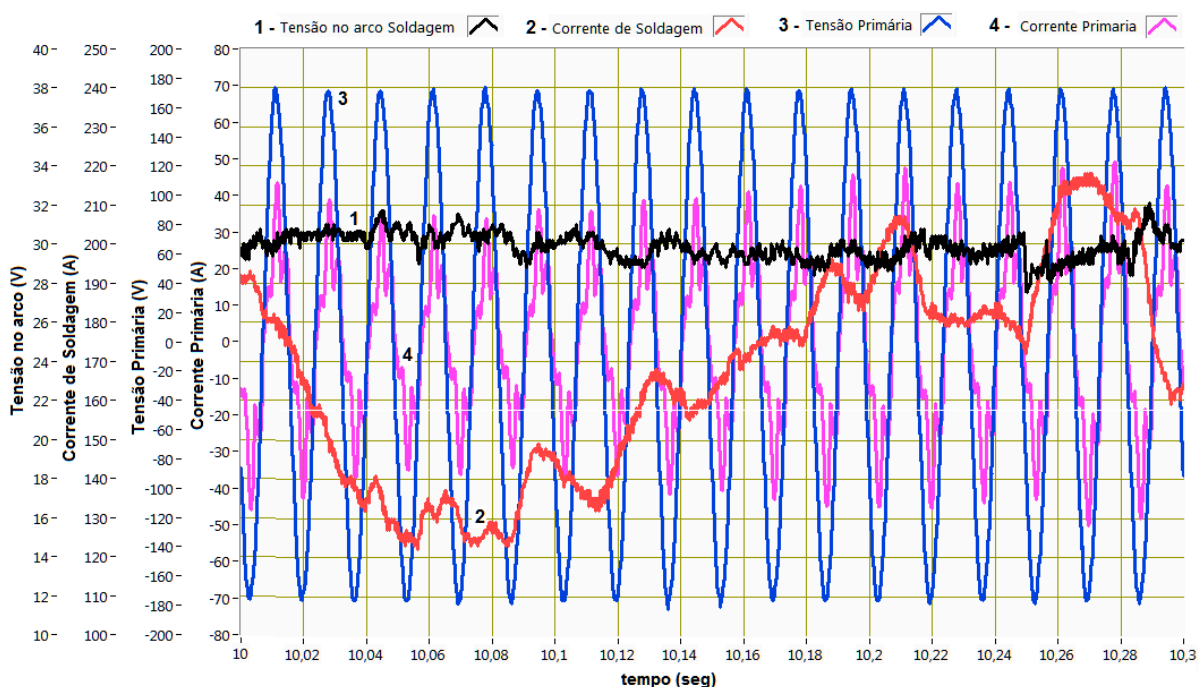


Figura 4.7 – Oscilogramas de tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem referente ao ensaio do modo de transferência globular

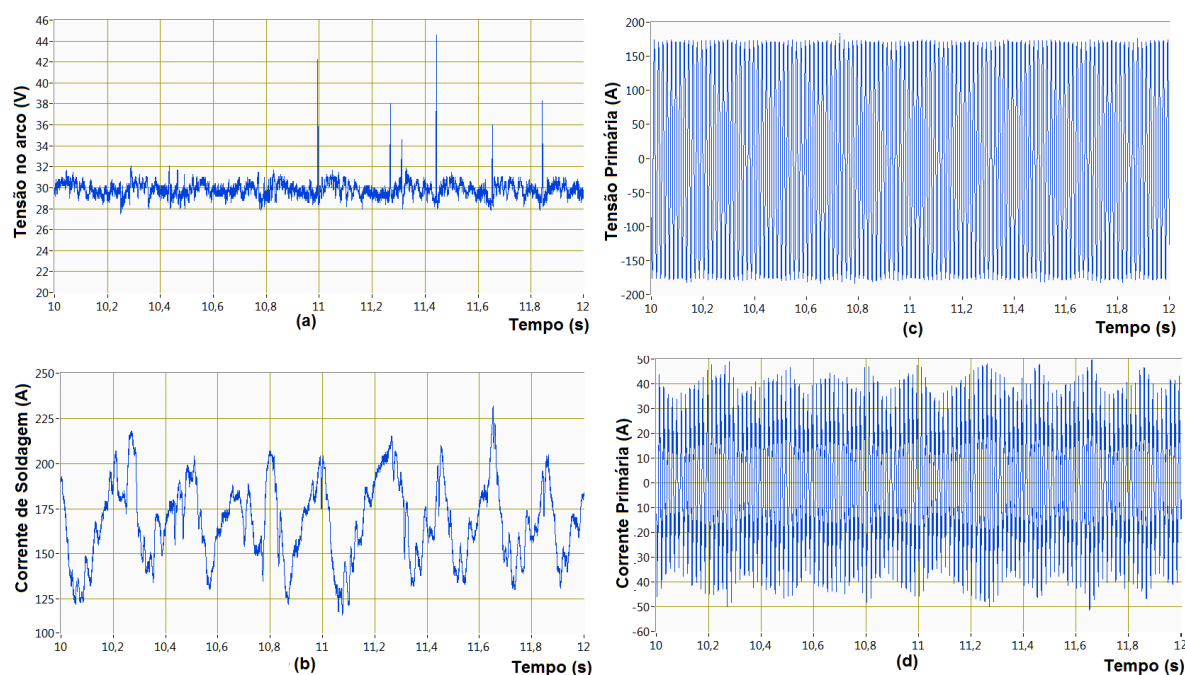


Figura 4.8 – Oscilogramas de tensões e correntes (modo de transferência globular): a) tensão no arco; b) corrente de soldagem; c) tensão no primário da máquina de soldagem; d) corrente no primário da máquina de soldagem

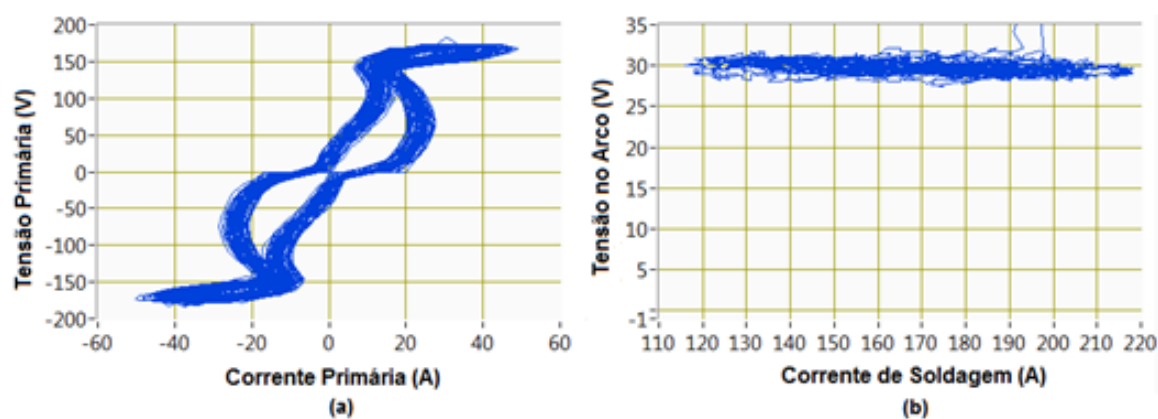


Figura 4.9 – Comportamento conjugado dos sinais elétricos (V versus I) para o ensaio com modo de transferência globular: a) para o primário na máquina de soldagem (fase - A); b) para o arco elétrico de soldagem

4.3.3 Modo de transferência goticular

Para este ensaio, foi aplicado um nível de tensão de 30 V com uma DBCP de 16 mm e um gás de proteção com a mistura $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, sendo mantida uma vazão com taxa de 15 l/min. A velocidade de alimentação do arame-eletrodo foi de 10 m/min, atingindo uma corrente média em torno de 300 A.

A Figura 4.10 mostra os oscilogramas das tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem (período de 200 ms). Verifica-se uma maior estabilidade na corrente de soldagem (carga) e na corrente suprida pela rede de alimentação. Como ambas as correntes possuem pequenas variações, a flutuação de tensão neste caso é menor, mesmo tendo amplitudes superiores comparadas aos modos de transferência por curto-circuito e globular (sem considerar os picos no curto circuito).

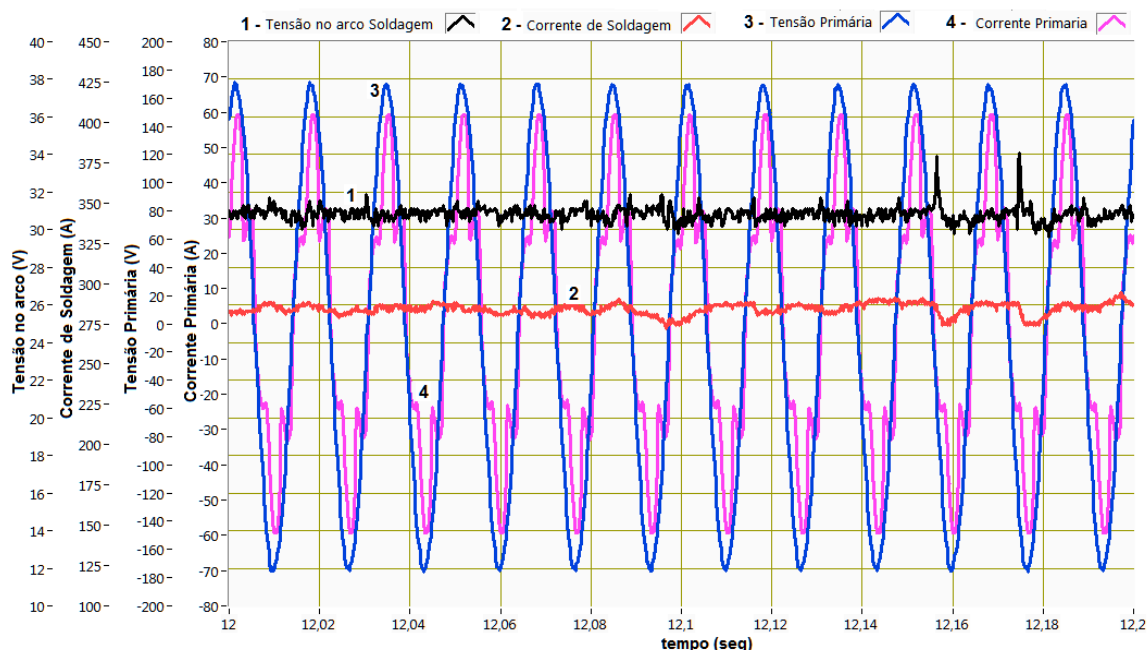


Figura 4.10 – Oscilogramas de tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem para o ensaio do modo de transferência goticular

Na Figura 4.11(b), a corrente de soldagem varia aproximadamente entre 275 e 300 A (variação de 25 A), enquanto a corrente de pico instantânea do primário da máquina tem pequenas oscilações, conforme a Fig. 4.11(d). Consequentemente, a flutuação de tensão do primário da máquina de soldagem é considerada pequena. Porém, esta conclusão não serve como referência para determinar que a cintilação luminosa seja menor que os casos anteriores.

A Figura 4.12 mostra comportamento conjugado dos sinais elétricos (V versus I), neste caso, verifica-se que este modo de transferência possui uma melhor estabilidade do arco comparada aos modos de transferência citados anteriormente (curto-circuito e globular).

Comparativamente aos demais modos de transferência anteriormente analisados, percebe-se uma menor variação da tensão de soldagem (entre 30 a 32V) considerando uma estreita faixa de corrente de soldagem (280 a 308 A).

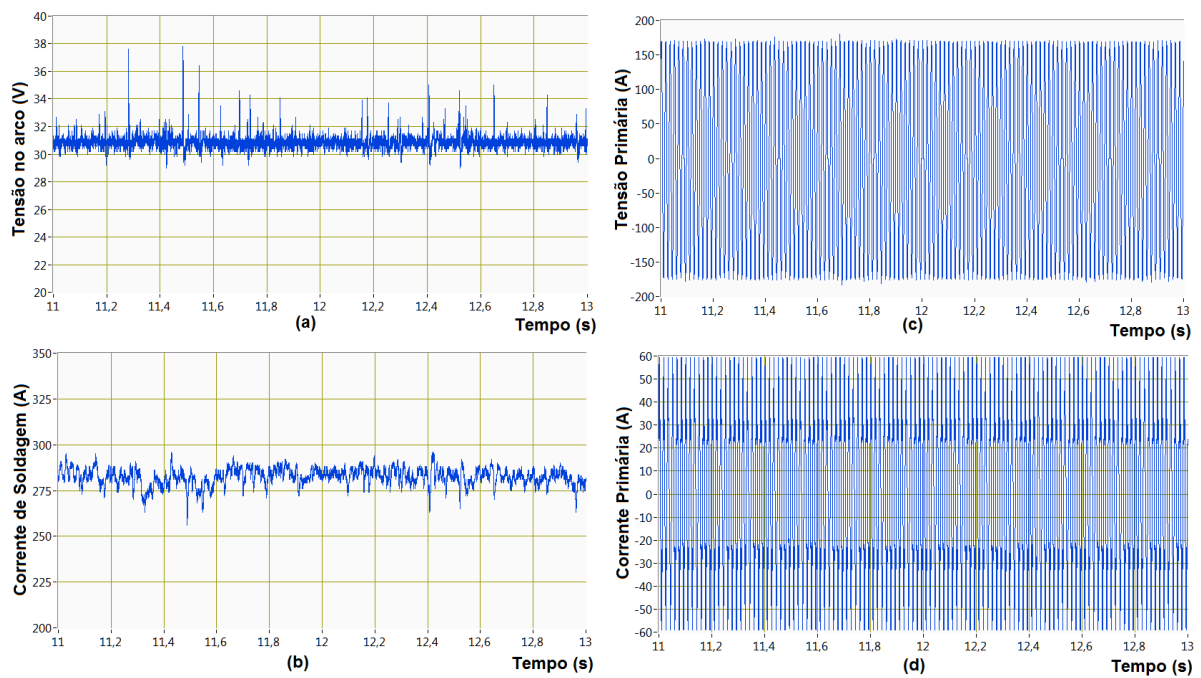


Figura 4.11 – Oscilogramas de tensões e correntes para o ensaio no modo de transferência goticular: a) tensão no arco; b) corrente de soldagem; c) tensão no primário da máquina de soldagem; d) corrente no primário da máquina de soldagem

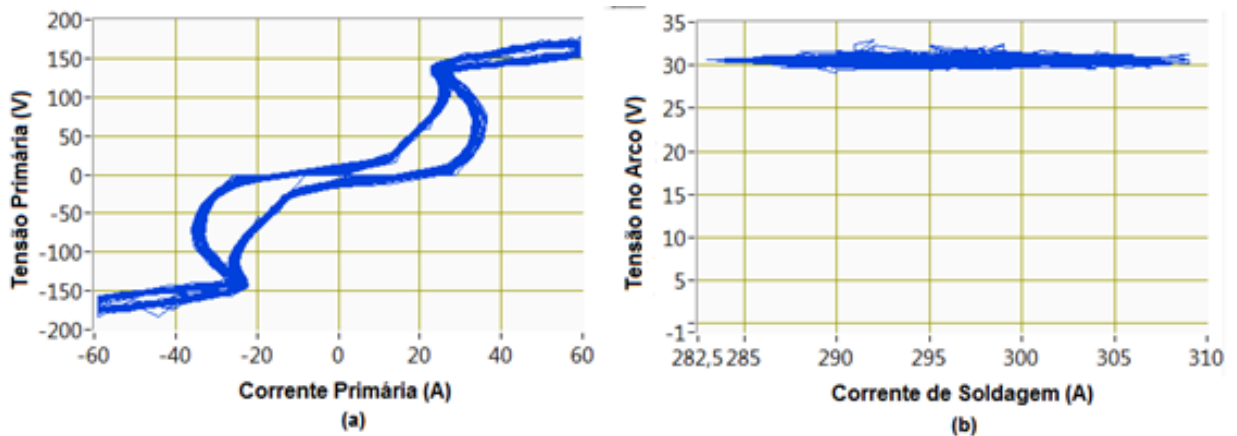


Figura 4.12 – Comportamento conjugado dos sinais elétricos (V versus I) para o ensaio com modo de transferência goticular: a) para o primário na máquina de soldagem (fase - A); b) para o arco elétrico de soldagem

4.3.4 MIG pulsado

Para o MIG pulsado foram realizados 7 ensaios, sendo cada ensaio com uma frequência de pulso diferente. A frequência de pulso ($f_p = 1/t_b + t_p$) é o número de ocorrência da corrente de pulso por segundo. O período de pulso ($t = t_b + t_p$), por sua vez, é

definido como sendo o período entre o início do pulso e o fim do tempo de base (anterior ao próximo pulso).

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios bem como as frequências de pulso e as correntes médias. Em todos os ensaios, manteve-se a distância bico de contato-peça (DBCP) igual a 16 mm. O gás de proteção utilizado foi a mistura de Ar + 8% CO₂, com vazão de 15 l/min.

O tempo de pulso, corrente de pulso e corrente de base foram definidas como sendo constantes em todos os ensaios, enquanto o tempo de base foi modificado a fim de obter diferentes frequências de pulso.

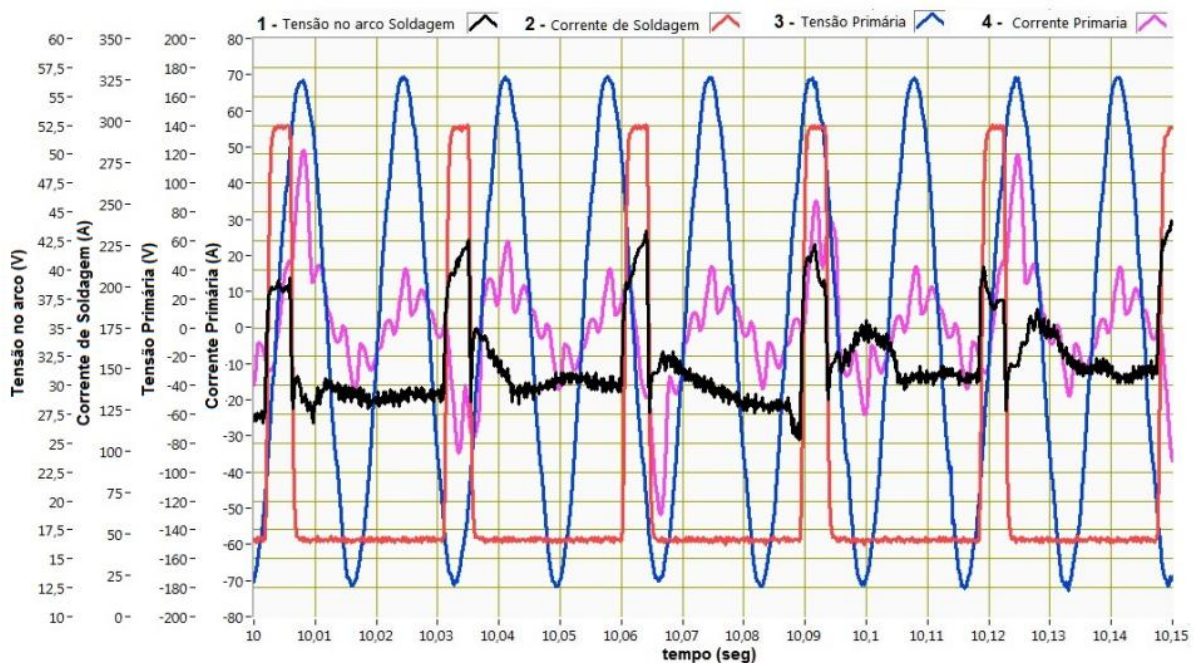


Figura 4.13 – Oscilogramas de tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem para uma frequência de pulso de 34,5 Hz

A Figuras 4.14 apresenta os oscilogramas das tensões e correntes no arco e no primário da máquina de soldagem para a frequência de pulso de 34,5 Hz. Em cada figura foi selecionado um período onde houve uma maior estabilidade dos sinais. Para o ensaio foi utilizado os parâmetros estabelecidos na Tab. 4.3.

As Figuras 4.15(a) e 4.15(b) mostram os oscilogramas da tensão no arco e corrente de soldagem. Verifica-se que as correntes de base e de pulso são de 50 A e 300A. A corrente de entrada da máquina possui uma envoltória que proporciona uma flutuação de tensão na tensão de entrada, conforme mostram as Fig. 4.15(c) e 4.15(d).

A Figura 4.16 apresenta o comportamento conjugado dos sinais elétricos (*V versus I*) para a frequências de pulso de 34,5 Hz. Pode-se observar um comportamento não linear

entre tensão e corrente, sendo característica do processo de soldagem. Os oscilogramas para as demais frequências de pulso analisadas estão incluídas no apêndice - A.

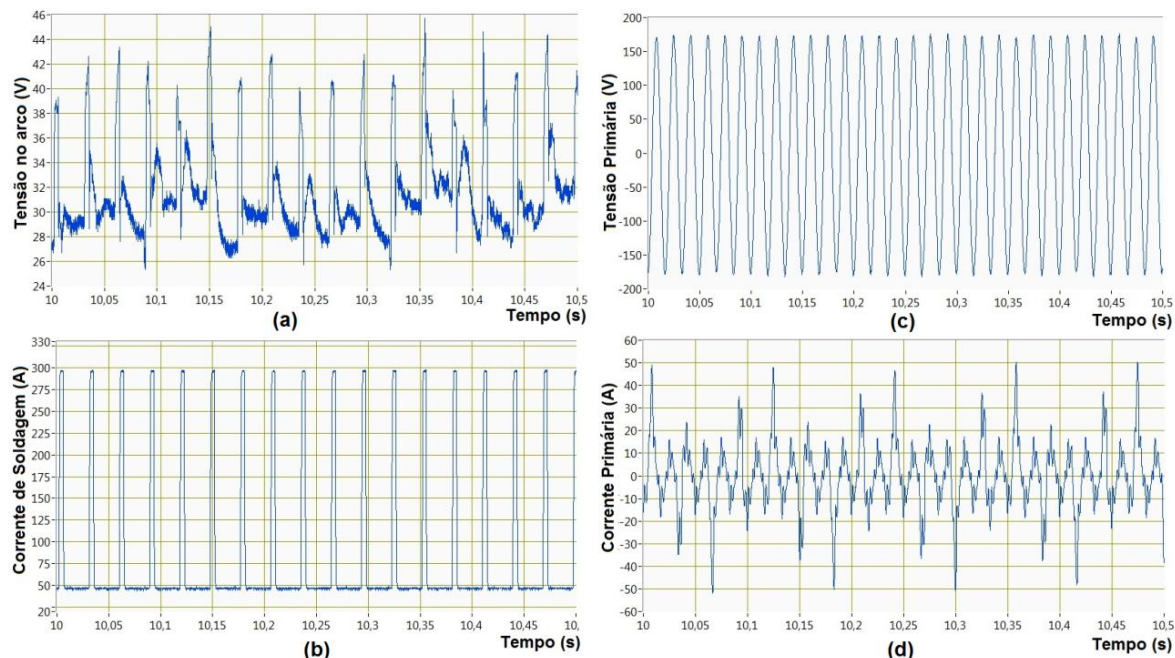


Figura 4.15 – Oscilogramas de tensões e correntes para a condição MIG pulsado - 34,5 Hz: a) tensão no arco; b) corrente de soldagem; c) tensão no primário da máquina de soldagem; d) corrente no primário da máquina de soldagem

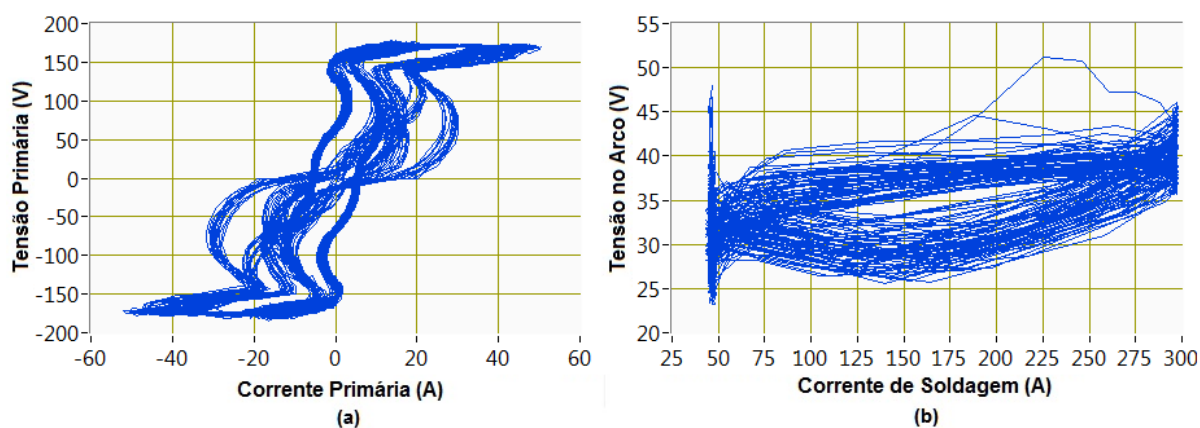


Figura 4.16 – Comportamento conjugado dos sinais elétricos (V versus I) para uma frequência de pulso de 34,5 Hz: a) para o primário na máquina de soldagem (fase - A); b) para o arco elétrico de soldagem

4.4 Espectros de frequências inter-harmônicas

Conforme visto no item 2.7.4, a frequência de modulação é determinada pelo módulo da diferença entre a frequência inter-harmônica, sobreposta ao sinal fundamental, e a

frequência harmônica imediatamente adjacente. Desta forma, pode-se obter o comportamento das frequências inter-harmônicas geradas para cada ensaio realizado.

A fim de obter uma melhor identificação das componentes inter-harmônicas presentes nos sinais registrados, é necessário acumular dados com janelas amostrais de 60 ciclos de duração para obter uma resolução de 1 Hz nos espectros de tensão e corrente de entrada. Para cada modo de transferência é apresentado apenas uma figura com intervalo de 1 segundo dos sinais de corrente e tensão primária e os respectivos espectros de frequência. O Apêndice - B apresenta uma sequência de seis espectros de frequência inter-harmônicas obtidos nos ensaios experimentais e simulados, cuja finalidade é proporcionar uma melhor compreensão das características apresentadas ao longo do tempo por cada modo de transferência.

4.4.1 Curto-circuito

A Figura 4.17 mostra os oscilogramas da corrente instantânea e tensão instantânea no lado primário do transformador da máquina de soldagem e seus respectivos espectros de frequência. Neste modo de transferência, os espectros da corrente e consequentemente da tensão, são caracterizados por terem uma menor amplitude, porém com um grande número de frequências inter-harmônicas geradas.

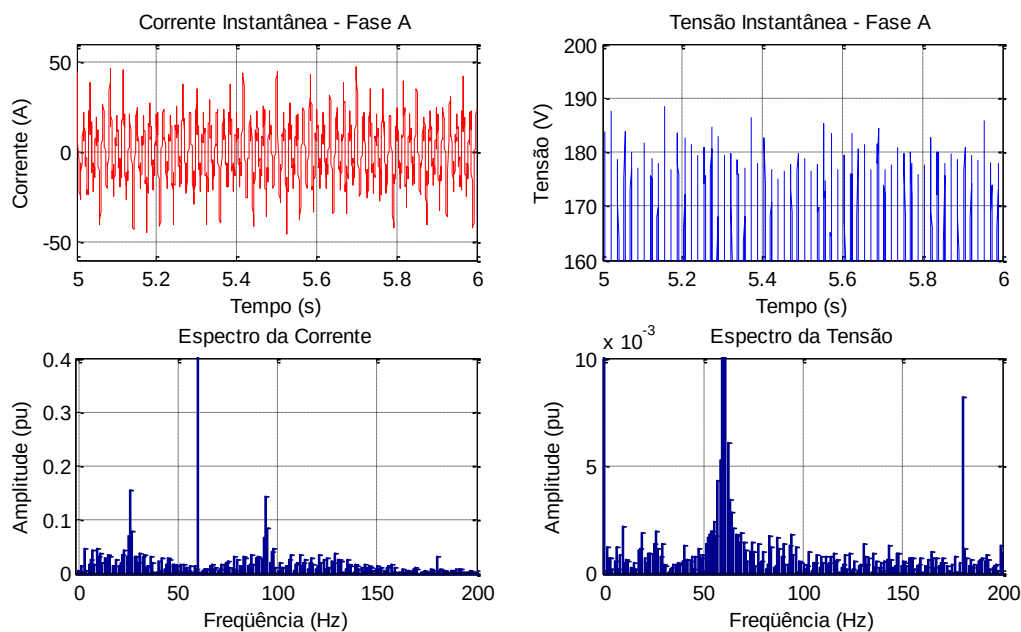


Figura 4.17 – Oscilogramas da corrente instantânea e tensão instantânea da máquina de soldagem e seus respectivos espectros de frequência para o modo de transferência por curto-circuito

Ao longo de todo o período de soldagem não fica evidenciada a predominância de uma frequência inter-harmônica. Apesar da figura apresentar duas frequências inter-harmônicas bastante destacadas, em outros intervalos de soldagem o mesmo destaque pode não ocorrer. Este fato está relacionado com a operação do soldador, ou seja, quando este consegue realizar uma soldagem com boa regularidade (para o modo de transferência por curto-circuito), os intervalos das frequências de curtos-circuitos tornam-se constantes, desta forma mantêm-se destacadas as frequências inter-harmônicas. No caso da frequência de pulso de 34,5 Hz, fica evidenciada as frequências inter-harmônicas próximas de 22 e 90 Hz. Vale salientar que a modulação da tensão de entrada, nem sempre estas possuem as mesmas correspondências encontradas nos espectros de frequências inter-harmônicas das correntes, visto que a flutuação de tensão está diretamente relacionada com a impedância dos elementos da rede.

4.4.2 Globular

A Figura 4.18 mostra os oscilogramas da corrente instantânea e tensão instantânea no lado primário do transformador da máquina de soldagem e seus respectivos espectros de frequência para uma soldagem no modo globular.

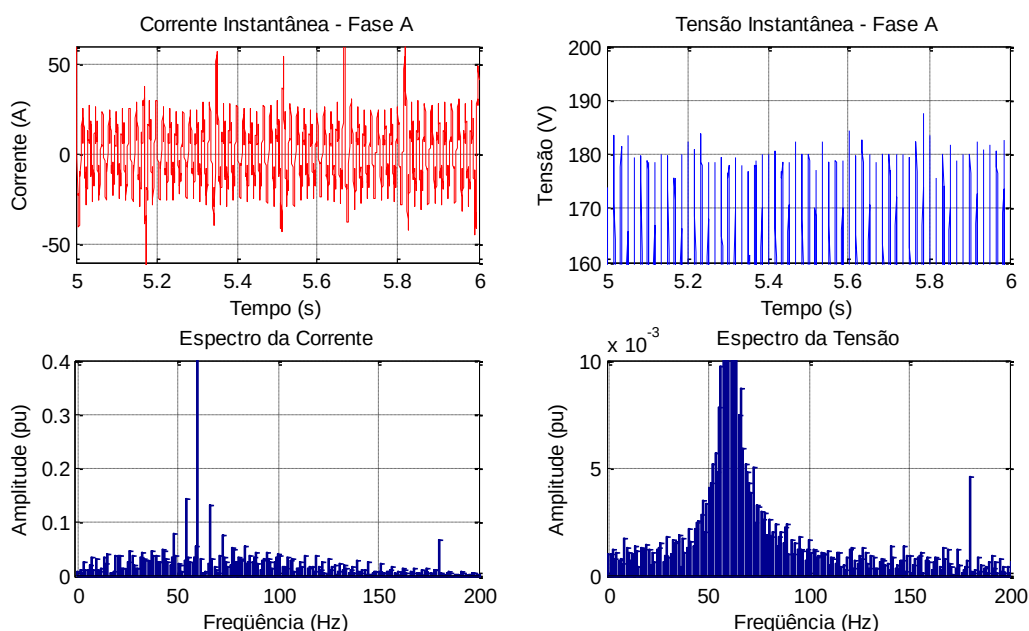


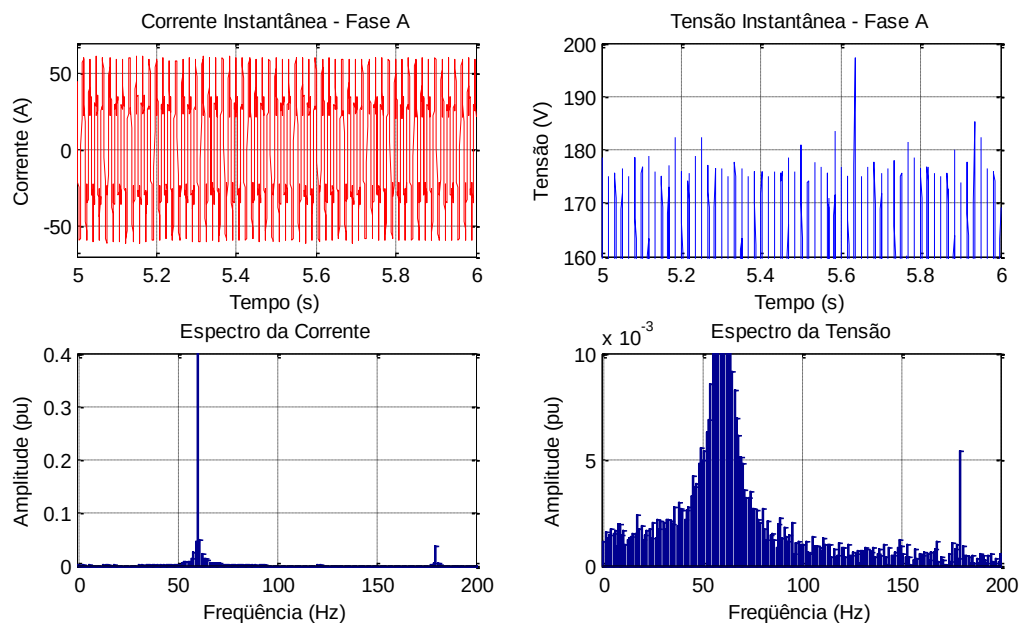
Figura 4.18 – Oscilogramas da corrente instantânea e tensão instantânea da máquina de soldagem e seus respectivos espectros de frequência para o modo de transferência globular

Neste modo de transferência, os espectros da corrente e, conseqüentemente, da tensão são caracterizados por terem um grande número de frequências inter-harmônicas

geradas. Ao longo de todo o período de soldagem, não existe uma predominância da frequência inter-harmônica. Em nenhum momento, o processo de soldagem atingiu uma transferência estável. Portanto, nestes períodos, nenhuma frequência inter-harmônica surgiu com maior evidência.

4.4.3 Goticular

A Figura 4.19 mostra os oscilogramas da corrente instantânea e tensão instantânea da máquina de soldagem e seus respectivos espectros de frequência para uma soldagem no modo goticular. Os espectros da corrente e da tensão são caracterizados por terem a menor amplitude entre os demais modos de transferência. Ao longo de todo o período de soldagem não foram observadas frequências inter-harmônicas.



F

figura 4.19 – Oscilogramas da corrente instantânea e tensão instantânea da máquina de soldagem e seus respectivos espectros de frequência para o modo de transferência goticular

4.4.4 Frequência de pulso de 34,5 Hz

A Figura 4.20 mostra os espectros de frequências da corrente e tensão no lado primário do transformador da máquina de soldagem para uma soldagem pulsada a 34,5 Hz. Constata-se que a frequência de pulso imposta na corrente de soldagem está diretamente relacionada à frequência inter-harmônica verificada nos sinais de corrente no lado primário do transformador da máquina de solda. Tal relação foi verificada pois, para uma frequência de pulso igual a 34,5 Hz, verificam-se correntes inter-harmônicas com frequências de 25,5 Hz ($60 \text{ Hz} - 34,5 \text{ Hz}$) e 94,5 Hz ($60 \text{ Hz} + 34,5 \text{ Hz}$). Como a resolução espectral é de apenas

1,0 Hz, os respectivos valores indicados no espectro serão iguais a 26 Hz e 94 Hz, acompanhados, de certo conteúdo de espalhamento espectral. Pode-se constatar a presença de outras frequências inter-harmônicas no espectro, sendo refletidas pela frequência de pulso, tais como as de 9 Hz e 43 Hz (para 26 Hz) e 129 Hz e 163 Hz (para 94 Hz).

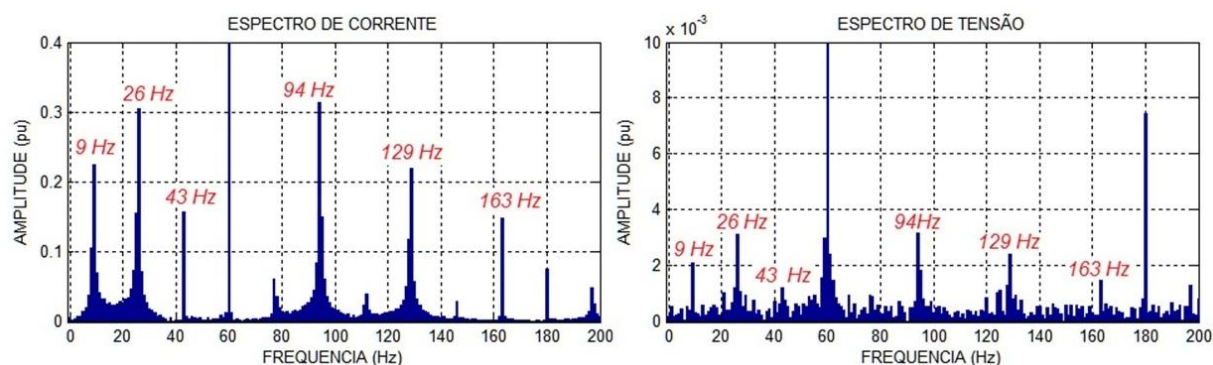


Figura 4.20 – Espectros da corrente e tensão para uma frequência de pulso de 34,5 Hz

Para as demais frequências de pulso apresentadas no apêndice - C, pode-se verificar a tendência da geração de frequências inter-harmônicas mais precisas do que nos casos de modo de transferência por curto-circuito, globular e goticular. Nestes casos, como as frequências de transferência não são previamente determinadas e nem mesmo constantes, dificilmente tem-se bem caracterizado as frequências inter-harmônicas nos sinais de corrente e tensão primária da máquina de soldagem.

4.5 Determinação da Sensação instantânea de *flicker* (S_f) e índice de severidade de curta duração (P_{st})

Para determinar o indicador P_{st} , foi medido o valor da tensão de entrada por um período de 10 minutos ininterruptos. Como cada ensaio não superou 20 segundos, torna-se necessário replicar os dados até que estes alcancem 700 segundos. Os 100 segundos excedentes são considerados a fim de estabilização dos filtros de ponderação recomendados pelo bloco 3 do *flickermeter*.

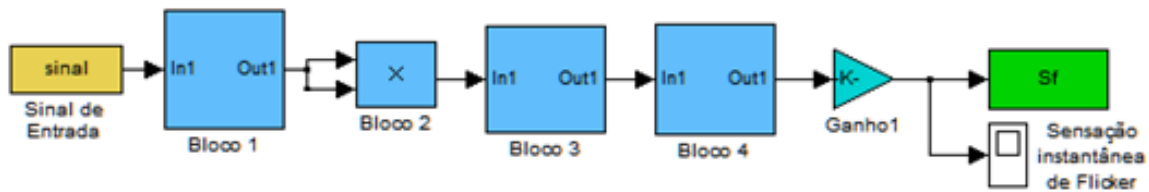


Figura 4.21 – Diagrama de blocos do *flickermeter* desenvolvido por Macedo (2009)

Para a determinação da S_f e do P_{st} , conforme apresentado na Fig. 4.21, foi utilizado o *flickermeter*, proposto por Macedo (2009). O diagrama do *flickermeter* possui 5 blocos, sendo a saída do bloco 4 a S_f . O bloco 5 proporciona o tratamento estatístico da S_f , resultando no índice P_{st} .

Macedo (2009) implementou um programa para realizar a ordenação do vetor S_f , seguido do cálculo dos valores de percentil indicados na Equação 2.21. Posteriormente, o valor do P_{st} é determinado conforme Equação 2.20. Na realidade os referidos valores de percentil são calculados simplesmente buscando-se sua posição no novo vetor ordenado de S_f . Esta nova proposta torna-se extremamente simplificada em relação ao modelo original definido pela IEC 61.000-4-15, porém, igualmente funcional.

Para se obter a S_f através desta nova proposta, deve-se inserir o sinal de tensão, com extensão ".txt", e a taxa de amostragem. O P_{st} é determinado, inserindo o sinal de S_f no do programa implementado para o bloco do tratamento estatístico. Todos os dados obtidos nos ensaios pelos instrumentos de medição (qualímetro e sistema de aquisição de dados específico da máquina de soldagem) são tratados, a fim de adaptá-los à entrada do *flickermeter*.

Conforme mencionado anteriormente, como o tempo de soldagem tem poucos segundos, torna-se necessário ajustar corretamente os arquivos de entrada para o *flickermeter*. Nestes casos, para cada arquivo foram realizadas as seguintes tarefas:

- a) Considerar o início e o fim do novo arquivo apenas quando a corrente de soldagem atingir um valor mínimo pré-estabelecido característico de cada modo de transferência;
- b) Com o arquivo do item anterior, analisar os vetor do sinal de tensão que passa próximo de zero ou definir uma pequena variação neste intervalo;
- c) Com os vetor o item anterior, analisar a tendência de inclinação do sinal da tensão (+ ou -) para o início e fim do vetor, até que ambas as inclinações (início e fim do vetor) sejam idênticas (neste caso, tem-se o início e fim do vetor final);
- d) A partir do vetor final (sinal de tensão), repetir o mesmo até atingir um período de 700 segundos (visto que os 100 segundos iniciais são "desprezados" pelo *flickermeter* devido ao tempo de estabilização dos filtros de ponderação).

Portanto, a partir da determinação dos vetores da tensão de entrada da máquina de soldagem que representam a flutuação de tensão, emprega-se o programa do *flickermeter*, conforme a Fig. 4.21 a fim de obter a S_f .

As Figuras 4.22 a 4.25 mostram as S_f para os diversos modos de transferência. Nestas figuras, observa-se que os valores para a S_f são sempre repetidos. Por definição, o limiar da percepção da sensação de flutuação de tensão e o limiar de irritação são de 1,0 pu, respectivamente.

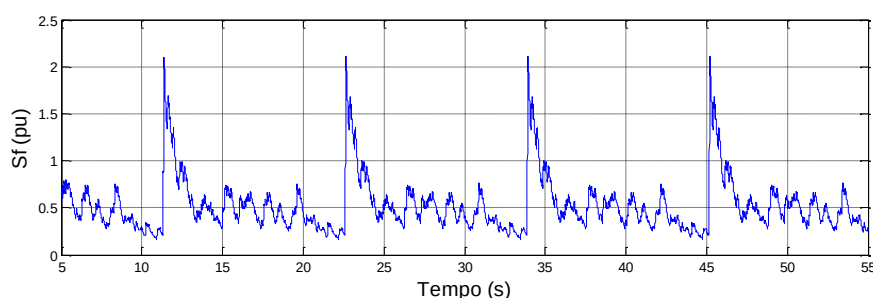


Figura 4.22 – Sensação instantânea de *Flicker* em (pu) para uma soldagem no modo de transferência por curto-circuito

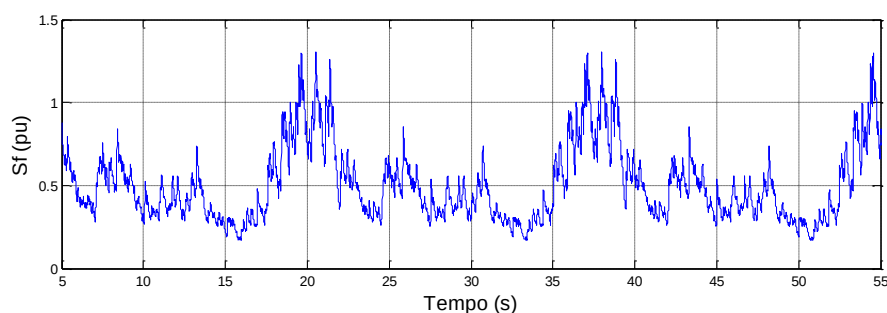


Figura 4.23 – Sensação instantânea de *Flicker* em (pu) para uma soldagem no modo de transferência globular

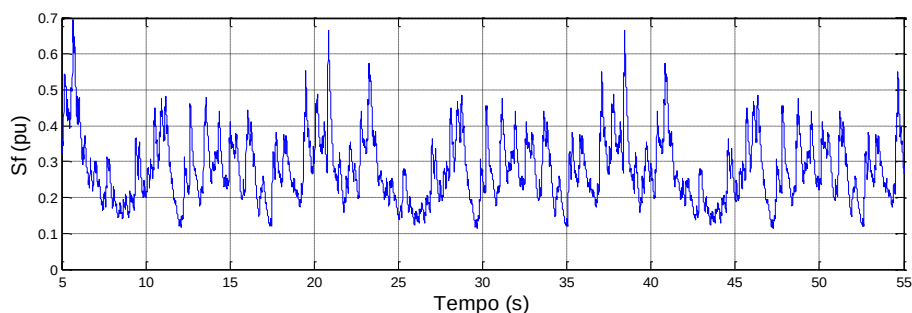


Figura 4.24 – Sensação instantânea de *Flicker* em (pu) para uma soldagem no modo de transferência goticular

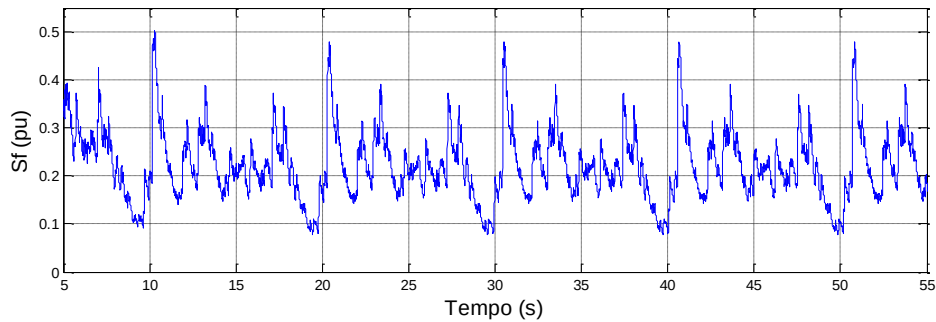


Figura 4.25 – Sensação instantânea de *Flicker* em (pu) para uma soldagem MIG pulsado com frequência de pulso de 34,5 Hz

Observando as Fig. 4.22 a 4.25, percebe-se que apenas os modos de transferência por curto-circuito e globular superam o limiar da percepção da sensação de flutuação de tensão. Este fato é decorrente da maior faixa de variação de corrente de soldagem proporcionando maiores flutuações de tensão. Porém, nas Tab. 4.4 e 4.5., em nenhum dos modos de transferência individuais os valores de P_{st} superam 1 pu. Este fato também deve ser relacionado com as amplitudes e as frequências inter-harmônicas presentes nos sinais da flutuação de tensão. As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os valores de P_{st} para os diversos modos de transferência. Os valores de P_{st} são obtidos considerando que a máquina de soldagem permanece em trabalho ininterrupto por um período de 10 minutos, tempo necessário para o cálculo de um valor representativo.

Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados nos ensaios experimentais dos processos de soldagem MIG/MAG, nos modos de transferência por curto-circuito, globular e goticular, com os seus respectivos índices P_{st}

Transferência	Tensão (V)	DBCP (mm)	Gás de proteção	V_{alim} (m/min)	P_{st} (pu)
Curto-circuito	23	12	CO ₂	6,5	0,725
Globular	28	16	CO ₂	6	0,671
Goticular	30	16	Ar + 25% CO ₂	10	0,460

Tabela 4.5 – Parâmetros utilizados nos ensaios experimentais do processo de soldagem MIG pulsado com os seus respectivos índices P_{st}

Testes	Regulados					Medidos/calculados		
	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	V_{alim} (m/min)	I_m (A)	f_p (Hz)	P_{st} (pu)
1	300	50	4	25	2,7	84,5	34,5	0,404
2	300	50	4	18	3	95,5	45,5	0,390
3	300	50	4	15,3	3	101,8	51,8	0,244
4	300	50	4	14	3,3	105,6	55,6	0,350
5	300	50	4	12,7	3,5	109,9	59,9	0,381
6	300	50	4	10,6	4	118,5	68,8	0,388
7	300	50	4	7,6	4,3	136,2	86,2	0,368

4.6 Considerações Finais

O presente capítulo apresentou os oscilogramas de tensão e corrente no arco de soldagem e no primário do transformador da máquina de soldagem para os ensaios experimentais. Com estes sinais, pode-se realizar a validação do modelo apresentado para uma máquina de soldagem.

Para cada sinal da tensão de alimentação adquirido na entrada da máquina de soldagem, pode-se observar o efeito ou a tendência que cada modo de transferência pode causar na rede elétrica através da S_f e do valor de P_{st} . Comparando a S_f para todos os modos de transferência, percebe-se que os piores casos são proporcionados pelos modos de transferência por curto-circuito e globular, porém, mesmo assim, em nenhum dos casos os valores foram inferiores a 1 pu .

CAPÍTULO V

ANÁLISE DE DESEMPENHO COMPUTACIONAL DO MODELO DA SOLDAGEM MIG/MAG

5.1 Considerações iniciais

A fim de avaliar a consistência do modelo proposto para uma máquina de soldagem utilizando o processo MIG/MAG diante os diversos modos de transferência, a filosofia aqui estabelecida se apoia na comparação qualitativa dos espectros de frequência dos sinais de corrente e tensão na entrada do transformador da máquina de soldagem, obtidos tanto de forma experimental quanto por simulação.

Diante disto, considerou-se a necessidade da realização de simulações voltadas para a obtenção de sinais de corrente e tensão próprios a cada modo de transferência metálica. Dentro deste contexto, foi necessário conhecer os parâmetros operacionais para a realização de cada simulação. Os parâmetros operacionais para a simulação do arco de soldagem foram extraídos de consultas à literatura. No entanto, tais informações podem ser alvo de questionamentos, visto que existem poucos registros. Neste sentido, buscou-se por literatura específica que identifique os parâmetros utilizados pelas máquinas de soldagem empregadas nos ensaios experimentais (SANTANA, 2010, MODENESI et al. 2011, SANTANA; MODENESI, 2011, MODENESI et al. 2012).

Quanto aos parâmetros do sistema elétrico, os mesmos foram obtidos por consultas à literatura específica e por contatos com especialistas da área. Pode-se constatar que devido à dificuldade em determinar os valores reais dos parâmetros do sistema elétrico, os resultados de simulação necessários a avaliar o modelo da máquina de soldagem deve ser analisada apenas do ponto de vista qualitativo.

5.2 Simulações da máquina de soldagem operando sob diferentes modos de transferência

Os parâmetros de operação utilizados nas simulações, tanto para o arco de soldagem quanto para o sistema elétrico, são os mesmos apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Em todas as simulações deste capítulo, os parâmetros utilizados no sistema elétrico não são alterados, sendo assim tomados como valores de referência. Neste caso, para a fonte de alimentação, adotou-se um valor de 30 MVA para o nível de curto-circuito e uma relação X/R igual a 10. Outro valor de referência adotado é para o comprimento do cabo de alimentação (distância do quadro de distribuição até o ponto de conexão com a máquina de soldagem), sendo este de 100 metros. Vale salientar que estes valores de referência são adotados neste momento, visto que nos capítulos seguintes, os mesmos são modificados a fim de avaliar o comportamento sobre cada variação paramétrica.

Como em qualquer circunstância real, existem situações externas que podem afetar o processo de soldagem. Neste sentido, o programa de simulação computacional desenvolvido, permite a inserção de grandezas adicionais às variáveis do processo a fim de promover situações mais realísticas, sendo estas denominadas de perturbações. Vale salientar que cada variável deve se estabelecer entre os limites máximos e mínimos condizentes com a realidade.

Para cada modo de transferência simulado a seguir, são obtidos os oscilogramas e os espectros de frequências da tensão e corrente na entrada primária da máquina de soldagem, as curvas característica (*V versus I*) e a sensação instantânea de *flicker*. Assim sendo, pode-se observar o comportamento da simulação para cada modo de transferência e, desta forma, validar o modelo proposto.

5.2.1 Modo de transferência por curto-circuito

Neste modo de transferência, existe a possibilidade de se modificar os valores das indutâncias no período de arco aberto e no período do curto-circuito. Conforme dados da literatura (CHOI, 2001, TERASAKI; SIMPSON, 2005, 2006, NGO et. al., 2007, SIMPSON, 2009), optou-se por estabelecer limites entre 200 μH e 600 μH para os valores das indutâncias totais. A frequência de curto-circuito é afetada pelos tempos de arco aberto e de curto-circuito, ou seja, pela variação nos valores das indutâncias. No Apêndice - D, apresenta-se uma análise utilizando três valores de indutância (adimensional) com o objetivo de constatar o comportamento da frequência de curto-circuito em função da variação entre três valores de indutância. Observa-se que a variação da indutância tem maior influência sobre o período de arco aberto do que sobre o período de curto-circuito.

A seguir são apresentadas as respostas de simulação para o modo de transferência por curto-circuito sem perturbação e com perturbação. Vale salientar que a simulação sem perturbação não encontra comparativo conforme apresentado no capítulo anterior, sendo possível apenas no caso com perturbação.

a) Sem perturbação

A Figura 5.1(a) mostra os oscilogramas de tensão e corrente no arco e na entrada da máquina de soldagem. Percebe-se que os sinais de tensão no arco e corrente de soldagem permanecem inalterados neste período. Nota-se que não existe variação nos valores de máximos e mínimos nas correntes, neste caso, a frequência de curto-circuito torna-se constante (34 Hz). Por conseguinte, pode-se afirmar que a frequência de curto-circuito torna-se constante quando da inexistência de perturbações nas variáveis do processo de soldagem. Neste caso, constata-se que a corrente na entrada primária da máquina de soldagem possui uma envoltória, caracterizada pela presença de frequências inter-harmônicas. Para aumentar a frequência de curto circuito, uma das possibilidades é reduzir a indutância do circuito, consequentemente, o inverso para reduzir a frequência de curto-circuito.

Vale salientar que o modelo computacional apresentado não replica todas os efeitos conseguidos experimentalmente. Um destaque é comprovado pelas correntes de entrada da máquina, onde o sinal simulado mostra-se com características próximas a de um sinal senoidal enquanto que o sinal experimental apresenta a resposta característica da entrada em um retificador trifásico. Este fato deve-se ao retificador trifásico do bloco do *Simulink* não corresponder fielmente ao caso real.

A Figura 5.1(b) mostra as características (*V versus I*) dos sinais de entrada da máquina e na soldagem. Pode-se observar claramente os períodos de curto circuito (tensões baixas e correntes elevadas) e períodos de arco aberto (tensões mais elevadas e correntes mais baixas). A figura 5.1(c) mostra os espectros de frequência da corrente e tensão de entrada. Verifica-se a presença de várias frequências inter-harmônicas. Conforme Equação 2.23, para uma frequência de modulação de 34 Hz (frequência de curto-circuito simulada), surgem as frequências inter-harmônicas de 9, 26, 43, 78, 94, 111, 128, 145, 163, 193 Hz, entre outras (em todas as simulações, considerou-se uma janela amostral de 60 ciclos tendo o espectro de frequência com resolução de 1 Hz). Verifica-se que as amplitudes das inter-harmônicas no sinal da tensão de entrada não apresentam todas as mesmas frequências inter-harmônicas observadas na corrente. Este fato se dá devido às características da rede no ponto de alimentação da máquina de soldagem, ou seja, a flutuação de tensão ser dependente da impedância da rede observada no ponto em questão. A Figura 5.1(d) apresenta a resposta da saída do bloco 4 do *flickermeter*, ou seja, a sensação instantânea de *flicker* (Sf). Devido a ausência de perturbação, fica evidenciada que a amplitude da Sf torna-se relativamente baixa.

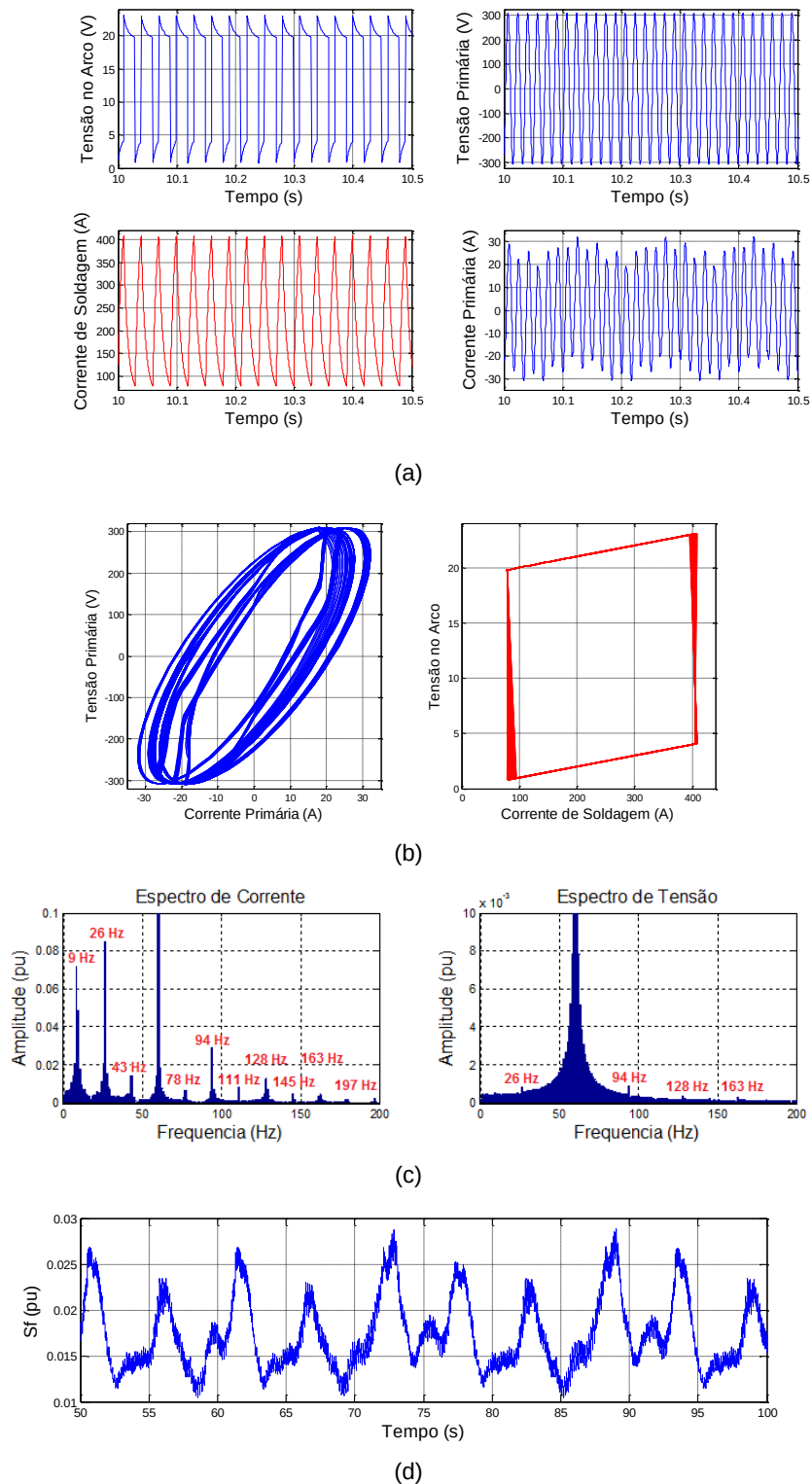


Figura 5.1 - Simulação do processo MIG/MAG operando no modo de transferência por curto-circuito, sem considerar perturbações na operação do processo de soldagem: a) Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e da entrada primária da máquina de soldagem; b) curvas característica (V versus I) da entrada primária da máquina de soldagem e na soldagem; c) espectros de frequência da corrente e tensão da entrada primária da máquina de soldagem; e d) sensação instantânea de flicker

Para o caso simulado, o valor de P_{st} encontrado é de 0,108 pu, conforme apresentado na Tab. 5.3, ao final deste capítulo.

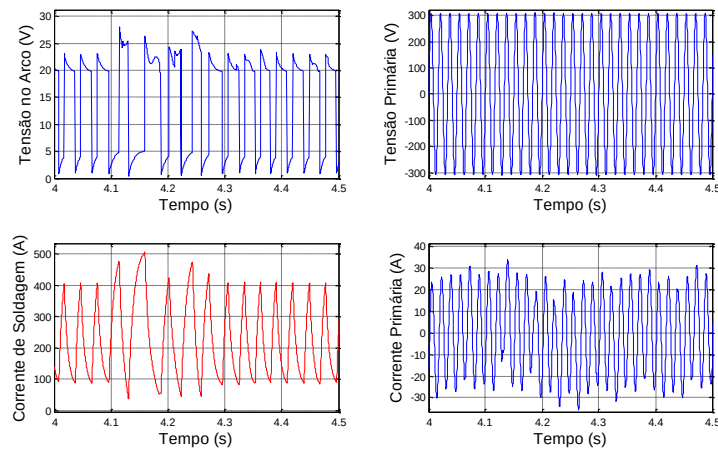
Sintetizando as observações tiradas deste item, verifica-se a presença de uma envoltória no sinal da corrente e tensão de entrada da máquina de soldagem os quais são confirmadas pelos espectros de frequências inter-harmônicas bem caracterizadas.

b) Com perturbação

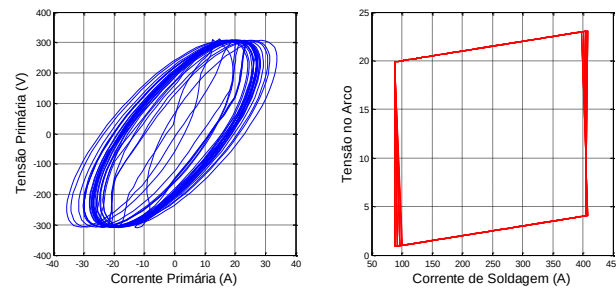
Nesta simulação são inseridas perturbações nas variáveis do processo de soldagem, conforme apresentado no item 4.3. A Figura 5.2(a) mostra os oscilogramas de tensão e corrente no arco e na entrada da máquina de soldagem após a introdução de perturbações. Verifica-se que os sinais de tensão no arco e corrente de soldagem sofrem alterações em relação à simulação sem perturbações. Assim sendo, diante das modificações nas grandezas impostas às variáveis perturbadoras, em cada nova situação a frequência de curto-circuito poderá sofrer alteração, assim como os valores máximos e mínimos das correntes de curto-circuito e das tensões no arco. Por conseguinte, pode-se afirmar que a frequência de curto-circuito não será constante. Como consequência, passa a inexistir a presença de uma envoltória bem caracterizada na corrente e tensão na entrada primária da máquina de soldagem.

Outra observação a ser destacada corresponde à forma de onda do sinal da corrente de entrada. Comparativamente aos sinais obtidos experimentalmente, conforme Fig. 4.4(item 4), existe neste caso a presença de conteúdos harmônicos devido o retificador trifásico, sendo que na simulação a mesma resposta não é obtida quando se utiliza o bloco retificador do *simulink*.

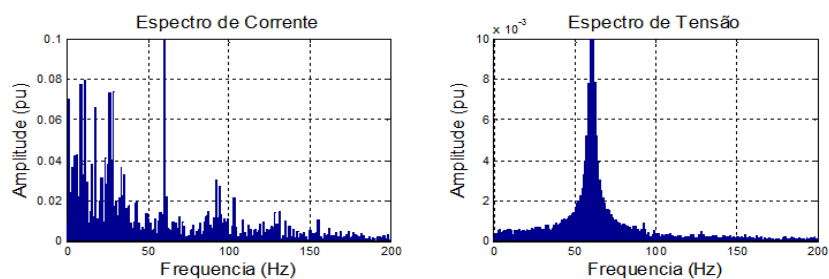
A Figura 5.2(b) mostra as características (*V versus I*) dos sinais de entrada da máquina e na soldagem, caracterizando melhor o efeito da perturbação imposta. Observa-se nos espectros de frequências (figura 5.2(c)) que as frequências inter-harmônicas não são bem caracterizadas como no caso sem perturbação. Para o sinal da corrente de entrada, nota-se a presença de um maior número de frequências inter-harmônicas, bem como o seu espalhamento. Por sua vez, para o sinal da tensão de entrada, o mesmo não incide com as mesmas frequências inter-harmônicas e amplitudes apresentada na corrente de entrada. Este fato acontece devido às características da impedância da rede no ponto de alimentação da máquina de soldagem.



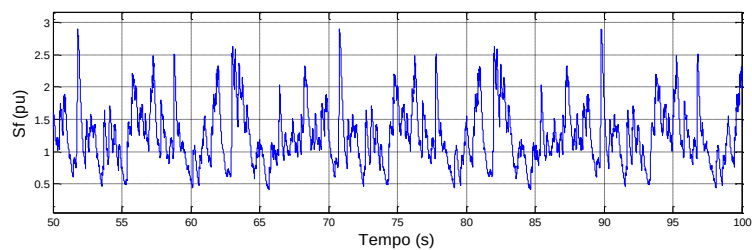
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.2 - Simulação do processo MIG/MAG operando no modo de transferência por curto-circuito, considerando as perturbações na operação do processo de soldagem: a) Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e da entrada primária da máquina de soldagem; b) curvas característica (V versus I) da entrada primária da máquina de soldagem e na soldagem; c) espectros de frequência da corrente e tensão da entrada primária da máquina de soldagem; e d) sensação instantânea de flicker

Para uma rede considerada "forte", ou seja, aquela que possui uma menor impedância da rede, a flutuação de tensão torna-se menor. Assim sendo, para uma rede considerada "fraca", a flutuação de tensão é conseqüentemente maior. Deste modo, torna-se possível avaliar através da simulação estes outros aspectos, ou seja, resultados considerando uma rede "forte" ou "fraca". Este fator pode ser alcançado modificando os níveis de curto-circuito da fonte de alimentação. A Figura 5.2(d) mostra o sinal da Sf com amplitude próximo de 3 pu. Neste caso o valor do P_{st} determinado é de 0,993 pu, conforme apresentado na Tab. 5.3.

5.2.2 Modo de transferência globular

A partir desse modo de transferência, só se apresenta os resultados com a inserção das perturbações nas variáveis do processo de soldagem, sendo estas: perturbação da DBCP e perturbação para as demais variáveis (resistência, comprimento do arco e velocidade de alimentação do arame).

Verifica-se que os sinais de tensão no arco e corrente de soldagem (Figura 5.3(a)) sofrem menores variações entre os pontos máximos e mínimos quando comparado aos oscilogramas no modo de transferência por curto-circuito. Os espectros de frequências (figura 5.3(c)) são espalhados e com amplitudes reduzidas, comparativamente ocorre ao caso com o modo de transferência por curto-circuito. Verifica-se que em alguns instantes o valor de Sf supera 1,5 pu e em outros estes valores são bem reduzidos (Figura 5.3(d)). As alterações abruptas na corrente de soldagem são decorrentes das características pertinentes aos destacamentos da gota. Em alguns instantes podem acontecer rápidos curtos-circuitos (conforme indica as setas na Fig. 5.3 (d)) proporcionados pelas variações nas perturbações nos comprimento do arco e/ou DBCP.

Considerando um intervalo mínimo de 10 minutos para a Sf, obtida através do sinal da tensão de entrada na máquina de soldagem, o valor do P_{st} determinado é de 0,528 pu, conforme apresentado na Tab. 5.3.

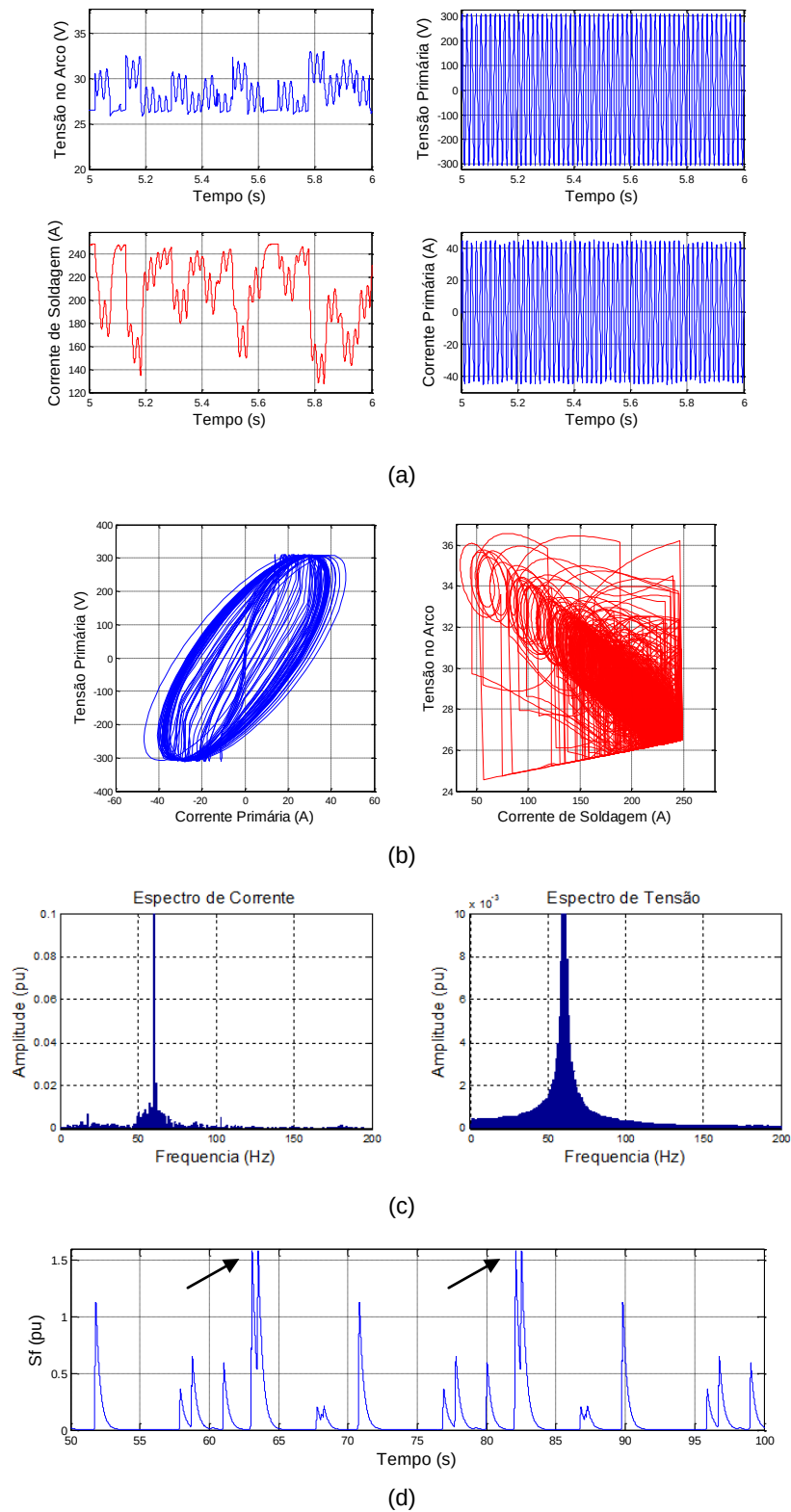


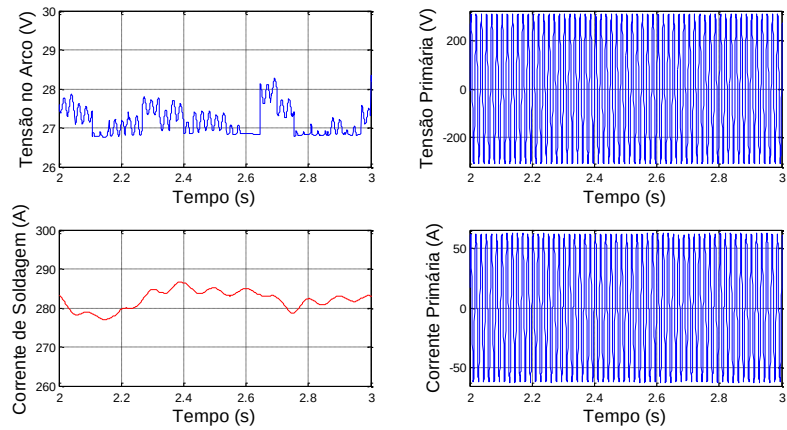
Figura 5.3 - Simulação do processo MIG/MAG operando no modo de transferência globular: a) oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e da entrada primária da máquina de soldagem; b) curvas característica (V versus I) da entrada primária da máquina de soldagem e na soldagem; c) espectros de frequência da corrente e tensão da entrada primária da máquina de soldagem; e d) sensação instantânea de *flicker*

5.2.3 Modo de transferência goticular

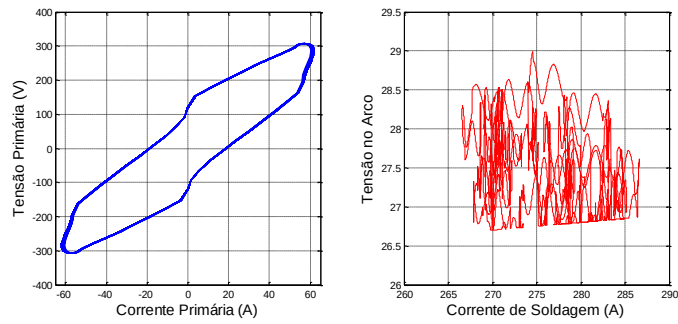
As perturbações inseridas nas variáveis do processo de soldagem a fim de caracterizar este modo de transferência goticular possuem amplitudes inferiores às utilizadas no modo de transferência globular.

Verifica-se (Figuras 5.4(a)) que os sinais de tensão no arco e corrente de soldagem sofrem pequenas variações, este fato é característico devido aos destacamentos das gotas deste modo de transferência. A característica (*V versus I*) dos sinais de entrada da máquina e na soldagem e os espectros de frequências inter-harmônicas (praticamente são inexistentes) são apresentados nas figuras 5.4 (b) e 5.4(c). Vale salientar que a resposta da característica (*V versus I*) serve como indicativo da presença de frequências inter-harmônicas no sinal da corrente e tensão. Neste caso, isto fica evidente para este modo de transferência metálica a pequena presença de frequências inter-harmônicas sendo confirmado pela pequena oscilação apresentada na Fig 5.4 (b). Observa-se (Figura 5.4(d)) em todos os instantes valores reduzidos de S_f , sendo que, no trecho apresentado, em nenhuma momento os mesmo superam 0,0025 pu. Considerando um intervalo mínimo de 10 minutos para a S_f , obtida através do sinal da tensão de entrada na máquina de soldagem, o valor do P_{st} determinado é de 0,026 pu, conforme apresentado na Tab. 5.3.

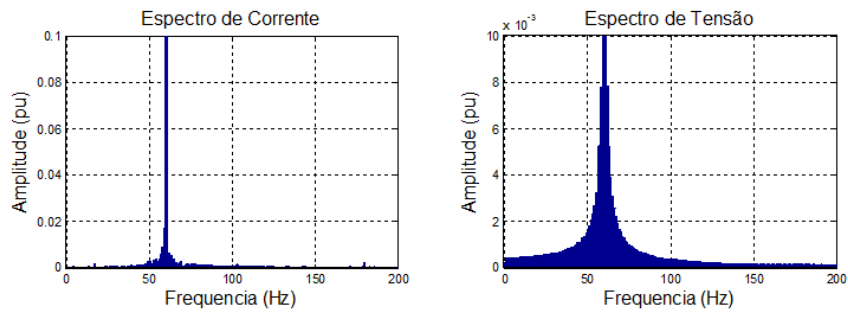
Para adequar os parâmetros de perturbação a fim de caracterizar o modo de transferência goticular, notou-se que realizando alguns ajustes, dependendo do valor pré-estabelecido, a característica da transferência metálica migrava-se para o modo de transferência globular. Assim sendo, não forma inseridas perturbações suficientemente à uma melhor caracterização deste modo de transferência. Este fato refletiu nos valores encontrados para a S_f e P_{st} , tornando-se inferiores aos obtidos experimentalmente.



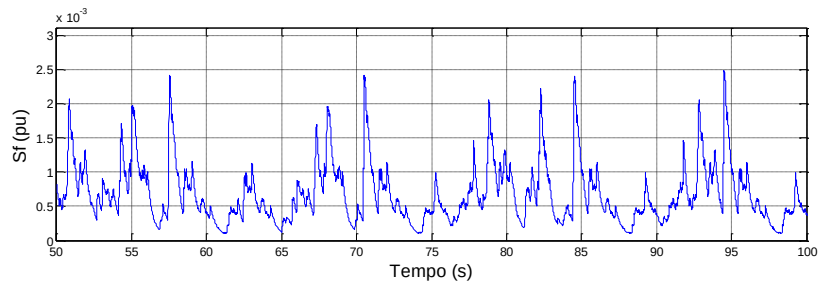
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.4 - Simulação do processo MIG/MAG operando no modo de transferência goticular: a) oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e da entrada primária da máquina de soldagem; b) curvas característica (V versus I) da entrada primária da máquina de soldagem e na soldagem; c) espectros de frequência da corrente e tensão da entrada primária da máquina de soldagem; e d) sensação instantânea de *flicker*

5.2.4 MIG pulsado

Para este modo de transferência, apenas os oscilogramas da frequência de pulso 34,5 Hz são apresentados, sendo que os oscilogramas das outras frequências de pulso estão contidos no Apêndice-C.

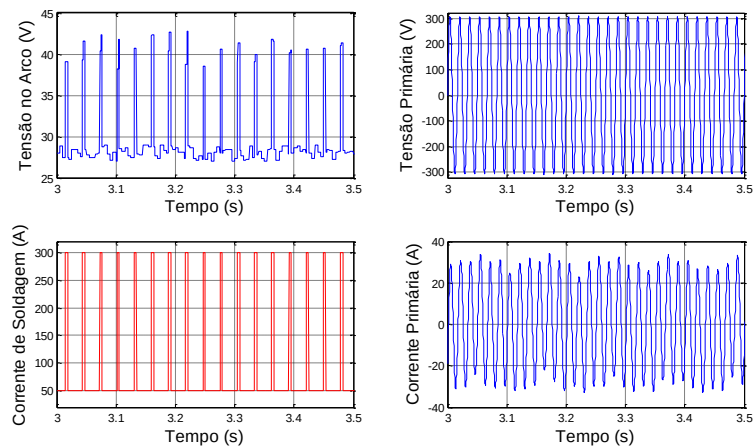
A frequência de pulso é estabelecida a partir dos tempos de base e de pulso, sendo estes parâmetros de entrada do processo MIG pulsados, neste caso os valores são apresentados na Tab. 4.5. Para a frequência de pulso adotada, observa-se a presença de uma envoltória na corrente de entrada da máquina de soldagem, conforme mostra a Fig. 5.5(a). Esta frequência modulante é característica da presença de frequências inter-harmônicas presentes no sinal da corrente de soldagem que possui uma determinada frequência de pulso.

Conforme MACEDO Jr. (2010), existe uma forte correlação entre as componentes de tensão com frequências inter-harmônicas e o fenômeno da flutuação de tensão, notadamente no que se refere à questão da cintilação luminosa (*flicker*).

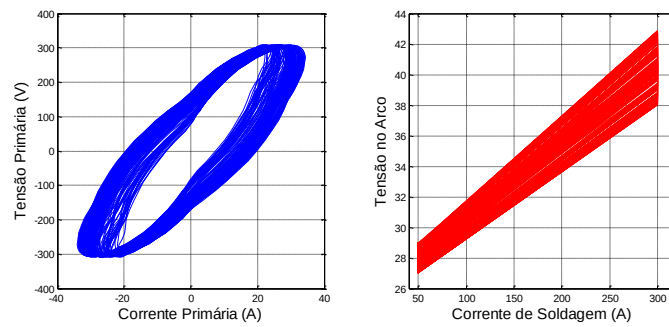
Os resultados de simulação para a frequência de pulso de 34,5 Hz apresentados na Fig.5.5 mostram os sinais de tensão no arco e corrente de soldagem são periódicos e que os espectros de frequência possuem as mesmas características apresentadas no modo de transferência por curto-circuito sem perturbações. Para a frequência de pulso de 34,5 Hz, observa-se o surgimento das frequências inter-harmônicas de 9, 26, 43, 78, 94, 129, 163 Hz no espectro de corrente de entrada da máquina de soldagem, conforme mostra a Fig. 5.5(c). Como pode ser observado, existe a presença de determinadas frequências inter-harmônicas no sinal da corrente de entrada que não têm o mesmo comportamento sobre as frequências inter-harmônicas na tensão de entrada. Porém, este mesmo fato tem sido observado nas simulações dos modos de transferência analisados anteriormente. Comparativamente aos ensaios experimentais, para o MIG pulsado, verifica-se uma presença mais contundente nos espectros de tensão correlacionados com os espectros de corrente. Este fato tem relação com as particularidades da impedância dos elementos da rede que de certa forma não foram contempladas plenamente na simulação.

Observa-se (Figura 5.5(d)) valores reduzidos da S_f em todos instantes apresentado, visto que, neste intervalo, em nenhum momento o valor supera 0,03 pu. Considerando um intervalo mínimo de 10 minutos para a S_f , obtida através do sinal da tensão de entrada na máquina de soldagem, o valor do P_{st} determinado é de 0,114 pu, conforme apresentado na Tab. 5.4.

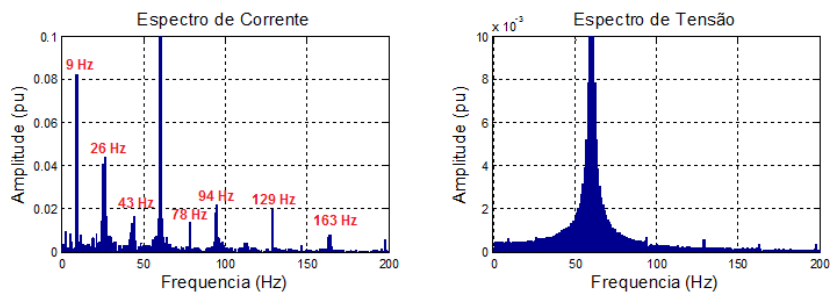
O Apêndice E apresenta uma breve simulação para o MIG pulsado "modificado", o qual considera dois períodos de pulso, sendo o primeiro para a formação ou crescimento da gota e o segundo para o destacamento da gota.



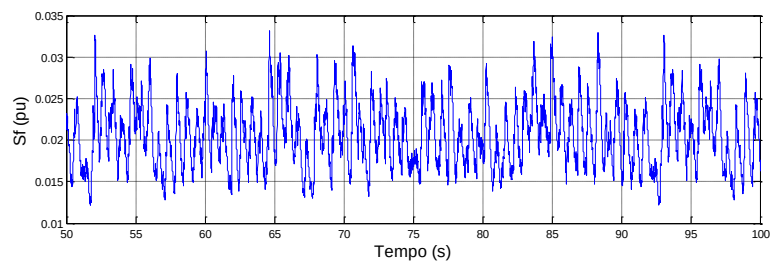
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.5 - Simulação do processo MIG Pulsado com frequência de pulso de 34,5 Hz: a) oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e da entrada primária da máquina de soldagem; b) curvas característica (V versus I) da entrada primária da máquina de soldagem e na soldagem; c) espectros de frequência da corrente e tensão da entrada primária da máquina de soldagem; e d) sensação instantânea de *flicker*

5.5 Análise dos Resultados

A partir das comparações entre as Fig. 4.5(a e b) e 5.2(a) para o modo de transferência por curto-circuito (obtidos nos ensaios experimentais e simulados), nota-se em todas as figuras que as correntes apresentam valores mínimos e máximos, enquanto as tensões também possuem valores máximos e mínimos, para os instantes de início do curto-circuito e abertura do arco, respectivamente.

Com relação ao modo de transferência globular, comparando as Fig. 4.8(a e b) e 5.3(a) notam-se um comportamento igualitário entre os resultados experimentais e simulados, ou seja, verifica-se pequenas variações entre os sinais da tensão no arco e entre maiores variações nos sinais das correntes de soldagem. Para o modo de transferência goticular, comparando as Fig. 4.11(a e b) e 5.4(a) entre os ensaios experimentais e simulados, constata-se pequenas variações tanto nos sinais das tensões no arco quanto nas correntes de soldagem.

Com relação aos valores do P_{st} , o maior valor tem sido encontrado para o modo de transferência por curto-circuito, sendo o menos significativo para o modo de transferência goticular, conseqüentemente no modo de transferência globular os valores são intermediários. Para o MIG pulsado, nota-se que não existe uma coerência entre os valores máximos e mínimos encontrados para o P_{st} (em todas as frequências de pulso analisadas). No ensaio experimental, os valores máximo e mínimo determinados foram encontradas nas frequências de pulso de 55,6 e 59,9 Hz, enquanto que na simulação, os valores foram para as frequências de pulso de 34,5 e 51,8 Hz. Constata-se que no MIG pulsado, quando se compara os espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de tensão e corrente na entrada da máquina de soldagem, a correspondência permanece apenas na forma qualitativa.

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os resultados experimentais e simulados para o P_{st} obtidos para os diversos modos de transferência metálica. Estas tabelas não tem a pretensão de serem elementos comparativos na forma qualitativa, visto que claramente existe uma discrepância entre os valores do P_{st} . Este fato pode ser esclarecido na medida em que os parâmetros definidos para o sistema elétrico em cada simulação forem exatamente os mesmos quando do ensaio experimental. Outro fator a ser considerado diz respeito às perturbações aleatórias definidas a cada simulação, ou seja, torna-se difícil inserir alterações em cada variável a fim de que as mesmas correspondam fielmente aos fenômenos deparados experimentalmente.

Tabela 5.3 – Valores do P_{st} obtidos experimentalmente e por simulação para o processo de soldagem MIG/MAG nos modos de transferência por curto-circuito, globular e goticular

Modo de Transferência	Tensão (V)	DBCP (mm)	V_{alim} (m/min)	Simulado	Experimental
				P_{st} (pu)	P_{st} (pu)
Curto-circuito sem perturbação	24	12	4,5	0,108	-----
Curto-circuito com perturbação	24	12	4,5	0,993	0,725
Globular	30	16	5,5	0,528	0,671
Goticular	40	16	10	0,026	0,460

Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados nos ensaios experimentais e nas simulações do processo de soldagem MIG Pulsado, juntamente com os respectivos valores do P_{st}

Ensaio	Parâmetros de Regulação					Calculado		Simulado	Experimental
	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	V_{alim} (m/min)	I_m (A)	f_p (Hz)	P_{st} (pu)	P_{st} (pu)
1	300	50	4	25	2,7	84,5	34,5	0,114	0,404
2	300	50	4	18	3	95,5	45,5	0,102	0,390
3	300	50	4	15,3	3	101,8	51,8	0,129	0,244
4	300	50	4	14	3,3	105,6	55,6	0,179	0,350
5	300	50	4	12,7	3,5	109,9	59,9	0,084	0,381
6	300	50	4	10,6	4	118,5	68,8	0,120	0,388
7	300	50	4	7,6	4,3	136,2	86,2	0,086	0,368

5.6 Considerações Finais

Dentro do exposto ao longo do presente capítulo, procurou-se evidenciar a possibilidade da validação do modelo da máquina de soldagem. Foram observados não somente os sinais entre as correntes e tensões na entrada da máquina, mas também entre os sinais nas tensões no arco e nas correntes de soldagem.

Através da flutuação de tensão no PAC tornou-se possível determinar os distúrbios produzidos na rede elétrica, ou seja, a sensação instantânea de *flicker* (S_f), o índice de severidade de cintilação (P_{st}) e os espectros de frequência harmônica e inter-harmônica para cada modo de transferência metálica.

Através dos resultados encontrados para a S_f e para o P_{st} em cada modo de transferência, pode-se afirmar que o modo de transferência por curto-circuito é o que mais provoca distúrbios à rede elétrica. O modo de transferência goticular, apesar de ter o maior valor de corrente de entrada solicitada, possui as menores flutuações de tensão e os

menores valores de S_f e P_{st} para os modos de transferência naturais. No MIG pulsado, todos os resultados encontrados para a S_f e para o P_{st} apresentaram valores abaixo do modo de transferência goticular. Dessa forma, pode-se afirmar que o MIG pulsado é o que menos distúrbios causam à rede elétrica. Este fato pode ter relação com a potência do arco, visto que neste caso a potência no arco pode ser metade daquela encontrada nos demais modos de transferência metálica.

A validação do modelo de uma máquina de soldagem para os diversos modos de transferência metálica foi obtida através das comparações entre as características dos espectros de frequência da corrente e tensão de entrada na máquina de soldagem experimental e simulados. Por apresentar um espectro de frequência inter-harmônico com intervalo de apenas 1 segundo (resolução de 1 Hz), tornou-se difícil obter uma melhor conclusão sobre o comportamento da característica específica apresentada por cada modo de transferência metálica. Para auxiliar no entendimento dos fatos citados acima, o apêndice-B apresenta uma sequência de espectros de frequência, correspondendo a um intervalo de tempo sequencial. Assim, através dos espectros de frequência da corrente e tensão de entrada foi possível constatar a fidelidade entre os comportamentos dos ensaios experimentais e simulados para cada modo de transferência. Consequentemente, foi possível afirmar que o modelo para uma máquina de soldagem encontra boa resposta para os modos de transferência naturais, tendo apenas uma restrição quanto a coerência nos valores dos índices de qualidade de energia elétrica (P_{st}) para o modo de transferência controlada. Analisando qualitativamente o comportamento para uma máquina de soldagem, pode-se considerar que o modelo apresentado teve resultados satisfatórios, podendo ser confirmado a sua validade.

Portanto, observadas as restrições, conclui-se que a modelagem proposta apresenta bons resultados, podendo ser utilizada para a obtenção dos índices de QEE tanto para uma máquina de soldagem quanto para várias máquinas trabalhando de forma isolada ou em conjunto.

CAPÍTULO VI

SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL PARA SOLDAGEM COM PROCESSO MIG/MAG

6.1 Considerações iniciais

O estudo apresentado na sequência, visa estimar os distúrbios provocados pelas operações das máquinas de soldagem a arco na rede elétrica de uma unidade industrial. Através das informações adquiridas pelas simulações de uma unidade industrial, pretende-se obter subsídios para o preenchimento de uma lacuna pouco explorada na área de qualidade da energia elétrica. Almeja-se que este estudo seja útil como fonte de informação com relação aos prováveis distúrbios provocados à rede elétrica para as indústrias já instaladas e para as que pretendem se instalar. Para novas instalações, na fase de projeto do alimentador, pode ser averiguado o nível de curto-circuito no ponto de entrega da energia ao consumidor, visto que as análises preliminares podem ajudar no dimensionamento dos alimentadores, a fim de limitar a máxima variação da tensão local, prevenindo e/ou eliminando os distúrbios sobre a QEE. Vale salientar que outros benefícios que podem ser alcançados com este estudo, como por exemplo para as agências reguladoras e/ou concessionárias de energia elétrica, podendo rever ou mesmo criar normatizações específicas para indústrias usuárias de máquinas de soldagem.

Para os fabricantes de máquinas de soldagem, estes estudos podem servir de alerta sobre um tema muito pouco explorado na fase de projeto de novas máquinas de soldagem. Atualmente, tem-se evidenciado grandes esforços apenas direcionados à qualidade do processo de soldagem. Deste modo, novos desafios são lançados no sentido de que em futuros projetos de máquinas de soldagem, estas possam considerar a possibilidade de minimizar os distúrbios causados à rede elétrica e/ou até mesmo obtendo um possível selo de qualidade da energia elétrica.

A seguir são realizadas as simulações para duas e três máquinas de soldagem com diversos modos de transferência e posteriormente cinco estudos de casos propostos para uma unidade industrial.

6.2 Simulação da combinação de duas e três máquinas de soldagem

A seguir são apresentadas simulações para duas e três máquinas de soldagem como estratégia para ampliação do conhecimento do comportamento obtido com apenas uma máquina de soldagem. A operação de cada uma das máquinas é realizada de forma aleatória, com o intuito de representar a realidade do acionamento e assim obter os índices de QEE (S_f e P_{st}) no ponto de acoplamento comum (PAC). Experimentalmente seria muito complicado realizar esta análise, mas por simulação, torna-se mais factível.

O programa de simulação implementado permite ao usuário inserir a quantidade de máquinas de soldagem desejadas e previamente definir o modo de transferência desejado, conforme apresentado no capítulo anterior. O usuário tem ainda a possibilidade de estabelecer quaisquer parâmetros de um determinado sistema elétrico, permitindo avaliar não somente os distúrbios provocados pelo acionamento destas máquinas de soldagem em operação, mas também sobre diferentes características de elementos conectados à rede do sistema elétrico.

Dentre as várias possibilidades consentidas ao usuário de alterar os parâmetros de simulação, neste caso são consideradas apenas alterações para os níveis de curto-circuito da fonte de alimentação (são consideradas duas situações, 30 MVA e 90 MVA), alteração na relação X/R da fonte de alimentação (são consideradas duas situações, 3 e 10) e a alteração nos comprimentos nos cabos da unidade industrial, ou seja, a modificação entre as distâncias do quadro de distribuição até a entrada da máquina de soldagem (são consideradas duas situações, 100 m e 500 m).

A fim de reduzir a grande quantidade de informações disponibilizadas pelas simulações, são apresentados apenas os oscilogramas de tensão e corrente eficazes no ponto comum de alimentação das máquinas de soldagem, a sensação instantânea de *flicker* (S_f) e o valor do índice de severidade (P_{st}), bem como os seus valores em tabelas.

A Figura 6.1 mostra a estrutura de programação utilizada para simulação de duas máquinas de soldagem na plataforma *Simulink*. Esta estrutura é composta de uma fonte de alimentação, uma impedância caracterizando os cabos da rede de distribuição, um transformador da subestação da unidade industrial e uma impedância caracterizando os cabos de energia que alimentam as máquinas de soldagem. As chaves 1 e 2 na Fig. 6.1 são previamente parametrizadas (tempos as quais estão ligadas e desligas) a fim de estabelecer os momentos em que cada máquina estão ou não estão em funcionamento.

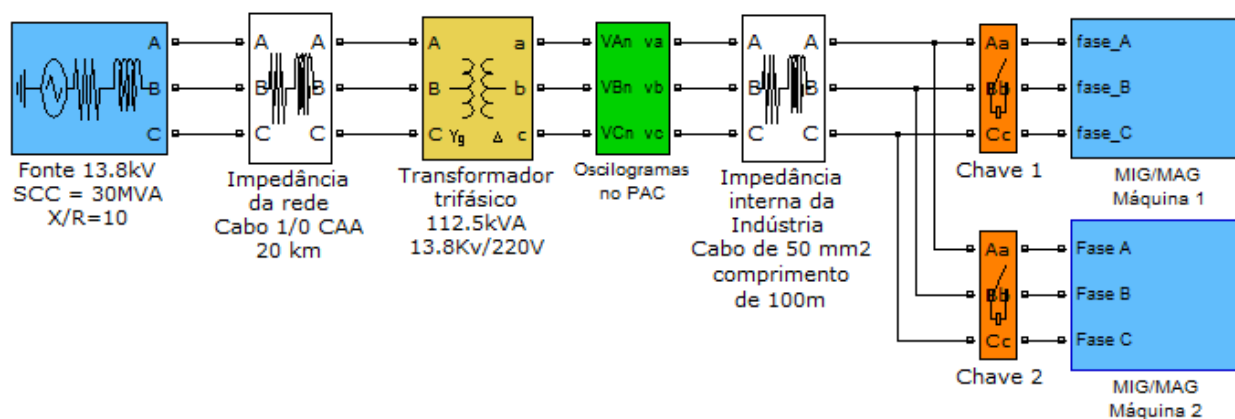


Figura 6.1 – Estrutura de programação do *Simulink* para a simulação de duas máquinas de soldagem desde a fonte fornecedora da energia elétrica

É importante ressaltar que, para a mesma corrente de entrada solicitada pelas máquinas de soldagem, dependendo do valor da impedância até o PAC, a flutuação de tensão na barra pode variar, ou seja, a queda de tensão esta diretamente relacionada com as características de cada sistema elétrico até o PAC. Assim sendo, planejou-se realizar algumas alterações em alguns parâmetros a fim de avaliar o comportamento em relação à QEE sobre estes aspectos.

A Tabela 6.1 apresenta os valores paramétricos inicialmente estabelecidos como sendo os de referência, bem como os demais valores aos quais serão modificados. Em cada simulação são alterados independentemente apenas uma das possíveis modificações, ou seja, ou os níveis de curto-circuito, ou a relação X/R e ou os comprimentos dos cabos de energia que alimentam as máquinas de soldagem.

Tabela 6.1 – Valores de referência e valores modificados para análise comparativa entre duas redes de alimentação para as máquinas de soldagem.

Parâmetros	Fonte de Alimentação		Cabos da rede instalação industrial
	Nível de Curto-circuito	Relação X/R	Comprimento do cabo
Referência	30 MVA	10	100 m
Modificado	90 MVA	30	500 m

A Figura 6.2 mostra o diagrama esquemático simplificado do sistema elétrico que alimenta as máquinas de soldagem. A corrente solicitada por cada uma das máquinas de soldagem provoca uma queda de tensão no barramento de 220 V. Desta forma, pode-se esperar uma flutuação de tensão imposta no barramento do PAC, podendo-se avaliar os impactos sobre os indicadores da QEE (S_f e P_{st}). Através da tensão eficaz (rms) obtida no PAC, obtém-se a sensação instantânea de *flicker* e posteriormente o índice de severidade

de cintilação de curta duração. Para obter a propagação da flutuação de tensão no barramento de alta tensão (AT - 13,8 kV), e posteriormente os valores de S_f e P_{st} neste ponto, deve-se conhecer as impedâncias ou os níveis de curto-circuito em cada trecho (barras de BT e de AT). A flutuação da tensão na barra de AT é obtida pelo produto entre o valor da flutuação de tensão na barra de BT pela relação entre os valores de curto-circuito entre as barras de BT e AT, respectivamente. Desta forma, tem-se uma atenuação natural da flutuação de tensão que esta no sentido da carga perturbadora (máquina de soldagem) para a rede de alimentação.

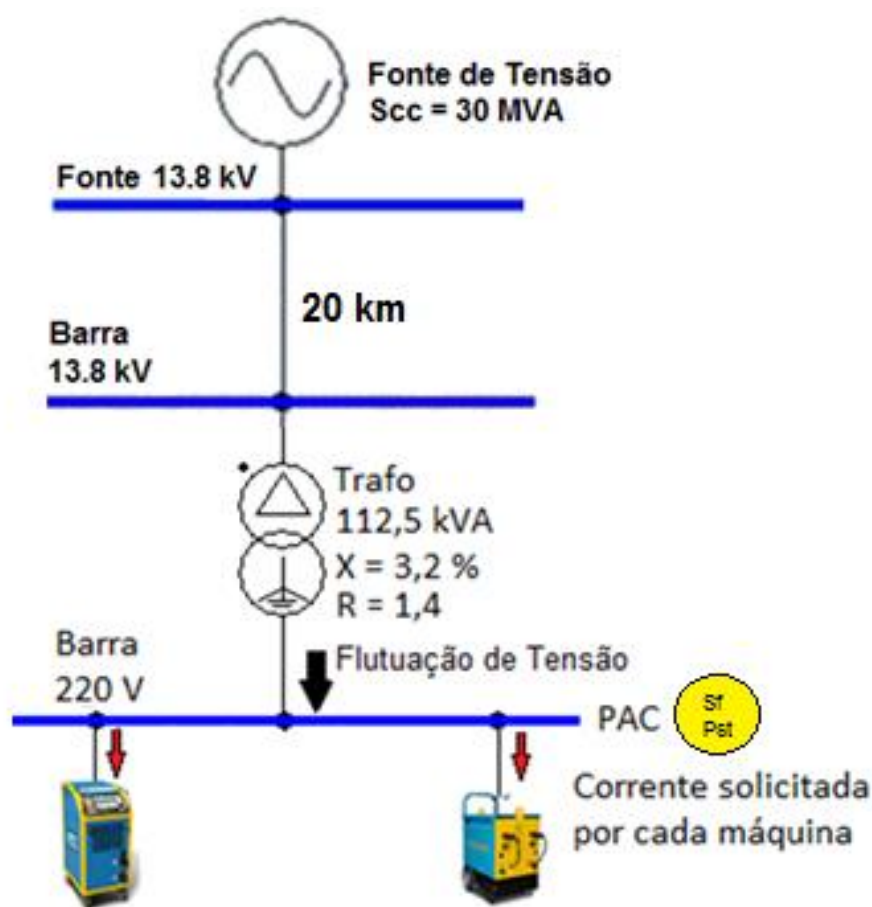


Figura 6.2 – Diagrama esquemático do sistema elétrico que alimenta as máquinas de soldagem

A seguir são apresentados os resultados das simulações para duas máquinas de soldagem, sendo os valores determinados para o P_{st} apresentados nas Tab. 6.2 a 6.5. Cada máquina tem previamente estabelecido o modo de transferência, podendo as duas máquinas ter o mesmo e/ou combinações destes.

A fim de observar o comportamento das duas máquinas, inicialmente foram realizadas simulações onde as máquinas de soldagem permaneceram em funcionamento

contínuo (sem interrupção por um período de 10 minutos). Posteriormente, as chaves 1 e 2 são configuradas de forma a manter as máquinas com funcionamento aleatório. Como cada chave é totalmente independentemente, existem as possibilidades de ambas estarem ligadas ou desligadas, ou apenas uma das máquinas estarem ligadas.

Vale ressaltar que na sequência deste texto, apenas os oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e sensação instantânea de *flicker* para um conjunto de modos de transferência por curto-circuito são apresentados.

A Figura 6.3 mostra os oscilogramas de simulação da tensão e corrente eficazes no ponto comum (PAC) de alimentação das duas máquinas de soldagem (modo de transferência por curto-circuito com perturbação), juntamente com a Sf. Verifica-se que a Sf, para o intervalo apresentado, possui valores considerados baixos, ou seja, não ultrapassam 0,4 pu. O valor do P_{st} determinado é de 0,347 pu.

Pode-se observar também que quando duas máquinas estão em funcionamento, a corrente solicitada torna-se evidentemente maior, porém, a nova queda de tensão e por sua vez a nova flutuação de tensão, neste caso, reduz a quase 1/3 o valor do P_{st} . Desta forma fica evidenciada que o valor da Sf e do P_{st} não estão relacionados apenas com relação à maior queda de tensão ou amplitude na flutuação de tensão.

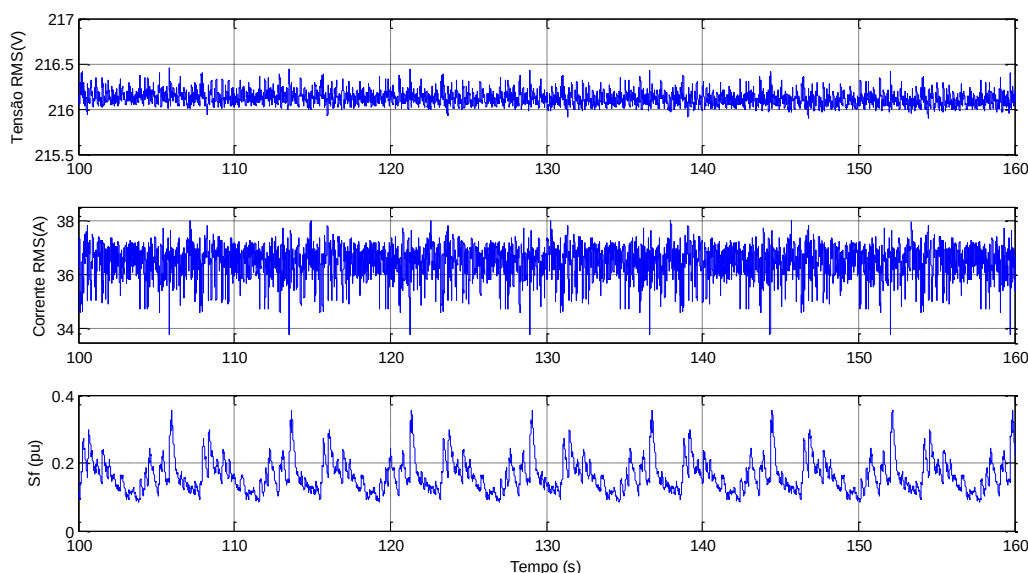


Figura 6.3 – Oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e da sensação instantânea de *flicker*, considerando duas máquinas de soldagem com os mesmos modos de transferência por curto-circuito e usando os parâmetros de referência $S_{cc}=30\text{MVA}$, $X/R=10$ e $l=100\text{m}$

A fim de conhecer o comportamento da Sf e do P_{st} sobre novas conjunturas, aplicou-se as modificações paramétricas previstas na Tab. 6.1. Desta forma, modificando apenas o

nível de curto-circuito da fonte para 90 MVA (mantendo todos os demais parâmetros os de referência), o valor do P_{st} se reduz para 0,338 pu. Realizando apenas a modificação na relação X/R para 30 (mantendo todos os demais parâmetros os de referência), o valor do P_{st} tem um pequeno acréscimo, sendo verificado o valor de 0,34861 pu.

Modificando apenas o comprimento do cabo que alimenta as máquinas para 500 m (mantendo todos os demais parâmetros os de referência), o valor do P_{st} reduz para 0,308 pu. Para uma complementação, o apêndice - F mostra duas máquinas com modo de transferência por curto-circuito sem perturbação, em funcionamento aleatório, com diferentes frequências de curto-circuito.

Até o momento foram realizadas simulações considerando apenas duas máquinas de soldagem. No próximo caso são realizadas simulações considerando três máquinas de soldagens com diferentes modos de transferência (transferência por curto-circuito, globular e pulsado com frequência de pulso de 68,8 Hz) e com acionamentos aleatórios e por um período de 10 minutos. A seguir são apresentados apenas os oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e da sensação instantânea de *flicker* para uma aleatoriedade.

Na primeira simulação, todas as máquinas de soldagens possuem funcionando ininterrupto por um período de 10 minutos.

A seguir são realizadas cinco simulações mantendo as três máquinas de soldagem. Neste caso, considerou-se que as máquinas de soldagem têm funcionamento aleatório, porém, para cada simulação adotou-se que os intervalos de acionamentos sejam cada vez menores até a última simulação. Estas simulações tem como propósito compreender o que ocorre com a flutuação de tensão no PAC quando as máquinas possuem intervalos de acionamentos cada vez mais curtos.

A Figura 6.4 mostra os oscilogramas de simulação da tensão, corrente eficazes no ponto comum de alimentação das da máquinas de soldagem, juntamente com a sensação instantânea de *flicker*, para as três máquinas de soldagem com aleatoriedade nos períodos de acionamento.

Analisando os resultados acima propostos, constata-se que na medida em que os intervalos de acionamentos são reduzidos, ou seja, quanto maior o número de acionamentos por intervalo de tempo, o valor do P_{st} também é acrescido.

A Tabela 6.6 apresenta os valores do P_{st} determinados pela combinações das três máquinas de soldagem, considerando inicialmente um processo contínuo de funcionamento e posteriormente cinco outros intervalos de tempo adotados de forma aleatória, sendo estes intervalos de acionamento reduzidos a cada caso simulado.

No Apêndice - G são apresentados exemplos considerando três máquinas de soldagem. O objetivo deste apêndice é mostrar de forma didática as maneiras de se realizar as parametrizações dos intervalos de tempo das chaves que acionam as máquinas. São mostradas também as correntes de entrada para cada uma das máquinas e de todo o conjunto, bem como os espectros de frequência inter-harmônicas para os intervalos acionados e pelas combinações das mesmas.

O Apêndice - H apresenta a simulação contemplando duas máquina de soldagem em conjunto com duas cargas puramente resistivas. Com a presença de carga puramente resistiva, este apêndice tem o objetivo de mostrar que apenas queda de tensão, sem a presença conjunta de flutuação da tensão, não é condição suficiente para alterar significativamente os valores de S_f e P_{st} .

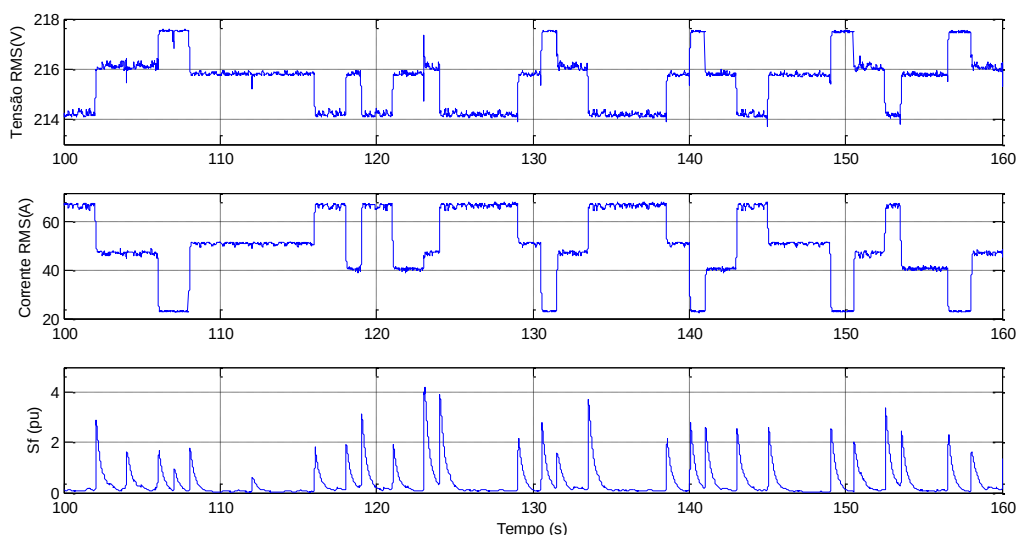


Figura 6.4 Oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e da sensação instantânea de *flicker*, considerando o acionamento aleatório 1 para as três máquinas de soldagem operando individualmente nos modos de transferência por curto-circuito, globular e MIG pulsado (frequência de pulso de 68,8 Hz), tendo os parâmetros $S_{cc} = 30$ MVA, $X/R = 10$ e $I = 100$ m

Tabela 6.2 – Valores do P_{st} determinados para uma e duas máquinas em processo contínuo com os mesmos modos de transferência metálica

Modo de Transferência	Simulação Ininterrupta	
	Pst (pu) - 1 Máquina	Pst (pu) - 2 Máquinas
Curto-circuito	0,993	0,347
Globular	0,528	0,370
Goticular	0,026	0,059
Pulsado - 34,5 Hz	0,114	0,204
Pulsado - 68,8 Hz	0,120	0,200

Tabela 6.3 – Valores do P_{st} determinados nas combinações dos modos de transferência por curto-circuito, globular, goticular e pulsado, considerando as modificações de S_{cc} , X/R e comprimento do cabo de alimentação para as máquina de soldagem

Combinações de Modos de transferência metálica	Valores do P_{st}			
	Referência	Modificado		
	$S_{cc}=30$ MVA $X/R=10$ $L=100$ m	<u>$S_{cc}=90$ MVA</u> $X/R=10$ $L=100$ m	$S_{cc}=30$ MVA <u>$X/R=30$</u> $L=100$ m	$S_{cc}=30$ MVA $X/R=10$ <u>$L=500$ m</u>
Curto-circuito e Curto-circuito	0,347	0,338	0,348	0,308
Globular e Globular	0,370	0,353	0,369	0,293
Goticular e Goticular	0,059	0,051	0,049	0,060
Pulsado com 34,5 Hz e Pulsado com 34,5 Hz	0,204	0,198	0,204	0,194
Pulsado com 68,8 Hz e Pulsado com 68,8 Hz	0,200	0,127	0,131	0,134

Tabela 6.4 – Valores do P_{st} determinados nas combinação de duas máquinas de soldagem com processo MIG pulsado com frequência de pulso de 68,8 Hz, considerando defasamento entre os pulsos das máquinas de 1/3, 1/2 e 2/3.

Pulsado com 68,8 Hz e Pulsado com 68,8 Hz	Valores do P_{st}			
	Defasamento do Período do pulso	1/3	1/2	2/3
$S_{cc}=30$ MVA $X/R=10$ $L=100$ m		0,134	0,200	0,223

Tabela 6.5 – Valores do P_{st} determinados nas combinações dos diversos modos de transferência, considerando uma operação contínua e outra aleatória, por um intervalo de 10 minutos

Combinações de Modos de transferência Acionamento das Máquinas	Valores do P_{st}			
	Curto-circuito e Goticular	Globular e Goticular	Pulsado com 34,5 Hz e Goticular	Pulsado com 34,5 Hz e 68,8 Hz
Operação contínua por 10 min.	0,219	0,228	0,139	0,155
Operação aleatória por 10 min.	0,567	0,662	0,573	0,715

Tabela 6.6 – Valores do P_{st} determinados nas combinações dos modos de transferência por curto-circuito, globular e pulsado com frequência de pulso de 68,8 Hz, considerando um processo contínuo e cinco outros realizados de forma aleatória

Combinações ($S_{cc}=30$ MVA $X/R=10$ $L=100$ m)	Valores do P_{st}					
	Processo Contínuo	Aleatório 1	Aleatório 2	Aleatório 3	Aleatório 4	Aleatório 5
Pulsado com 68,8 Hz, Curto-circuito e Globular	0,269	0,989	1,077	1,463	1,516	1,955

6.3 Simulação da Planta Industrial com Máquinas de Soldagem MIG/MAG

A seguir são realizadas investigações em uma unidade industrial hipotética com máquinas de soldagem MIG/MAG. Fez-se opção por simular uma indústria de pequeno porte, com 16 máquinas de soldagem com processo MIG/MAG. As máquinas de soldagem foram assim escolhidas: 4 máquinas com o modo de transferência por curto-circuito, 3 máquinas com o modo de transferência globular, 6 máquinas com o modo de transferência goticular e 3 máquinas com o MIG pulsado, com frequências de pulso de 34,5 Hz, 59,9 Hz e 66,8 Hz.

O programa de simulação completo é estabelecido com o acoplamento entre o sistema elétrico que alimenta a unidade industrial e o conjunto de máquinas de soldagem conectadas ao ponto de acoplamento comum (PAC). Visa-se estabelecer a análise de alguns indicadores (S_f , P_{st} e frequências harmônicas e inter-harmônicas) que permitem diagnosticar o grau de degradação da energia elétrica causada pelo acionamento das máquinas de soldagem.

Neste momento, um aspecto a ser destacado refere-se à representação do sistema elétrico, o qual, para fins desta tese, se apresenta com características ideais, ou seja, sua rede se apresenta com tensões puramente senoidais, equilibradas, amplitudes constantes e frequência de 60 Hz.

O sistema elétrico estabelecido na simulação é constituído por uma fonte de alimentação trifásica cuja tensão de linha é de 13,8 kV fornecida pela concessionária através da rede de distribuição. Esta fonte possui um nível de curto-circuito de 30 MVA e relação $X/R = 10$. O comprimento do cabo da rede de distribuição, ou seja, a distância entre a fonte fornecedora de energia e a planta industrial foi subjetivamente fixado em 20 km.

A Figura 6.5 mostra o esquema elétrico correspondente à planta ou unidade industrial a ser simulada. A partir da subestação principal da unidade industrial a energia elétrica é distribuída para as demais áreas. Observa-se a existência de dois quadros de distribuição, sendo que cada quadro alimenta oito máquinas de soldagem.

No primeiro quadro de distribuição, a seção dos alimentadores é de 50 mm², com comprimento de 100 m. Para o segundo quadro de distribuição, a seção dos alimentadores é de 75 mm², com comprimento de 150 m. A potência nominal do transformador abaixador da subestação da planta industrial é de 225 kVA (13,8/0,220 kV).

A Figura 6.6 mostra o programa de simulação da planta industrial em ambiente *Simulink*. São exibidas as distribuições das 16 máquinas de soldagem com os respectivos modos de transferência previamente estabelecidos.

Como as máquinas de soldagem trabalham com mudanças repentinas de correntes de trabalho, em ciclos muito rápidos, dependendo da atividade exercida pelo soldador, o período de funcionamento de um posto de trabalho pode coincidir ou não com outro posto de trabalho.

Em algumas ocasiões, nem mesmo o soldador consegue realizar a mesma atividade com o mesmo tempo de acionamento, pois fatores extras devem ser considerados, desta forma, dificilmente a mesma tarefa tem períodos coincidentes ou repetitivos. desta forma, cada máquina recebeu uma sequencia aleatória de acionamento (liga/desliga). Os períodos de acionamento de cada máquina são inseridos através da parametrização das chaves C1 a C16.

Para determinar o valor do P_{st} na rede de distribuição, ou seja, no lado de AT deve-se referir o mesmo para um ponto no primário do transformador da subestação. A partir da determinação dos valores referidos, a faixa de classificação dos indicadores estabelecidos são fornecidos pelo módulo 8 do PRODIST, a fim de analisar se existe violação dos limites recomendados.

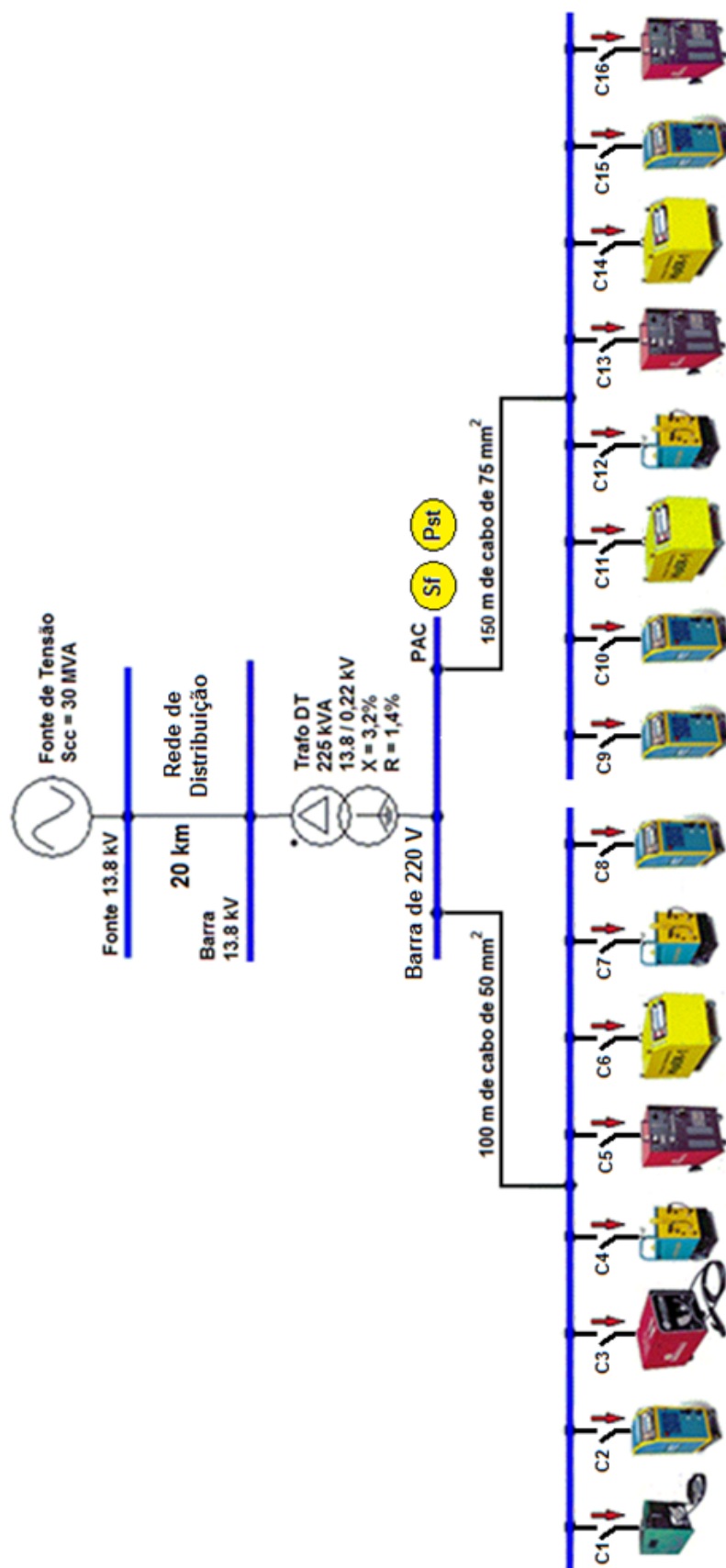
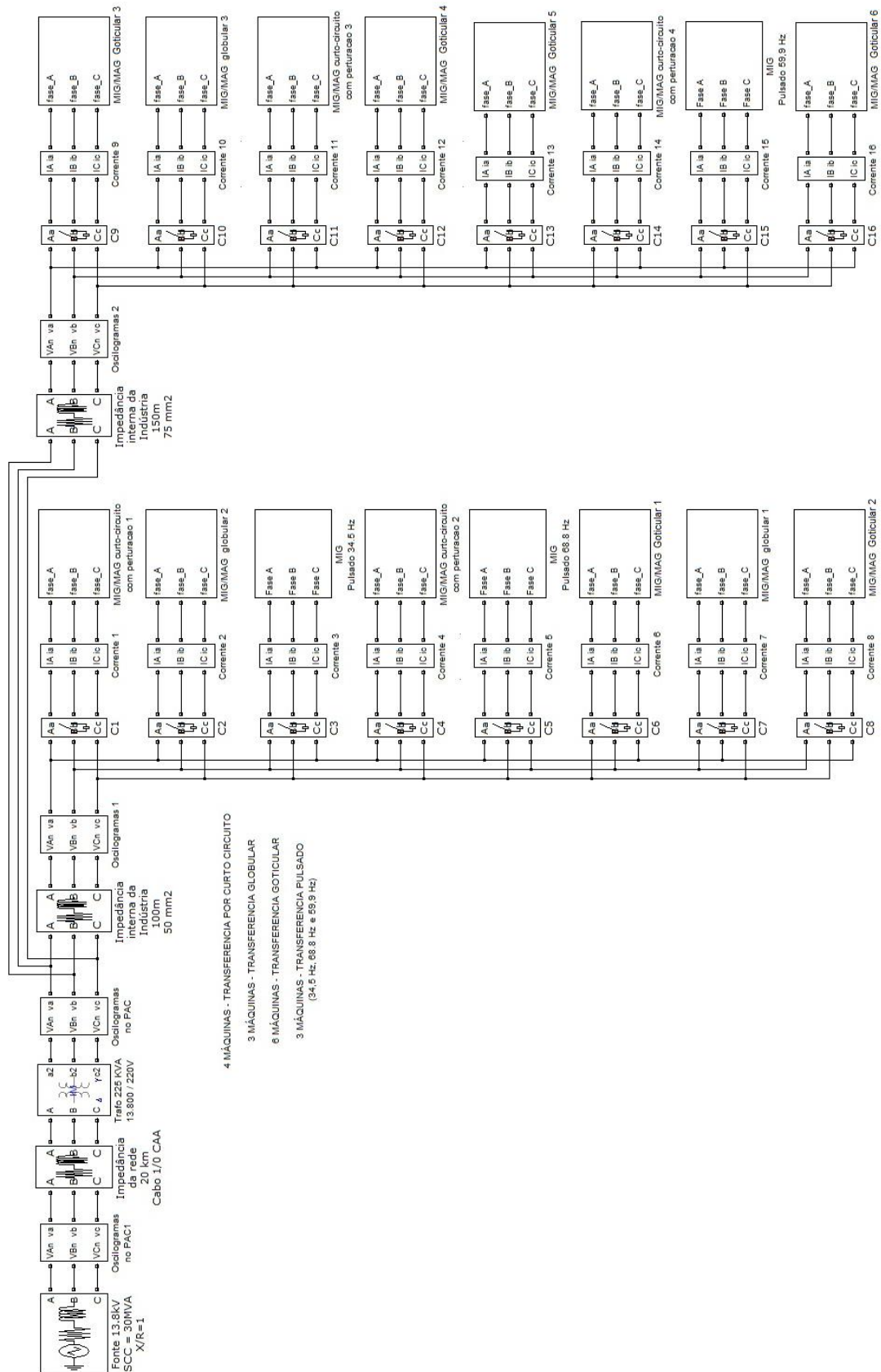


Figura 6.5 – Esquema do sistema elétrico que fornece energia para uma planta industrial hipotética com 16 máquinas de soldagem

Figura 6.6 – Estrutura de programação do *Simulink* para a simulação da planta industrial com 16 máquinas de soldagem



6.4 Estudos de Casos

A seguir são realizados cinco estudos de Casos com a finalidade de obter uma análise comparativa entre várias formas ou possibilidades de acionamentos em uma unidade industrial. Cada Caso contém o mesmo número de máquinas, porém, dependendo da parametrização do acionamento de cada máquina de soldagem, possivelmente nem sempre todas estarão em funcionamento.

O tempo de simulação constituído em cada caso foi de 10 minutos, devido a necessidade de se estabelecer um valor para o P_{st} . A adequação de cada caso simulado está relacionada com a parametrização dos intervalos de acionamento em cada uma das chaves que acionam as diversas máquinas de soldagem (C1 a C16). Com isto, pretende-se observar a relação entre a característica do acionamento das máquinas com os respectivos índices de QEE (S_f , P_{st} e frequência inter-harmônica).

A fim de se obter um elemento comparativo para a S_f e P_{st} , define-se inicialmente os intervalos de acionamento contemplando todas as máquinas de soldagem da unidade industrial. Particularmente para o Caso 1, adota-se um período de acionamento contínuo para todas as máquinas (as chaves 1 a 16 permanecem ligadas por todo o período de simulação).

Para os demais Casos, os períodos de acionamento não são contínuos, existindo, portanto uma relação cada Caso. Por exemplo, inicialmente no Caso 2, adota-se o seguinte procedimento para cada uma das máquinas da unidade industrial: define-se um período para a inicialização do acionamento e posteriormente os instantes que cada máquina permanece ligada e desligada. Para o caso 3 o mesmo procedimento é realizado, porém com uma ressalva, os tempos definidos neste Caso são exatamente a metade dos intervalos definidos para o Caso 2. Assim sendo, faz-se o mesmo procedimento analogamente para os Casos 4 e 5. Deste modo, obtêm-se para o Caso 5 intervalos de acionamento 1/8 dos estabelecidos para o Caso 2.

Realizando as simulações para cada um dos cinco Casos deliberados acima, as Fig. 6.7 a 6.11 apresentam-se os oscilogramas instantâneos das tensões e correntes na entrada da máquina e para as S_f no PAC para os Casos 1 a 5, respectivamente.

Nos Casos 2 a 5, todas as máquinas possuem a mesma sequencia de acionamento, porém, o que os diferenciam são exatamente os períodos que cada uma das máquinas estarão acionadas. Vale reafirmar que este fato acompanha todas as máquinas, assim sendo, para cada Caso a corrente total solicitada pelas máquinas no PAC tem aproximadamente os mesmos valores mínimos e máximos, sendo 70 A e 280 A, respectivamente. Com este valor máximo de corrente pode-se afirmar que em nenhum

momento todas as 16 máquinas estarão em pleno funcionamento. Nota-se também que pelo menos 3 máquinas estão em funcionamento ao mesmo tempo, pode-se concluir a partir do valor da corrente mínima (19 % da corrente plena). Quando a corrente atinge o valor máximo, aproximadamente 13 máquinas devem estar em pleno funcionamento, correspondendo a 77 % da carga plena.

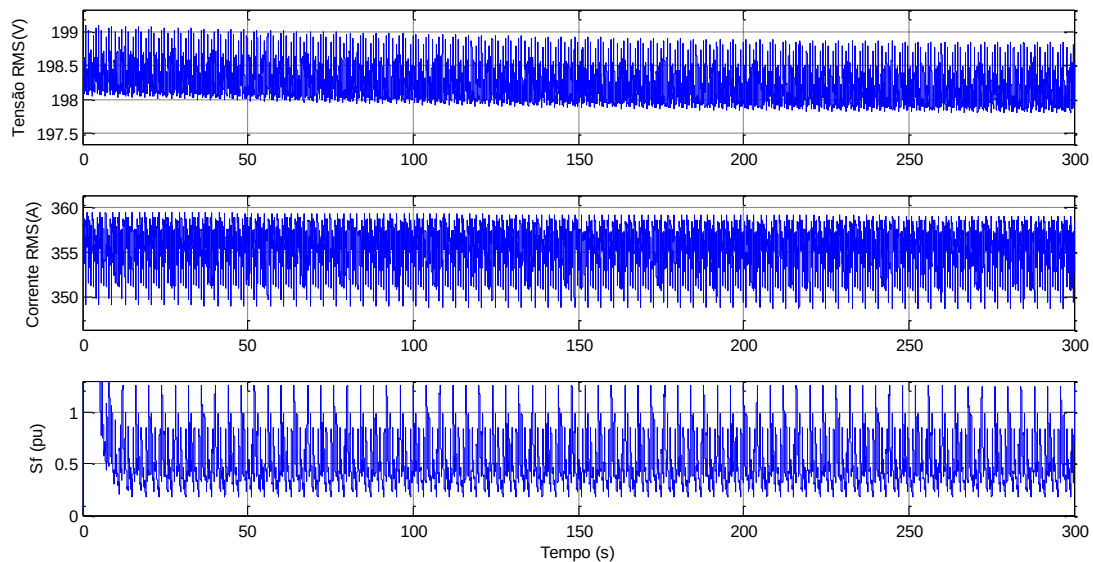


Figura 6.7 – Oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e Sf, sendo 16 máquinas de soldagem em funcionamento contínuo (Caso 1)

A corrente solicitada pela unidade industrial à rede de alimentação proporciona uma queda de tensão através das impedâncias de elementos até o no PAC, gerando assim uma variação ou flutuação de tensão ao longo do tempo. É possível identificar através dos oscilogramas os instantes que ocorrem variações nas correntes e tensões eficazes, são exatamente neste instante de alterações nos estados de acionamento de uma ou mais máquinas de soldagem que podem surgir as cintilações luminosas. Desta forma, a seguir são analisados para os Casos 2 a 5, os índices de QEE a partir da flutuação de tensão mencionada acima.

A Figura 6.8 mostra os oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e Sf para o Caso 2. Comparativamente ao Caso 1, fica bastante evidenciada a maior taxa de variação tanto na corrente eficaz quanto na tensão eficaz de entrada. Nos instantes de maior flutuação de tensão, ou seja, instantes onde coincidentemente um numero maior de máquinas são ligadas ou desligadas ao mesmo tempo, constata-se os maiores valores para a Sf, neste caso especificamente os valores atingem próximo de 30 pu, sendo na maioria dos intervalos próximo de 2 pu. No Caso 2 o valor determinado para o P_{st} é de 2,190 pu.

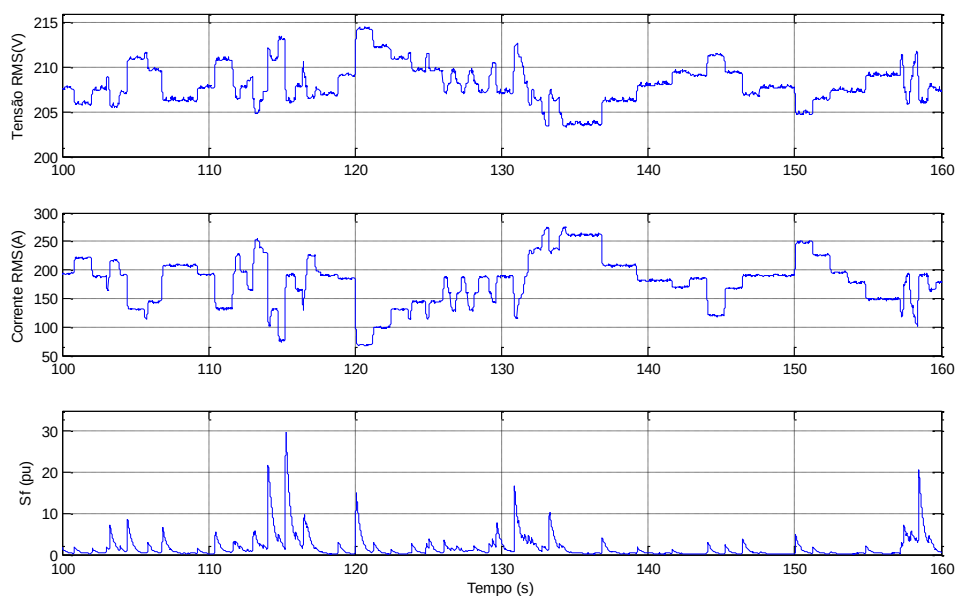


Figura 6.8 – Oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e Sf, tendo 16 máquinas de soldagem, com diversos modos de transferência e funcionamento aleatório (Caso 2)

No Caso 3, a Fig. 6.9 apresenta os oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e Sf. Realizando uma comparação com o Caso 2, nota-se uma maior taxa de variação entre as correntes e tensões eficazes de entrada.

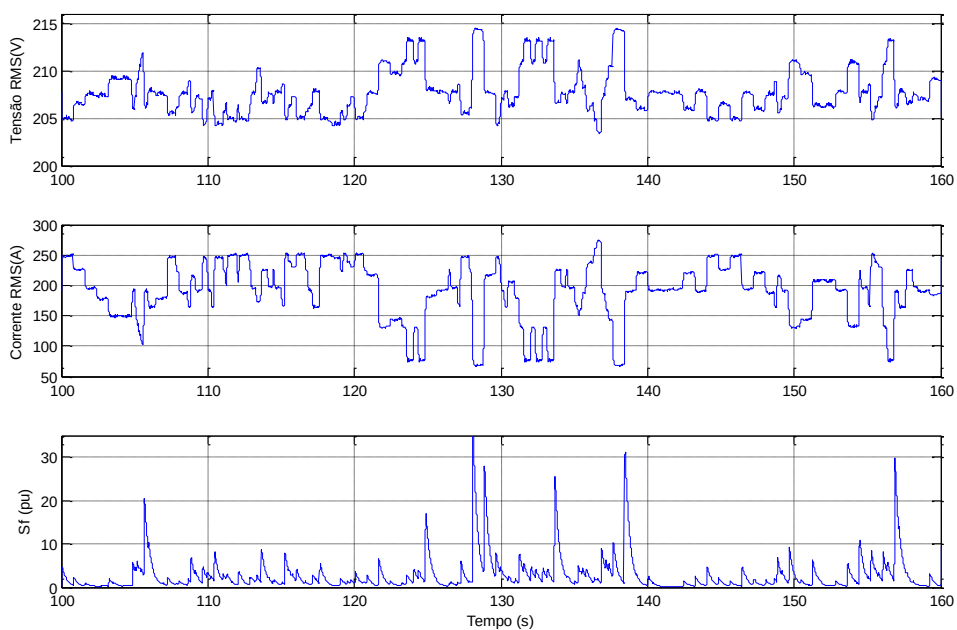


Figura 6.9 – Oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e Sf, tendo 16 máquinas de soldagem, com diversos modos de transferência e funcionamento aleatório (Caso 3)

Este fato faz com que a S_f atinja maiores valores pouco acima de 35 pu, acarretando um valor de P_{st} de 2,331 pu, acima do determinado para o Caso 2.

Para o Caso 4 tem-se que os intervalos de acionamento das máquinas são metade das configuradas para o Caso 3, assim sendo a Fig. 6.10 mostra os oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e S_f . Comparativamente aos Casos 2 e 3, os intervalos de flutuação de tensão e da variação da corrente eficaz tornam-se cada vez mais curtos, proporcionando em alguns momentos, valores de S_f próximo de 40 pu. Desta forma o valor do P_{st} determinado é de 2,808 pu.

Finalmente para o Caso 5, como os intervalos de tempo são 1/8 do Caso 2, fica bastante evidenciado a diferença entre os oscilogramas das tensões e correntes eficazes no PAC. Desta forma, observando a Fig 6.11, constata-se valores de S_f próximos de 65 pu, sendo estes superiores ao encontrados anteriores. Neste Caso, comparativamente aos demais, o valor determinado para o P_{st} também torna-se o maior, sendo de 4,392 pu.

Portanto, através de variação da flutuação de tensão e da frequência desta ocorrência, visualmente pode-se constatar que à medida em que os intervalos de tempo são reduzidos e as variações de corrente e tensão no PAC mantêm-se as mesmas (este fato é garantido pois as máquinas mantêm uma mesma sequência de acionamentos) pode-se constatar um acréscimo nas amplitudes de S_f e conseqüentemente no valor do P_{st} .

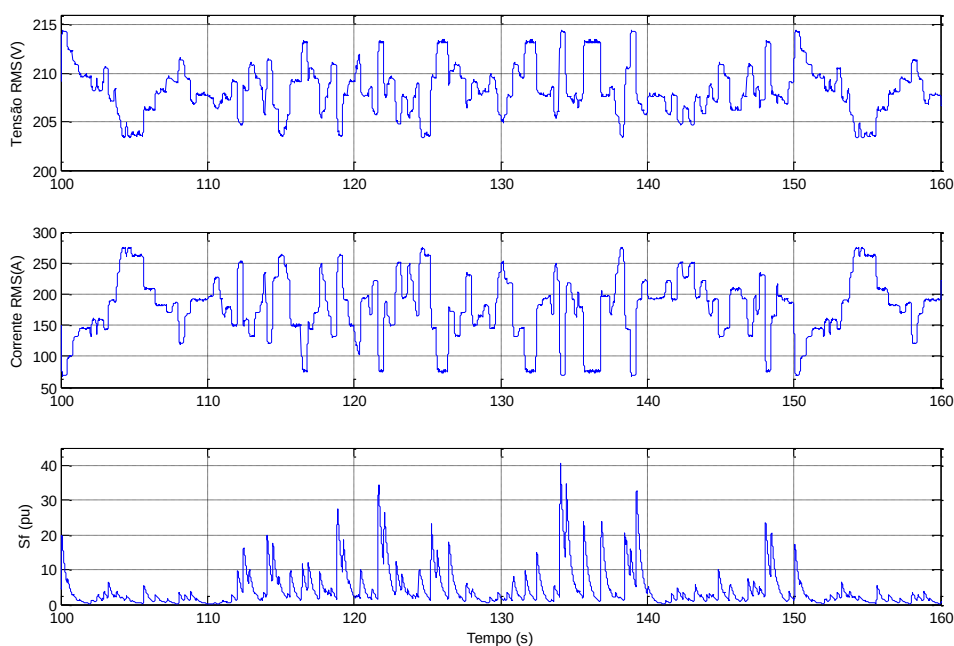


Figura 6.10 – Oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e S_f , tendo 16 máquinas de soldagem, com diversos modos de transferência e funcionamento aleatório (Caso 4)

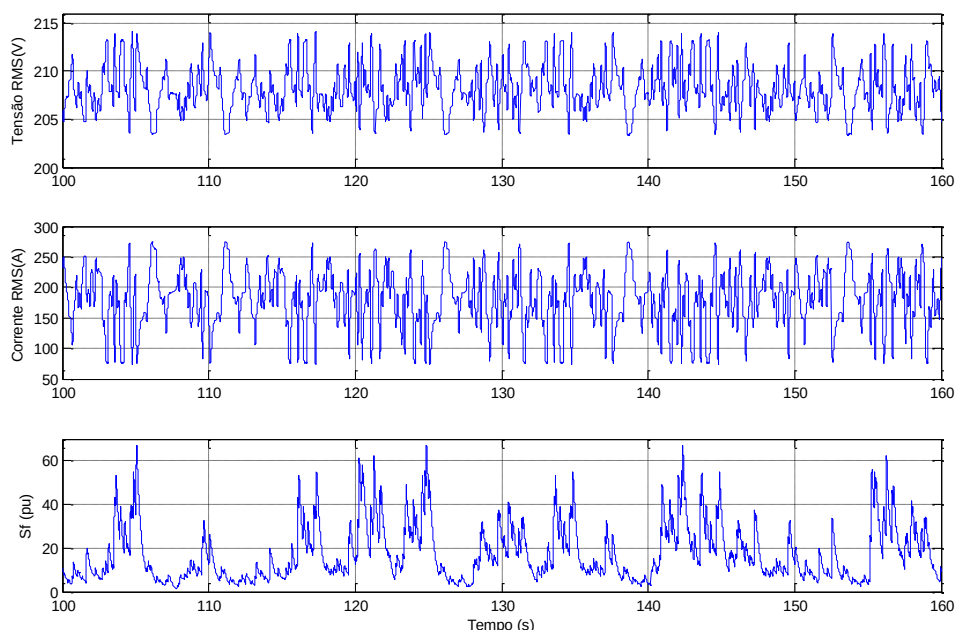


Figura 6.11– Oscilogramas da tensão eficaz, corrente eficaz e Sf, tendo 16 máquinas de soldagem, com diversos modos de transferência e funcionamento aleatório (Caso 5)

A Tabela 6.1 apresenta os valores do P_{st} e a relação entre os intervalos de acionamento para cada um dos estudo de Casos simulados.

Tabela 6.1 - Valores de P_{st} para os casos analisados e relação entre intervalos de acionamento.

Caso	P_{st} (pu)	Tempo de acionamento das 16 máquinas
1	0,666	Contínuo
2	2,190	Define: tempo de início (x), ligado (y) e desligado (z)
3	2,331	Define: tempo de início (x/2), ligado (y/2) e desligado (z/2)
4	2,808	Define: tempo de início (x/4), ligado (y/4) e desligado (z/4)
5	4,392	Define: tempo de início (x/8), ligado (y/8) e desligado (z/8)

6.5 Análise dos Resultados

Analisando os cinco Casos propostos para a unidade industrial e tomando como base as figuras apresentadas para a Sf e os correspondentes valores do P_{st} da Tab. 6.1, concluiu-se que os resultados alcançados devem levar em consideração a forma de acionamento das máquina de soldagem, ou seja, tanto a Sf quanto o valor do P_{st} estão relacionadas com a forma ou a característica de operação exercida na atividade de soldagem.

Observou-se que quando várias máquinas estão em operação, o efeito característico de cada modo de transferência particularmente sobre as amplitudes e a quantidade de espectros de frequência inter-harmônicas tanto de tensão quanto de corrente no PAC não são foram perceptíveis quando apenas duas ou no máximo três máquinas são consideradas. Desta forma, percebeu-se que as amplitudes dos espectros tem menor influência sobre os índices de QEE analisados (S_f , P_{st} e frequências inter-harmônicas) independentemente ao modo de transferência metálica estabelecido por cada uma das máquinas de soldagem. Porém, esta abordagem não desconsidera a importância da análise do tipo de modo de transferência metálica estabelecido, pois no capítulo anterior, os resultados mostraram esta significância. Para o cada da unidade industrial em estudo, não foi apresentado os espectros de frequência, pois a cada instante as frequências inter-harmônicas e as amplitudes são modificadas e em nenhum momento existe uma característica particular como os observados em capítulos anteriores.

Os resultados apresentados na Tab. 6.6 mostraram que as variações nas amplitudes da tensão eficaz no PAC são maiores na medida em que o intervalo de acionamento entre as máquinas de soldagem diminuem, situação que se reflete nos valores da S_f e do P_{st} . Porém algumas observações foram realizadas.

Primeiramente, quando todas as máquinas estão em pleno funcionamento, por um intervalo acima de 10 minutos isoladamente (hipótese torna-se pouco provável de ocorrer em uma atividade de soldagem), a queda de tensão foi a máxima com uma flutuação de tensão mínima. Desta forma, a S_f teve pouca variação e o valor do P_{st} tornou-se o mínimo de todos os Casos analisados.

O menor valor encontrado para o P_{st} deu-se para o caso 1, porém, como já mencionado, este caso é pouco provável de ocorrer. Para os demais casos, o P_{st} permaneceu entre 2,190 e 4,392 pu. Mesmo para o menor valor encontrado, verificou-se que no PAC (barramento de 220 V) ocorre a violação do limite recomendado pelo módulo 8 do PRODIST.

6.6 Considerações Finais

O programa de simulação proposto para a análise de uma unidade industrial tornou-se de fácil manipulação, permitindo ao usuário estabelecer as características do sistema elétrico, determinar o número de máquinas de soldagem com processo MIG/MAG, definir os parâmetros de soldagem a fim de escolher o modo de transferência metálica. Como a

plataforma escolhida foi o Simulink, torna-se possível ao usuário acrescentar outras cargas elétricas que já existem na biblioteca, tais como motores elétricos entre outras.

Como a atividade industrial, com várias máquinas de soldagem, tem diversas particularidades, deve-se conhecer cada processo de soldagem, suas características de operação a fim de encontrar uma melhor estratégia a partir dos resultados encontrados.

Assim sendo, realizando o estudo de cinco Casos para a unidade industrial hipotética com 16 máquinas de soldagem, pode-se afirmar que a S_f e P_{st} são predominantemente estabelecidos pelas formas de operação de cada uma das máquinas de soldagem.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos na tese, conclui-se que:

- O modelo proposto para o arco de soldagem associado ao modelo da fonte de soldagem analógica mostrou ser qualitativamente adequado para analisar a QEE de instalações elétricas compostas por máquinas de soldagem, uma vez que as respostas (sinais de corrente e tensão de soldagem e os espectros de frequência dos sinais de corrente e tensão de entrada da máquina de soldagem) para uma máquina foram compatíveis com resultados obtidos experimentalmente.
- Quantitativamente os resultados simulados e experimentais não foram compatíveis devido à dificuldade de se obter corretamente todos os parâmetros do sistema elétrico (níveis de curto-circuito da fonte de alimentação, relação X/R da fonte de alimentação, as impedâncias dos cabos de alimentação e os parâmetros do transformador trifásico da subestação);
- Para uma máquina de soldagem, os modos de transferência por curto-circuito e goticular foram, respectivamente, os que proporcionaram os piores e melhores indicadores para a QEE;
- O modo de transferência pulsado é o apresenta os menores indicadores sobre a QEE (S_f e P_{st});
- Existe uma tendência de aumento nos valores de S_f e P_{st} (redução na QEE) quando se tem duas máquinas em pleno funcionamento em relação a uma máquina de soldagem com mesmos modos de transferência, porém esta tendência não foi encontrada para os modos de transferência por curto-circuito e globular;
- À medida que os intervalos de acionamentos entre duas ou mais máquinas de soldagem (como em uma unidade industrial) são reduzidos, a S_f e o P_{st} atingem maiores valores, reduzindo a QEE;
- Quanto maior número de máquinas de soldagem em funcionamento ao mesmo tempo (comparativamente a uma máquina), as amplitudes dos espectros de

frequência inter-harmônicas da corrente e tensão de entrada da máquina de soldagem no PAC apresentaram redução e os seus espectros apresentaram um comportamento mais espalhados;

Portanto, através deste trabalho torna-se possível a viabilidade da análise da QEE para uma unidade industrial, pelo meio de um programa de simulação para várias máquinas de soldagem com processo MIG/MAG, possibilitando ao usuário estabelecer as características do sistema elétrico, o número de máquinas de soldagem e os seus parâmetros de soldagem. Assim sendo, esta ferramenta colabora no sentido de determinar antecipadamente os distúrbios causados à rede elétrica, contribuindo para a análise de novos projetos e/ou já instalados.

CAPÍTULO VIII

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos estudos realizados para a simulação de uma unidade industrial que se utiliza de máquina de soldagem para o processo MIG/MAG em sua linha industrial, percebeu-se no transcorrer da pesquisa alguns outros caminhos que poderiam ser seguidos, atrativos à primeira vista, mas que não tiveram seguimento devido a proposta final do trabalho. Não obstante a isto, para se atingir o devido e necessário grau de maturidade sobre o assunto, torna-se importante reconhecer que alguns estudos complementares ainda se fazem necessários. Desta forma, alguns pontos relevantes e meritórios para investigações futuras são propostos:

Em relação à rede elétrica e a qualidade da energia elétrica:

- Aprimoramento no modelo do sistema elétrico a fim de contemplar possíveis distúrbios pré-existentes, comparando com o sistema elétrico sem distúrbios e posterior verificação do acréscimo ou redução nos distúrbios da rede de alimentação;
- Migrar o modelo do arco de soldagem para o aplicativo ATP/EMTP ou para a plataforma APR para inseri-lo como a carga para a máquina e desenvolver a topologia da máquina de soldagem com as bibliotecas já existentes; e
- Simular a inclusão de filtros harmônicos no alimentador primário da unidade industrial e analisar as possíveis reduções harmônicas e inter-harmônicas como uma medida mitigadora para a resolução dos distúrbios produzidos.

Em relação ao processo de soldagem e a máquina de soldagem:

- Modelar o arco de soldagem para os demais processos de soldagem, tais como, Plasma MIG e TIG e acrescentar no modelo proposto a fim de obter uma máquina de soldagem com o maior número de processos de soldagem possível;
- Aperfeiçoar o modelo para a máquina de soldagem eletromagnética;

- Realizar uma modelagem para a máquina de soldagem Inversora, contemplando os controles para corrente constante e/ou tensão constante e finalmente comparando os efeitos sobre a QEE com a máquina de soldagem eletromagnética;
- Realização de estudos avaliativos no sentido de validar o modelo para duas e/ou três máquinas de soldagem com diversos modos de transferência metálica;
- Comparar os resultados obtidos considerando que a fonte de soldagem fosse carga resistiva com mesma potência;
- Analisar a viabilidade e implementar o método de Monte Carlo como um método estatístico a fim de simular o número de máquinas de soldagem, modos de transferência metálica e intervalos de acionamentos para as máquinas de soldagem; Aplicar o modelo desenvolvido para o arco/máquina de soldagem para outras aplicações, como simulações do processo em si, em treinamento ou educação (prever o que aconteceria com o sinal da tensão e corrente, e até com o modo de transferência, se forem variados os parâmetros relativos ao tipo de gás de proteção, arame eletrodo, comprimento de arco, indutância e velocidade de alimentação).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM Handbook: Welding, Brazing, and Soldering, Vol. 6, F.J. Grist, Miller Electric Manufacturing Company, Inc.; W. Farrell, G.S. Lawrence, F. Sciaky, p. 92-110, 1993.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, 2010.

BÁLSAMO, P.S.S; VILARINHO, L.O.; SCOTTI, A. Comparação de uma Nova Concepção de Sistema Sinérgico com um Sistema Sinérgico Comercial na Soldagem MIG Pulsado de Aço Inoxidável. Soldagem & Inspeção, Vol. 7, nº 1, p. 01-06, Jul/Set 2002.

BINGUL, Z.. Dynamic Modeling of the gas metal arc welding process. Tese de doutorado, Vanderbilt University, 2000.

BINGUL, Z.. Instability phenomena in the gas-metal arc welding self-regulation process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture June 1, vol. 216, no. 6, p.899-910, 2002.

CHO, S. H.; JUNG, J. A.; JANG, G.; KWON, S. H.; KANG, M. H.. Development of Matlab/Simulink Module for Voltage Flicker Simulation in Distribution Power Systems. Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 314-319, 2008.

CHOI, B. J. H.; LEE, J. Y.; YOO, C. D.. Simulation of dynamic behavior in a GMAW system. Welding Journal, p. 239-245, October, 2001.

FATHY, K.; MORIMOTO, K.; SUH, K. Y.; KWON, S. K.; NAKAOKA, M.. A Novel Prototype of Duty Cycle Controlled Soft-Switching Half-Bridge DC-DC Converter with Input DC Rail Active Quasi Resonant Snubbers Assisted by High Frequency Planar Transformer. Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2, No. 1, p. 89-97, 2007.

GALHARDO, A.; VERDELHO, P., Flicker analysis generated by arc welding electronic machines, Electrimacs 99, modelling and simulation of electric machines converters and systems. Lisboa - Portugal. pp. II.151- II.157, 14 -16 September, 1999.

GED 238 - Critério para Atendimento a Máquina de Solda, CPFL Paulista, 2000.

GORH, R. JR.. Desenvolvimento de Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, 165p, 2002.

GOLKAR M. A.; BINA M. T.; MESCHI S. A.. Novel Method of Electrical Arc Furnace Modeling for Flicker Study, Renewable Energies and Power Quality, Vol. 126, No. 7, March, p. 620-626, 2007.

GUSTAVSSON, N.. Evaluation and Simulation of Black-box Arc Models for High-Voltage Circuit-Breakers, Linköping University, 2004.

HERMANS, M. J. M. A study of Short Circuiting Arc Welding. Tese de Doutorado, Delft University of Technology, 1997.

IEC 61000-4-15: 2010, Edition 2.0. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Testing and Measurement techniques – Flickermeter - Functional and design specifications, 2010.

IMC-SOLDAGEM. Manual do Equipamento. Apresenta as características da fonte de soldagem Inversal 450. Disponível em <<http://www.imc-soldagem.com.br/inversal.html>>. Acesso em: 20 de maio de 2010a.

IMC-SOLDAGEM. Manual do Sistema. Sistema de aquisição portátil - SAP 4.0. Disponível em <http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html>. Acesso em: 20 de maio de 2010b.

JILUAN P.. Arc welding control. 1.ed. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, 603p, 2003.

KEPPLER, T.; WATSON, N. R.; ARRILAGA, J.; CHEN, S. Theoretical Assessment of Light Flicker Caused by Sub- and Interharmonic Frequencies, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, p.329-333, January 2003.

KIM, T.; POWERS, E. J. W. GRADY, M.; ARAPOSTATHIS, A. Detection of Flicker Caused by Interharmonics. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 1, p. 152-160, January 2009.

LANCASTER, J. F. The Physics of Welding. Oxford, Pergamon, 2nd edition, IIW/IIS 1986.

LI, C.; XU, W.; TAYJASANANT, T. Interharmonics: basic concepts and techniques for their detection and measurement. Electric Power Systems Research., vol. 66, pp. 39–48, 2003.

MACEDO Jr, J. R.. Uma Contribuição à Análise das Componentes Inter-harmônicas e seus Efeitos nos Indicadores de Flutuação de Tensão. Tese de Doutorado, UFES, 201p, 2009.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.. Soldagem - fundamentos e tecnologia. 3. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 362p, 2009.

MODENESI, P. J.. Statistical modelling of the narrow gap gas metal arc welding process. Tese de doutorado, Cranfield Institute of Technology, p. 274, 1990.

MODENESI, P. J.; REIS, R. I. A model for melting rate phenomena in GMA welding. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 189, Issues 1-3, p. 199-205, 6 July 2007.

MODENESI, P. J.. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 146p. (Apostila), 2009.

MODENESI, P. J.; COSTA, M. C. M. S.; SANTANA, I. J.; BERGANHOLI, J. P. P. Estudos de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito. Soldagem & Inspeção, Volume 16, nº 1, p. 012-021, Jan/Mar 2011.

MODENESI, P. J.; MATILDE, S.; CANÇADO, G. L. Q.; MELO, C. E. D. Um programa de computador para simular alguns aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG. Soldagem & Inspeção, Volume 17, nº 1, p. 032-029, Jan/Mar 2012.

MONTEIRO, M. P.. Perspectivas para a indústria de soldagem. Disponível em: <<http://www.mixandi.com.br/artigos/perspectivas-para-a-industria-de-soldagem.php>>. Acesso em: 2 de março 2012.

NAIDU, D. S.; OZCELCI, S.; MOORE, K. L.. Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding. Elsevier Science Ltd, Oxford, 2003.

ND.50 - Ligações de Máquinas de Solda às Redes de Distribuição de Energia Elétrica, Elektro Eletricidade e Serviços S.A., Campinas – SP, 64p, 2013.

NGO, M. D.; DUY, V. H.; PHOUNG, N. T.; KIM, H. K.; KIM, S. B.. Development of digital gas metal arc welding system. Journal of Materials Processing Technology, p. 384-391, 2007.

OZGUN O.; ABUR A.. Flicker study using a novel arc furnace model, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, P. 1158-1163, October 2002.

PALANI, P.K.; MURUGAN, N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding, Journal of Materials Processing Technology, vol.172, Issue 1, p.1-10, Feb. 2006.

PLANCKAERT, J. P.; DJERMOUNE, E. H.; BRIE, D.; BRIAND, F.; RICHARD F. P.. Droplet features extraction with a dynamic active contour for MIG/MAG welding modelling, in 18th International Conference on Systems Engineering, Coventry, England, September, p 365-370, 2006.

PLATA, E. A. C.; TACCA H. E.. Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP, The 6th International Conference on Power Systems Transients (IPST), Montreal Canada , June 19--23, 2005.

PONOMAREV, V; SCOTTI, A.; NORRISH, J; LUCAS, W.. Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification. IIW Doc. XII-1960-09, 2009.

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA P. K. D. V.; KANG, M. J.. Advancements in pulse gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology, p. 164-165, 2005.

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, 4ª revisão, data de vigência em 01/02/2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1877>. Acesso em: 12 março 2012.

ROCA, S. A.; FALS, H. C.; FERNÁNDEZ, J. B.; ADÁN, F. S.. Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode. *Soldagem & Inspeção*, Volume 10, nº 2, p. 85-91, Abr/ Jun 2005.

SANTANA, I. J.. Modelamento Matemático do processo de soldagem GMAW. Tese de Doutorado, UFMG, 2010.

SCOTTI, A.. Mapping the Transfer Modes for Stainless Steel GMAW. *J. of Science and Technology of Welding and Joining*. Institute of Materials Publ, UK, Volume 5, Nº 4, p.227-234, 2000.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; RESENDE, A.. The Influence of the electrode materials and shielding gas mixture on the specific electric resistances of the drop/column of the arc in MIG/MAG welding. 59th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Quebec City, Canada, 28-30 Aug, IIW/IIS DOC XII-1909/06, CD Rom, p.1-9, 2006.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.. Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 284p, 2008.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. LUCAS, W.. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMAwelding. *Journal of Materials Processing Technology* 212, p.1406– 1413, 2012.

SIMPSON, S. W.. Metal transfer instability in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, Volume 14, Number 4, p. 262-273, 2009.

SOUSA, J. P. M; PEIXOTO, Z. M. A.; ALVES, M. F.; GARCIA, C. P.. "Um modelo de forno a arco utilizando a teoria do caos" Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica – VI SBQEE - Belém, 21-24 de Agosto, p. 521-527, 2005.

SOUZA, D. Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana. Dissertação de Mestrado, 2010.

SUBAN, M; TUSEK, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, Issues 1-3, , p. 185-192, 20 December 2001.

TAYJASANANT, T.; WANG, W.; LI, C.; XU, W., "Interharmonic-flicker curves," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.20, no.2, pp. 1017-1024, April 2005.

TERASAKI, H.; SIMPSON, S. W.. Circuit simulation for gas metal arc welding system. Science and Technology of Welding and Joining, p. 121-124, 2005.

TERASAKI, H.; SIMPSON, S. W.. Modelling of the GMAW system in free flight and short circuiting transfer. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, Number 1, p.120-124, 2005.

TERASAKI, H.; SIMPSON, S. W.. Circuit simulation for gas metal arc welding system. The 47th International Midwest Symposium on Circuits and System, University of Sydney, p.387-390, 2006.

TERUMI, N.; KAZUO, H.; MAKOTO, T.; SASAKI TOMOAKI, S.. GMA Welding Process with Periodically Controlling Shielding Gas Composition - Development of Ultra-Narrow Gap GMA Welding Process (Report 3) - Quarterly Journal of the Japan Welding Society. Vol. 20 No. 2, p.237-245, May 2002.

TESTA, A; et al.. Interharmonics: Theory and Modeling. IEEE Task Force on Harmonics Modeling & Simulation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, Issue: 4, p. 2335-2348, October 2007.

TIPI, A. R. D.. The study on the drop detachment for automatic pipeline GMAW system: short-circuit mode. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 50, Num. 1-4, p.149-161, 2010a.

TIPI, A. R. D.. The study on the drop detachment for automatic pipeline GMAW system: free flight mode. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 50, Num. 1-4, p.137-148, 2010b.

TSENG, K. J.; WANG, Y.; VILATHGAMUWA, D. M.. An experimentally verified hybrid Cassie–Mayr electric arc model for power electronics simulations, IEEE Transaction Power Electronics, Vol. 12 , Issue 3 , p. 429-436, 1997.

VERVENNE, I; REUSEL, K. V; BELMANS, R.. Electric Arc Furnace Modelling from a “Power Quality” Point of View. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, p. 1-6, 2007.

XU, P.; RADOS, M.; SIMPSON, S. W.. Circuit simulation for gas metal arc welding. Science and Technology of welding and Joining, Volume 4, Number 6 , p. 341-346, 1999.

Artigos completos publicados em periódicos relacionados com a tese

SILVA, E. F.; MACEDO JR., J. R.; OLIVEIRA, J. C.; SCOTTI, A.. Power quality analysis of gas metal arc welding process operating under different drop transfer modes. Renewable Energy and Power Quality Journal, v.9, p. 338, 2011.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

SILVA, E. F.; MACEDO JR., J. R.; OLIVEIRA, J. C.; SCOTTI, A.. Power quality analysis of gas metal arc welding process operating under different drop transfer modes. International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ'11, Las Palmas, Gran Canarias, 2011.

SILVA, E. F.; MACEDO JR., J. R.; OLIVEIRA, J. C.; SCOTTI, A.. Flutuação de tensão e inter-harmônicas no processo de soldagem MIG pulsado. In: IX Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE, Cuiabá, v.9. p.260-265, 2011.

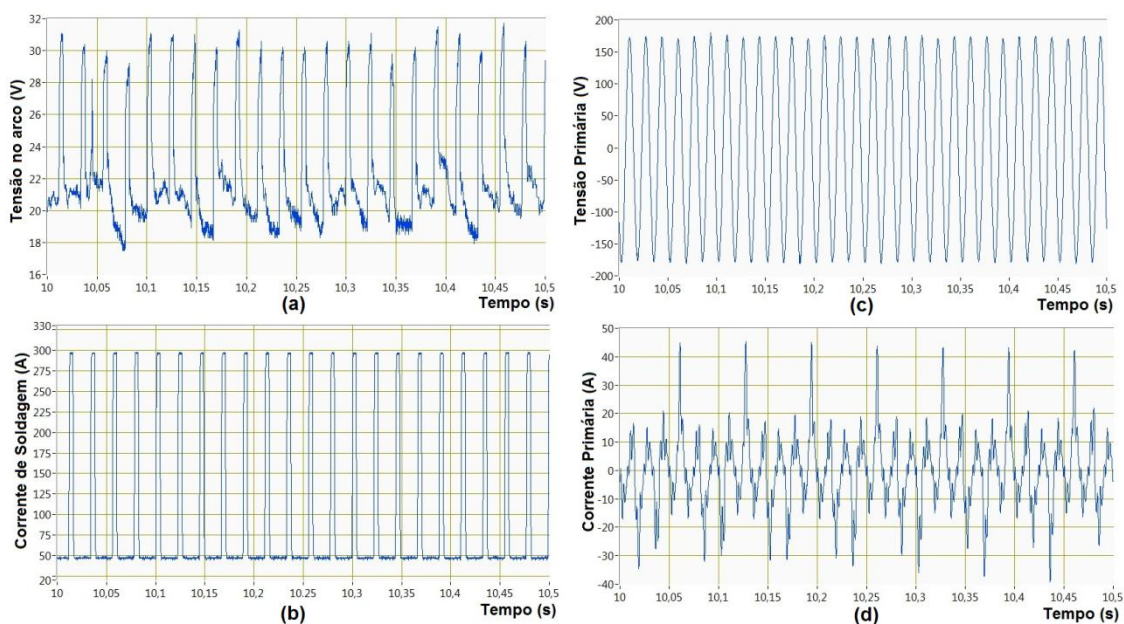
SILVA, E. F.; MACEDO JR., J. R.; OLIVEIRA, J. C.; SCOTTI, A.. Análise do processo de soldagem MIG/MAG sob o enfoque da qualidade da energia elétrica. In: IX Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE, Cuiabá, v.9. p.266-271, 2011.

SILVA, E. F.; MACEDO JR., J. R.; SCOTTI, A.; OLIVEIRA, J. C.. Power quality analysis of gas metal arc welding process operating under different drop transfer modes. In: The 11th Brazilian Power Electronics Conference, Natal - RN, v.1. p.1-8, 2011.

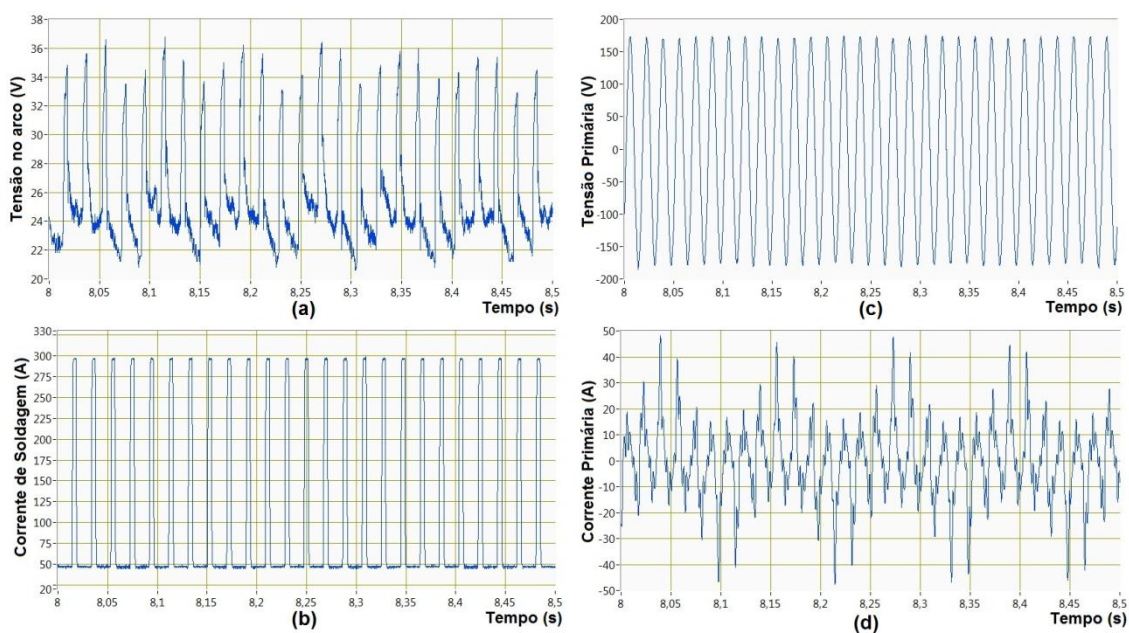
APÊNDICE - A

Oscilogramas de tensões e correntes para a condição MIG pulsado com diversas frequências de pulso obtidas experimentalmente

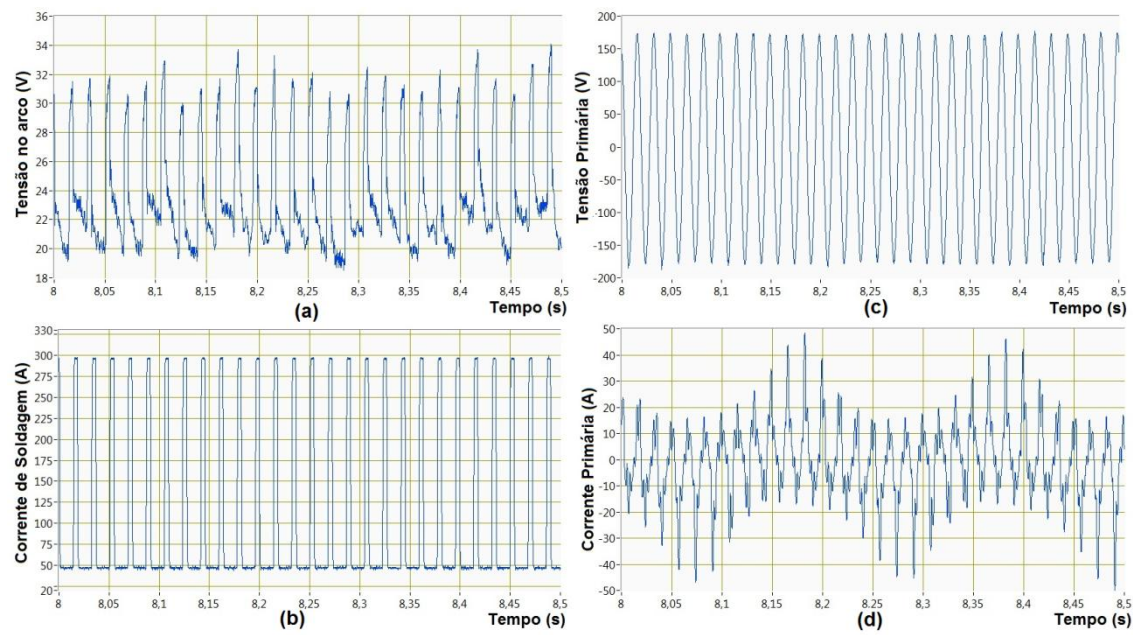
a) 45,5 Hz



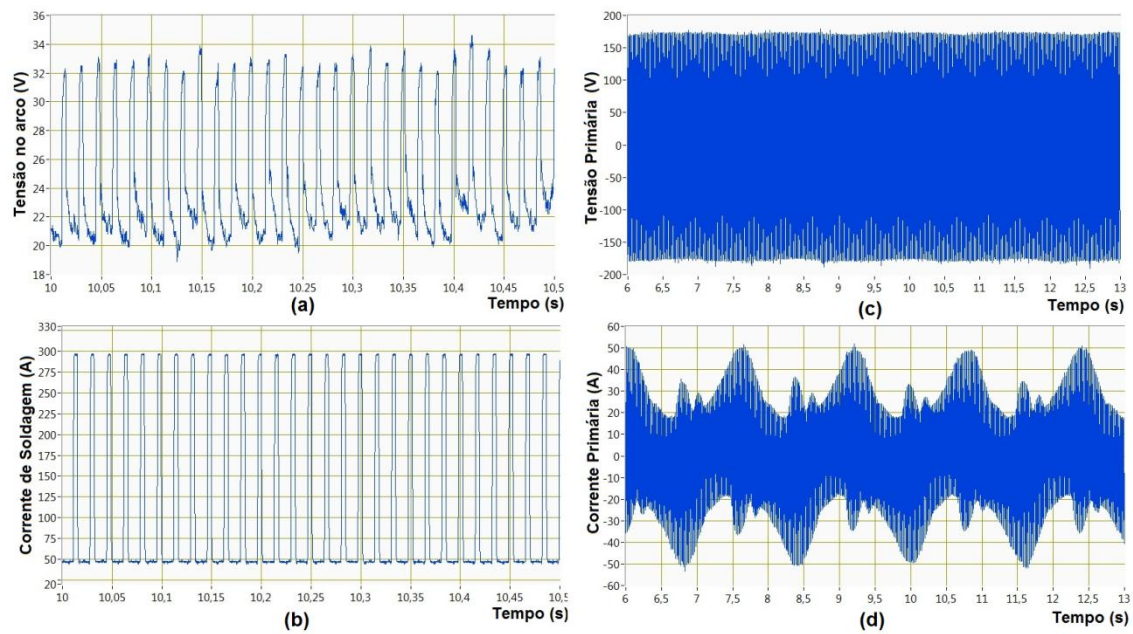
b) 51,8 Hz



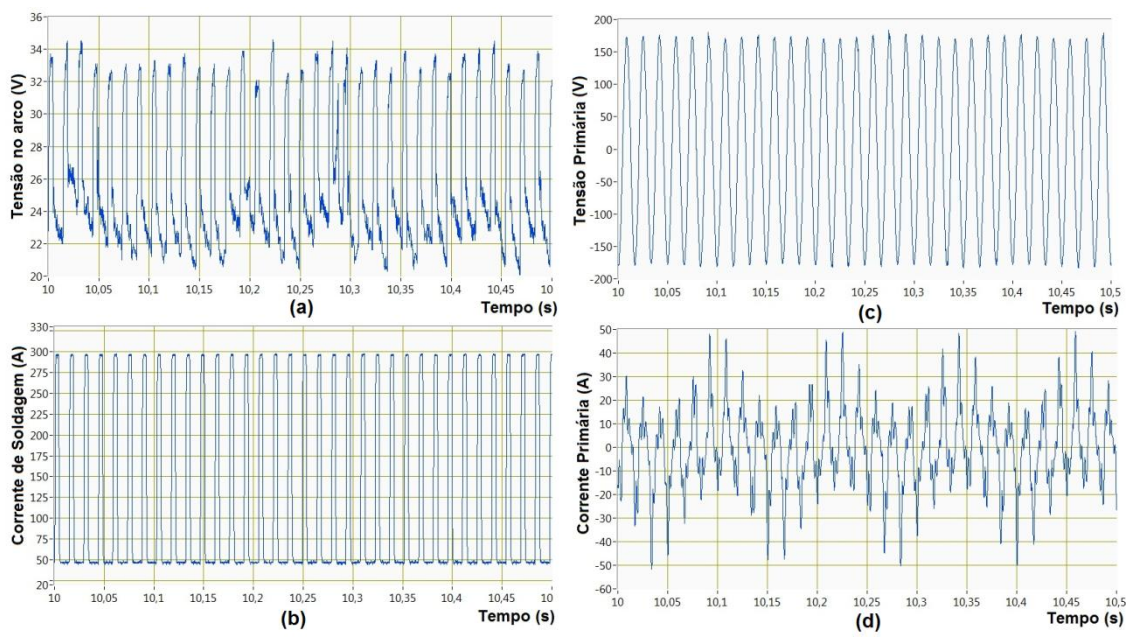
c) 55,6 Hz



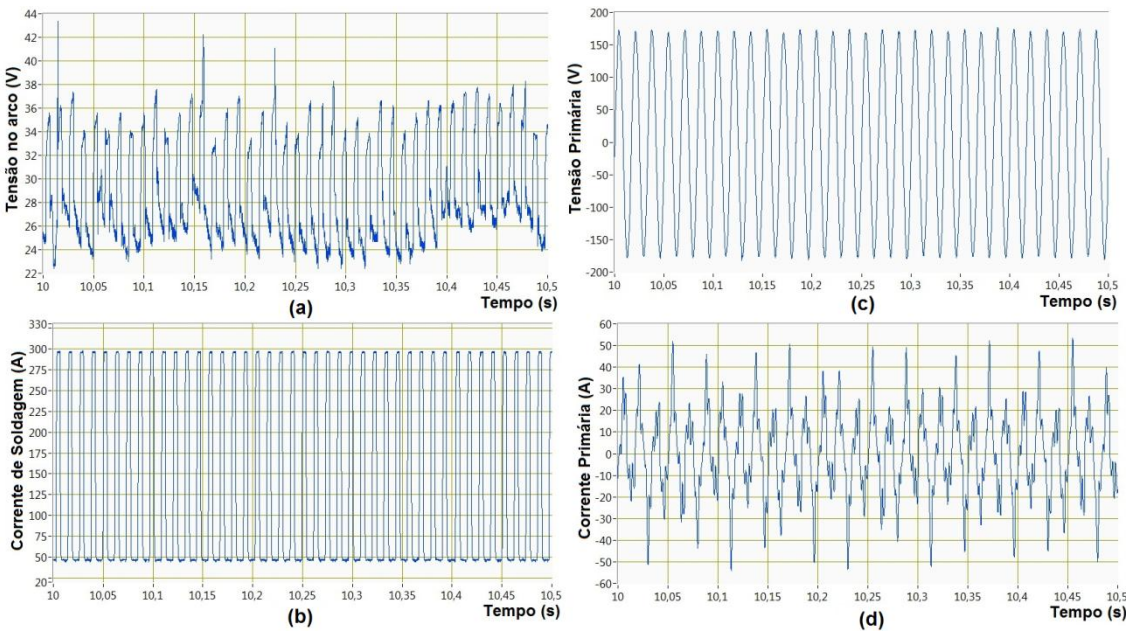
d) 59,9 Hz



e) 68,8 Hz



f) 86,2 Hz



APÊNDICE - B

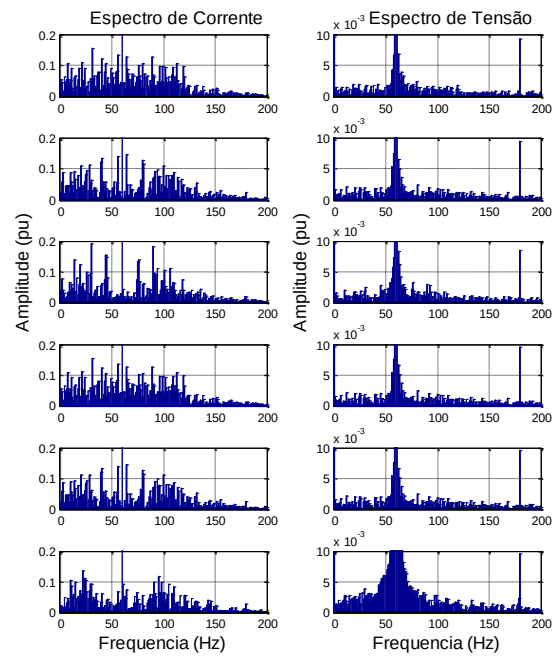
Espectros de Frequência em Vários Instantes para os Diversos Modos de Transferência

Este apêndice tem-se como principal objetivo apresentar uma sequência de espectros a fim de mostrar a característica particularizada observada em cada modo de transferência metálica, visto que nos capítulos pertinentes da tese são fornecidos apenas um espectro de frequência ao longo de todo o ensaio experimental ou simulado. Desta forma, não fica nítido a caracterização observada por cada modo de transferência metálica. Por este motivo, uma sequência de figuras são apresentadas a fim de minimizar esta deficiência.

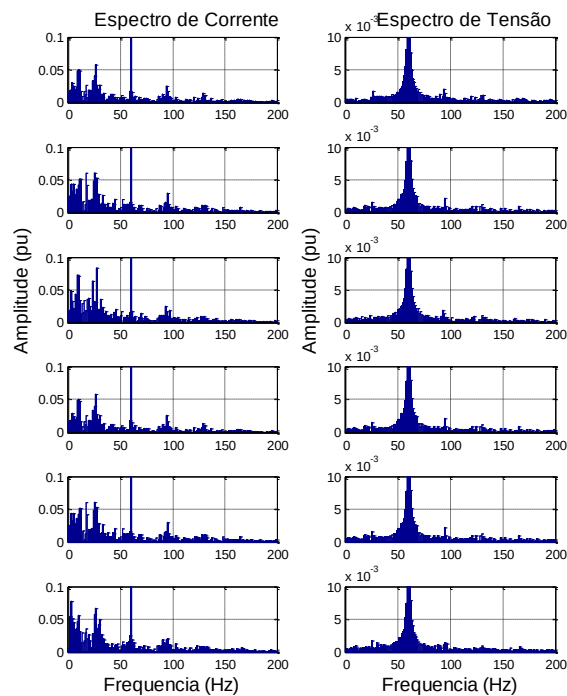
As Figuras B1 a B12 ilustram os espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem obtidos nos ensaios experimentais e na simulação para os diversos modos de transferência metálica. Em todos os ensaios experimentais, os intervalos de soldagem não ultrapassaram 20 segundos. Desta forma são exibidos os espectros de frequência inter-harmônicas para seis intervalos de soldagem de 1 segundo, tendo cada espectro de frequência uma resolução espectral de 1 Hz.

Nos resultados de simulação são impetrados seis intervalos (5, 10, 20, 30, 40 e 50 segundos) dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem. Portanto, analisando as figuras detalhadamente (através de suas sequências), pode-se confirmar a existência de uma semelhança no comportamento das variações nas amplitudes e nas frequências inter-harmônicas geradas por cada modo de transferência metálica.

B1. Espectros de Frequência para o Modo de Transferência por Curto-circuito



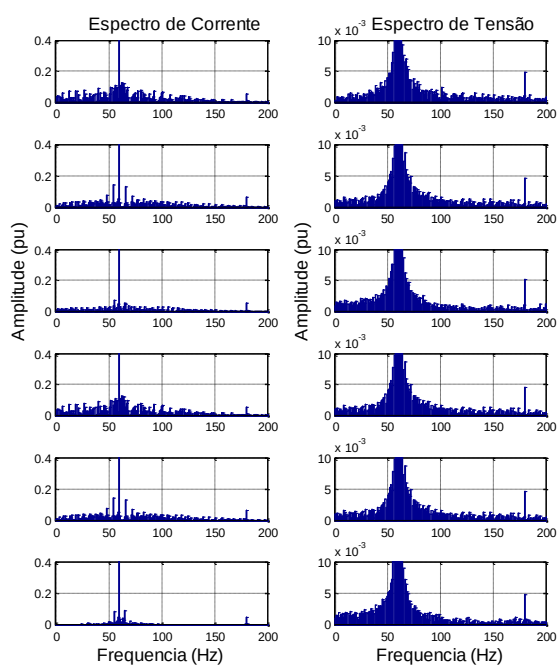
(a)



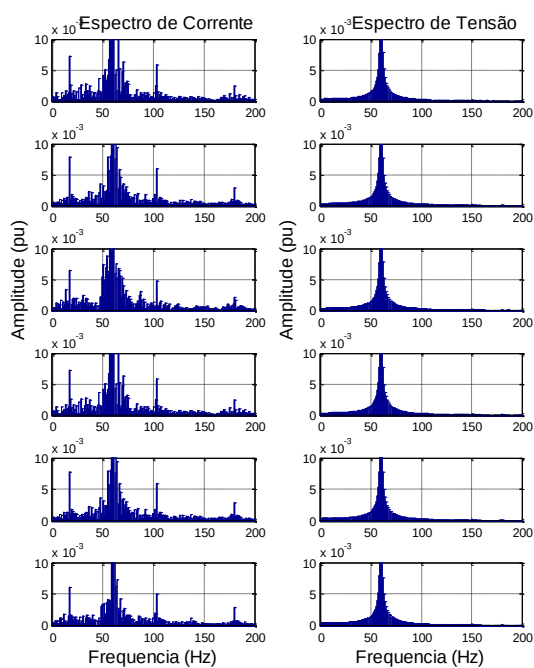
(b)

Figura B1 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o modo de transferência por curto-circuito: a) ensaio experimental, b) simulação.

B2. Espectros de Frequência para o Modo de Transferência Globular



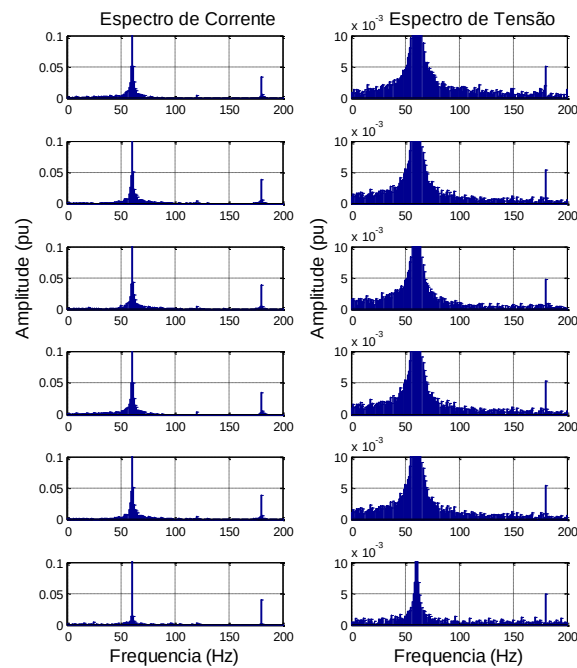
(a)



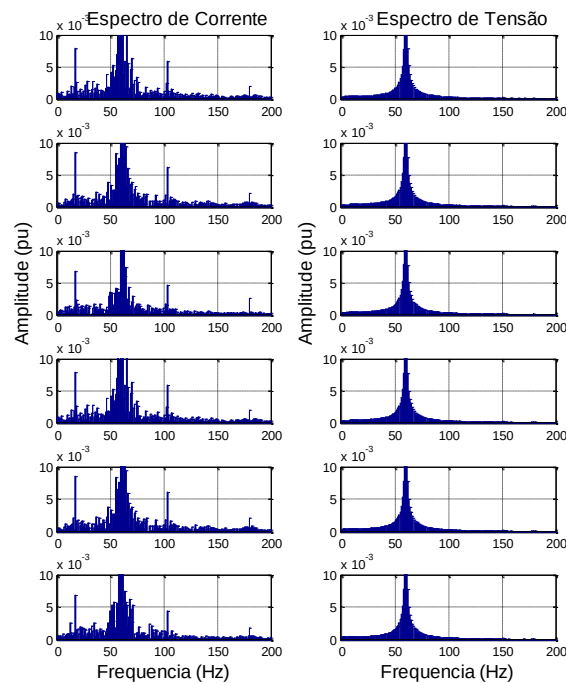
(b)

Figura B2 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o modo de transferência globular: a) ensaio experimental, b) simulação

B3. Espectros de Frequência para o Modo de Transferência Goticular



(a)

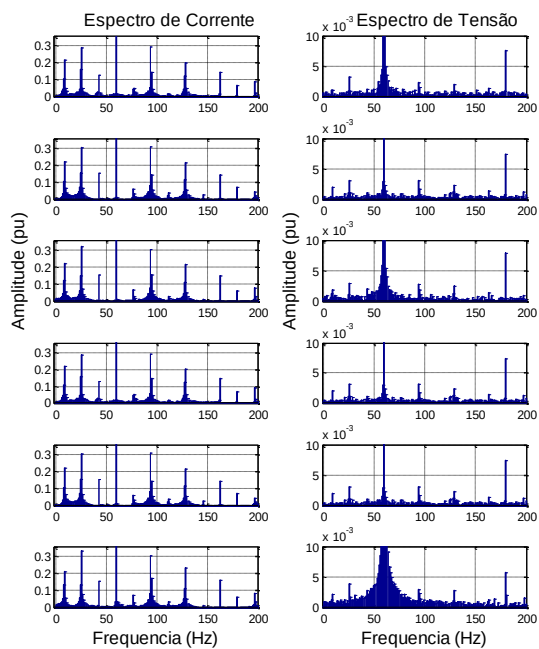


(b)

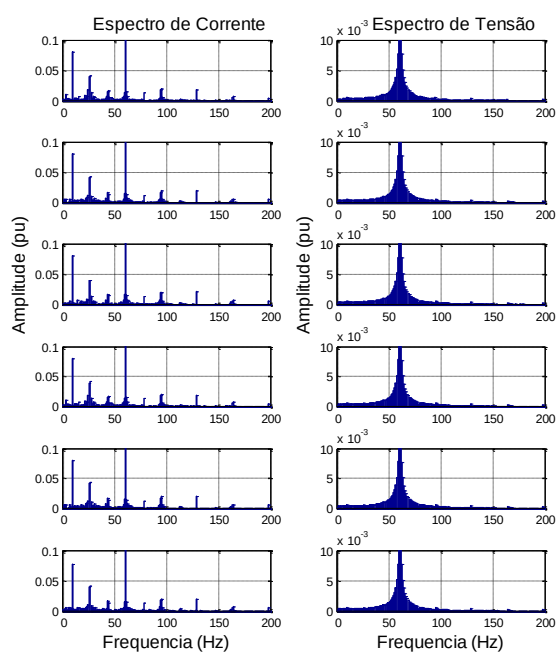
Figura B3 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o modo de transferência goticular: a) ensaio experimental, b) simulação

B4. Espectros de Frequência para o MIG Pulsado

B4.1. Frequência de pulso de 34,5 Hz



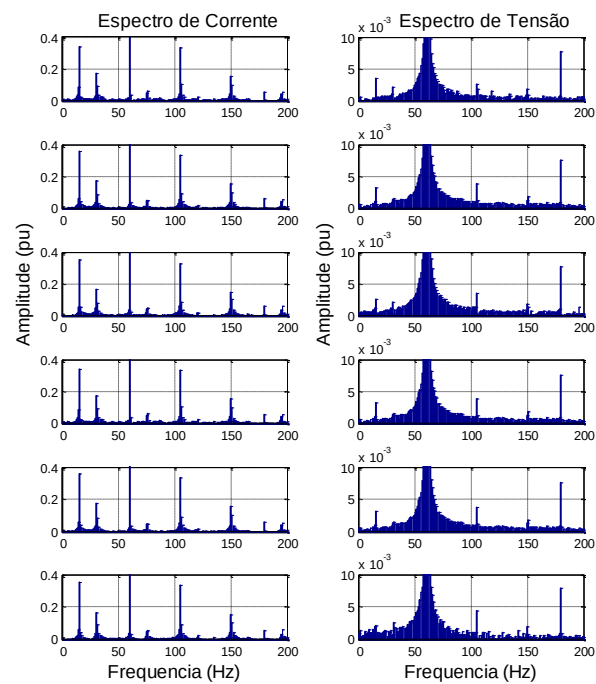
(a)



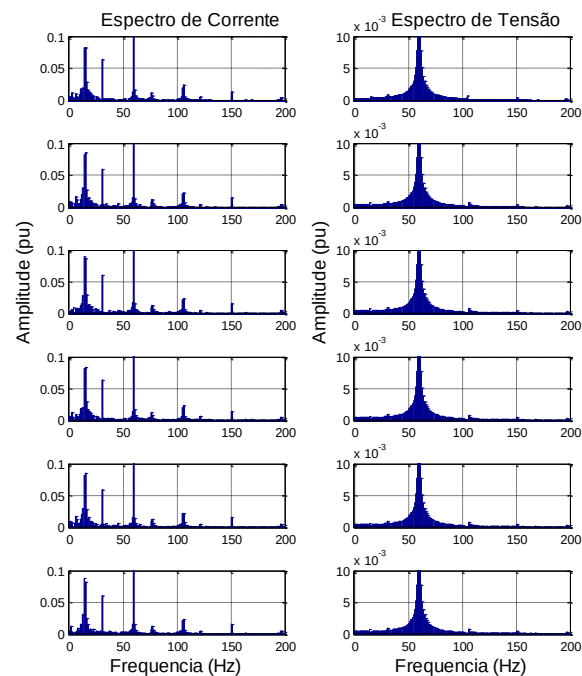
(b)

Figura B4 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 34,5 Hz: a) ensaio experimental, b) simulação

B4.2. Frequência de pulso de 45,5 Hz



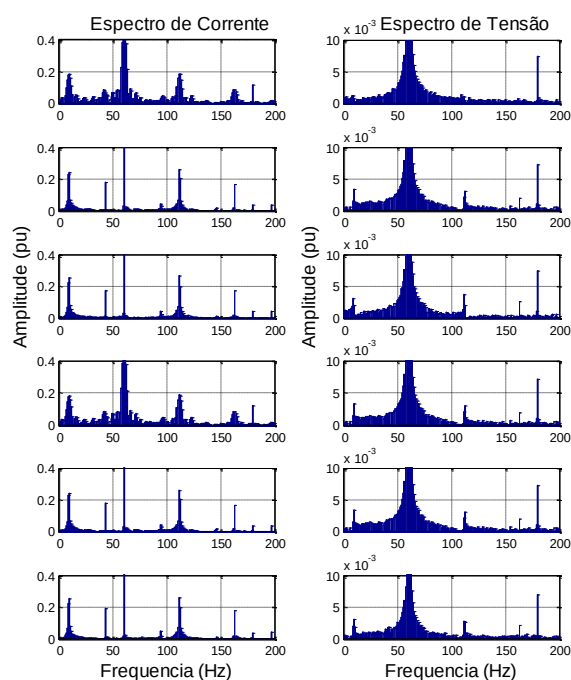
(a)



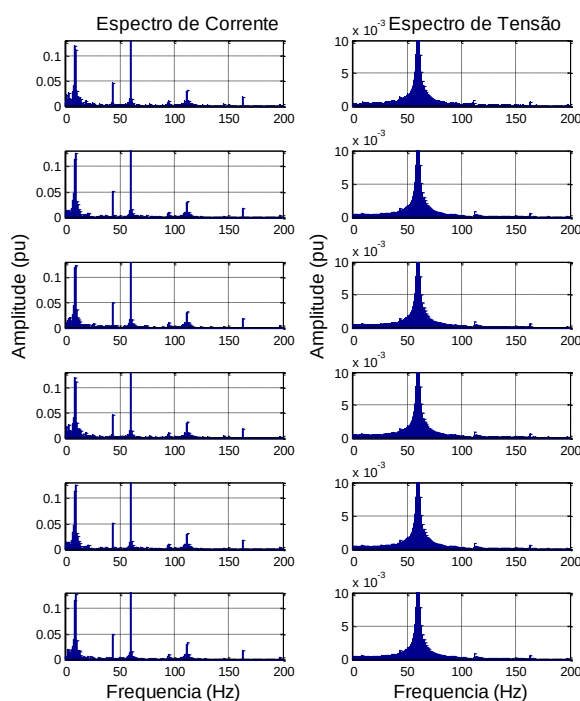
(b)

Figura B5 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 45,5 Hz: a) ensaio experimental, b) simulação

B4.3. Frequência de pulso de 51,8 Hz



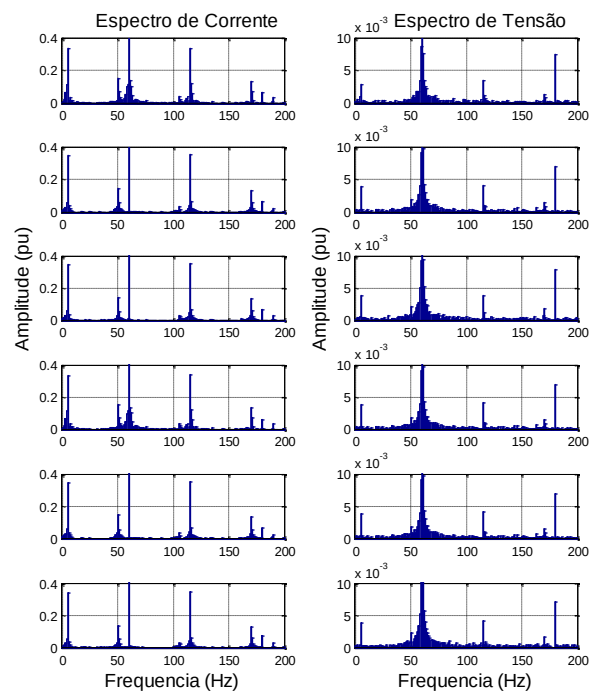
(a)



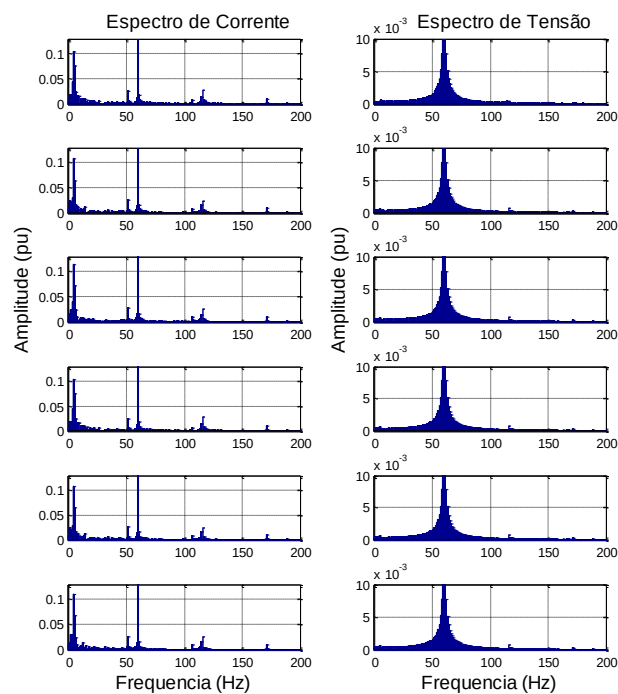
(b)

Figura B6 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 51,8 Hz: a) ensaio experimental, b) simulação

B4.4. Frequência de pulso de 55,6 Hz



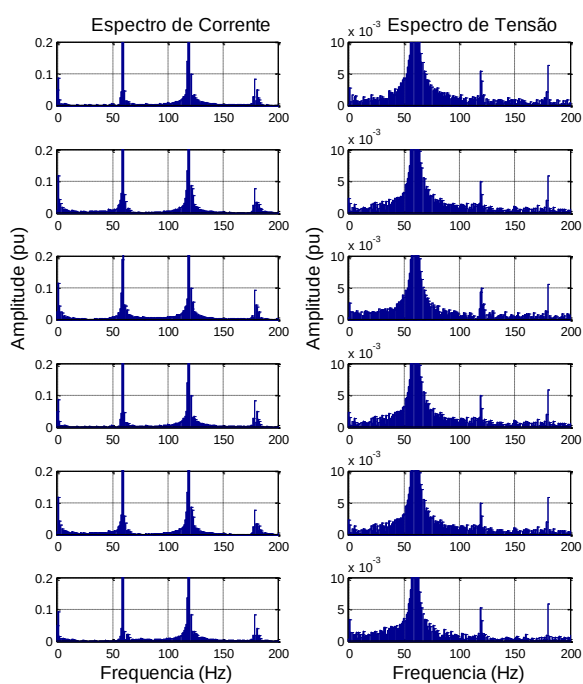
(a)



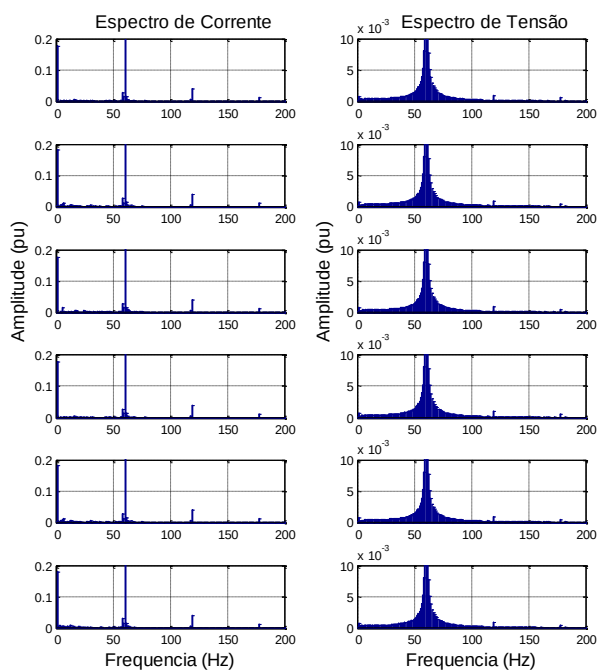
(b)

Figura B7 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 55,6 Hz: a) ensaio experimental, b) simulação

B4.5. Frequência de pulso de 59,9 Hz



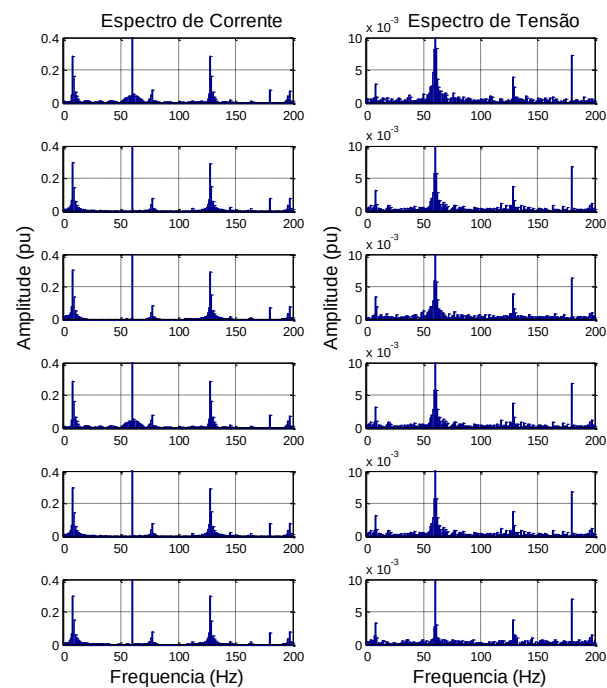
(a)



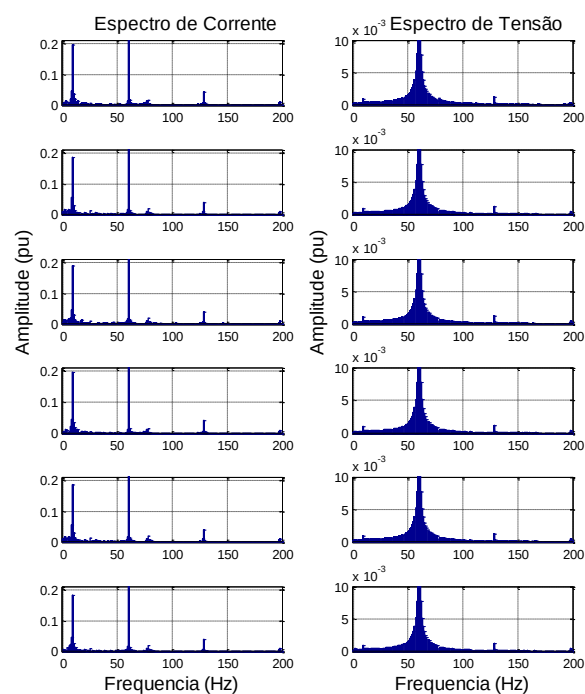
(b)

Figura B8 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 59,9 Hz: a) ensaio experimental, b) simulação

B4.6. Frequência de pulso de 68,8 Hz



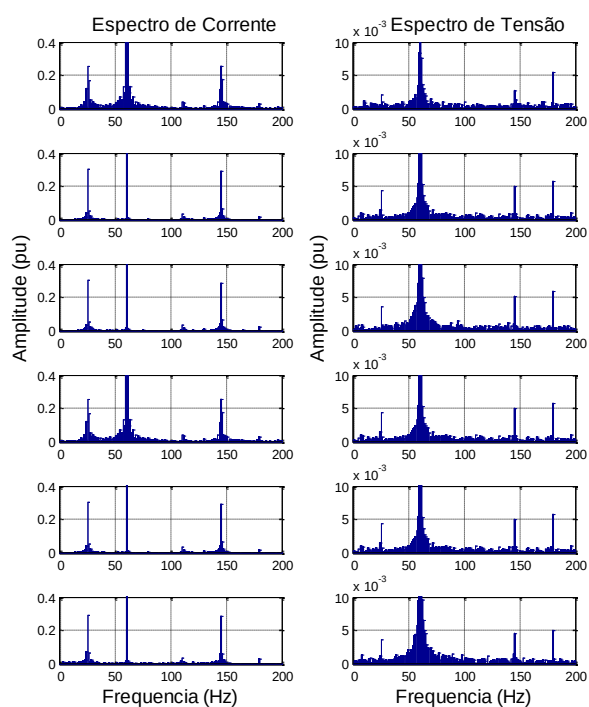
(a)



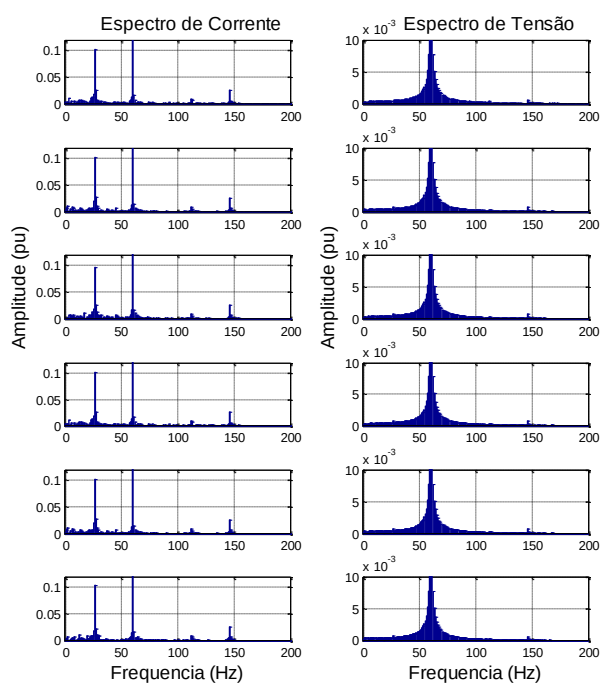
(b)

Figura B9 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 68,8 Hz: a) ensaio experimental, b) simulação

B4.7. Frequência de pulso de 86,2 Hz



(a)



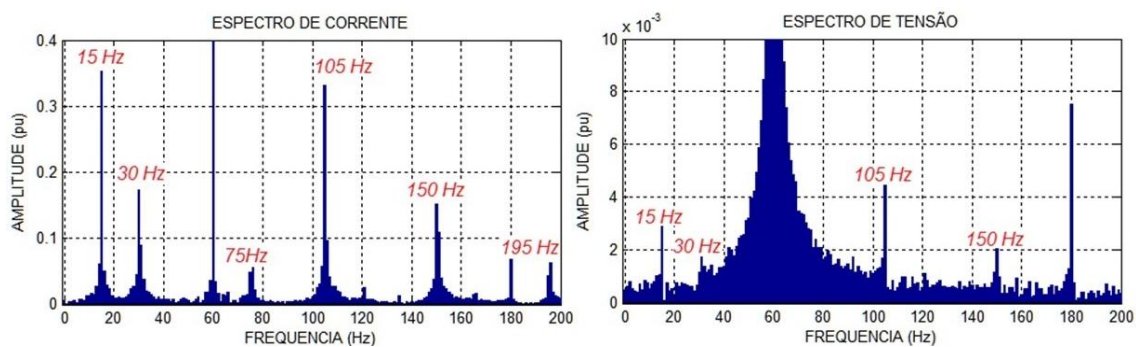
(b)

Figura B10 - Espectros de frequência inter-harmônica dos sinais de corrente e tensão da entrada da máquina de soldagem para o MIG pulsado com frequência de pulso de 68,8 Hz. a) ensaio experimental, b) simulação

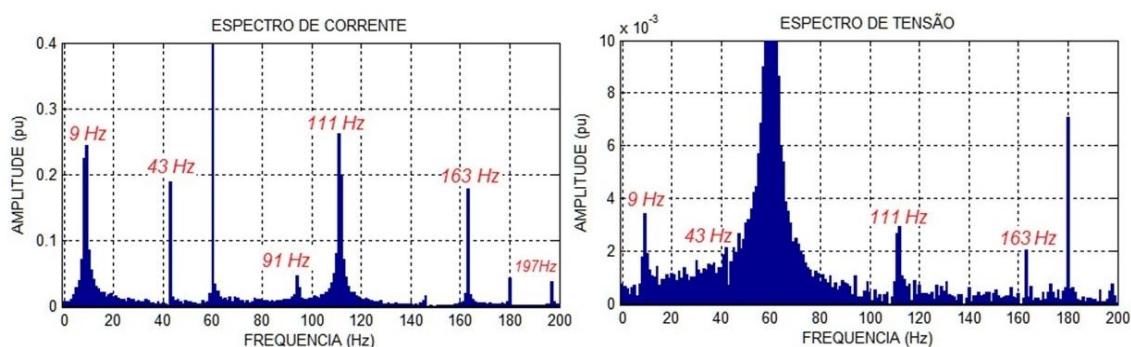
APÊNDICE - C

Espectros de frequência inter-harmônicas da corrente e tensão para diversas frequências de pulso obtidas experimentalmente

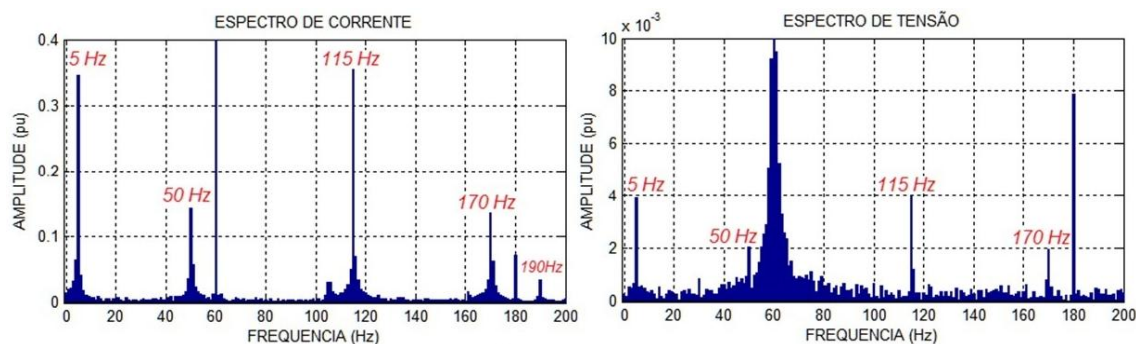
a) 45,5 Hz



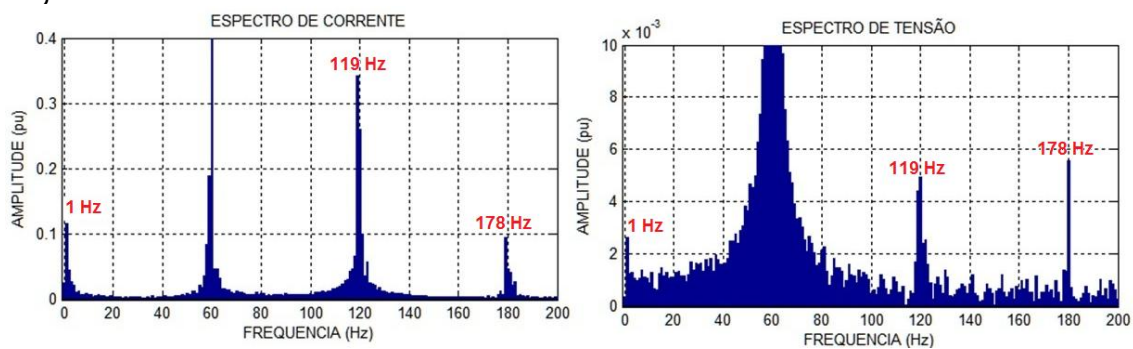
b) 51,8 Hz



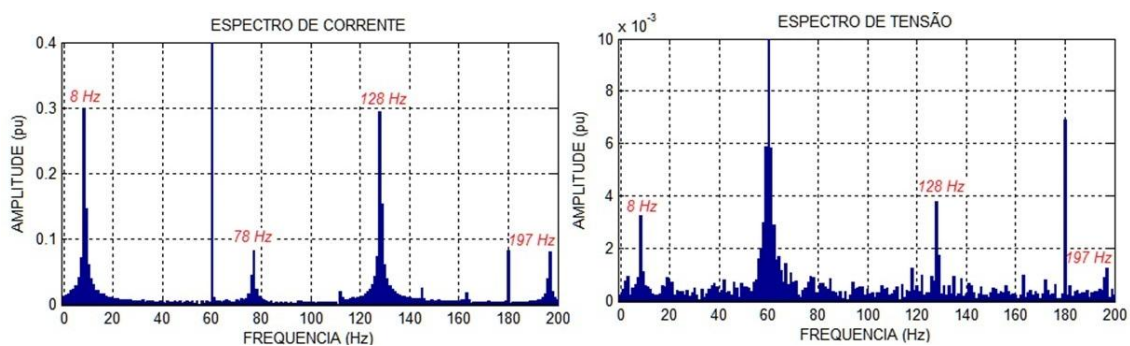
c) 55,6 Hz



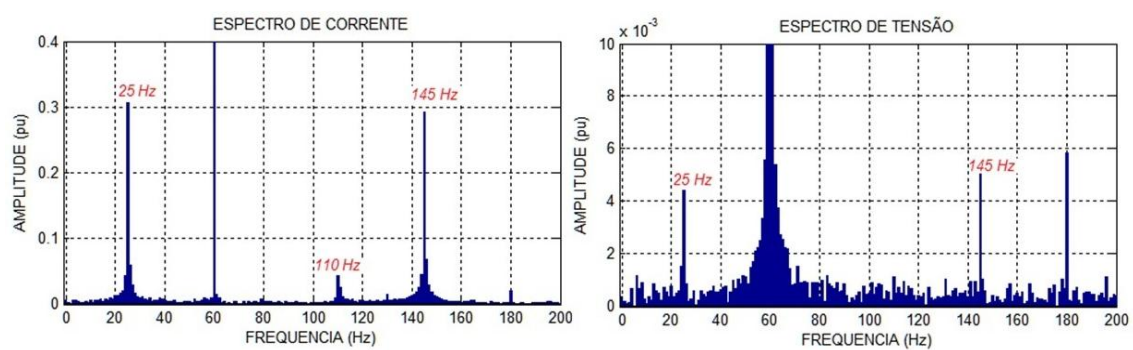
d) 59,9 Hz



e) 68,8 Hz



f) 86,2 Hz



APÊNDICE - D

Efeitos das Variações Paramétricas no Modelo de Simulação do Processo de Soldagem MIG/MAG

Em todas as simulações a seguir, são considerados os modos de transferência por curto-circuito com perturbações. São analisados os efeitos sobre a frequência de curto-circuito através das seguintes variações paramétricas: indutância, velocidade de alimentação do arame, DBCP e resistência total. Em todos os casos, os valores de referência adotados para a fonte de alimentação são: nível de curto-circuito de 30 MVA com uma relação X/R igual a 10. O outro valor de referência adotado é para o comprimento do cabo de alimentação (distância do quadro de distribuição até o ponto de conexão com a máquina de soldagem), sendo este de 100 metros.

D1. Efeito da Variação da Indutância sobre a Frequência de Curto-circuito

Neste caso são consideradas duas indutâncias distintas, ou seja, uma para o período de arco aberto e outra para o período de curto-circuito. Os valores das indutâncias (para arco aberto e curto-circuito) têm duas possíveis grandezas, a saber, uma com valor de referência e outra quatro vezes o valor de referência.

Desta forma, são analisados três casos: primeiramente considerando ambas indutâncias com mesmo valor de referência, outro caso considerando a indutância para o período de curto-circuito com o quádruplo do valor de referência e finalmente o ultimo caso onde a indutância para o período aberto tem o quádruplo do valor de referência.

As Figuras D1 mostram os oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco, comprimento do arco e a característica (*V versus I*) para os três casos de variação no valor das indutâncias.

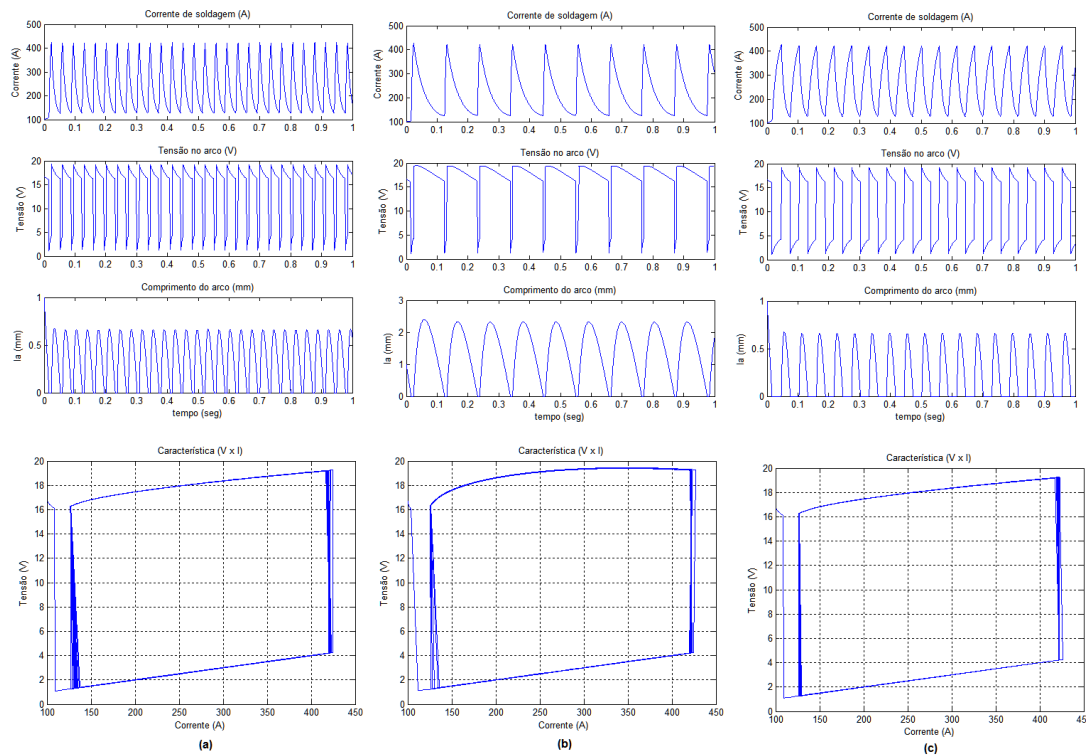


Figura D1 - Oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco e comprimento do arco e características (V versus I) no arco: a) mesmo valor da indutância para arco aberto e curto-circuito; b) indutância quadruplicada para o arco aberto; c) indutância quadruplicada para o curto-circuito

Na Figura D1(a), as indutâncias para o tempo de arco aberto e o tempo de curto-circuito são considerados iguais. Neste caso, tem-se que a frequência de curto-circuito é de 28 Hz. Na Figura D1(b), apenas a indutância estabelecida para o arco aberto foi quadruplicado em relação ao caso anterior. Assim sendo, a constante de tempo para o arco aberto é acrescida, aumentando-se o tempo de arco aberto (isto se dá devido a menor taxa de decrescimento da corrente) e reduzindo o número de curtos-circuitos. Verifica-se uma frequência de aproximadamente 10 Hz. Nota-se que neste caso, o comprimento do arco não ultrapassa a 3 mm, sendo que nos demais o valor supera a 5 mm. Observando a Fig. D1(c), em que apenas a indutância estabelecida para o curto-circuito foi quadruplicado em relação ao primeiro caso, a constante de tempo para o curto-circuito é acrescida, aumentando o tempo em curto-circuito, reduzindo o número de curtos-circuitos. Verifica-se que a taxa de crescimento da corrente no tempo de curto-circuito comparado à variação da indutância para o tempo de arco aberto tem menor influência no período de curto-circuito, ou seja, neste caso a frequência de curto-circuito foi de aproximadamente 17 Hz. Portanto, pode-se afirmar que a indutância tem maior influência no período de arco aberto do que no de curto-circuito.

D2. Efeito da Variação da Velocidade de Alimentação do Arame sobre a Frequência de Curto-circuito

Neste caso são considerados três valores distintos para a velocidade de alimentação do arame. A primeira tem o valor de referência, sendo as demais com redução e acréscimo de 30% em relação à referência.

A Figura D2 mostra os oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco, comprimento do arco e a característica (V versus I) para os três valores de velocidade de alimentação do arame. Neste caso a frequência de curto-circuito foi de 12 Hz. Na Figura D2(b), a velocidade de alimentação do arame é estabelecida como a referência, sendo que na Fig. D2(a) reduziu-se este valor em 30%, neste caso a frequência de curto-circuito reduziu para aproximadamente 10 Hz, tendo o maior comprimento de arco. Na Figura D2(c) a velocidade de alimentação do arame aumento em 30%, neste caso, a frequência de curto-circuito foi idêntica à encontrada para o acréscimo de 30% na velocidade de alimentação do arame, porém, comparativamente, o comprimento do arco tornou-se inferior. Mesmo com uma variação de 30% na velocidade de alimentação do arame, a variação na frequência de curto-circuito apresentou pequena influência, ou seja, apenas em torno de 2 Hz.

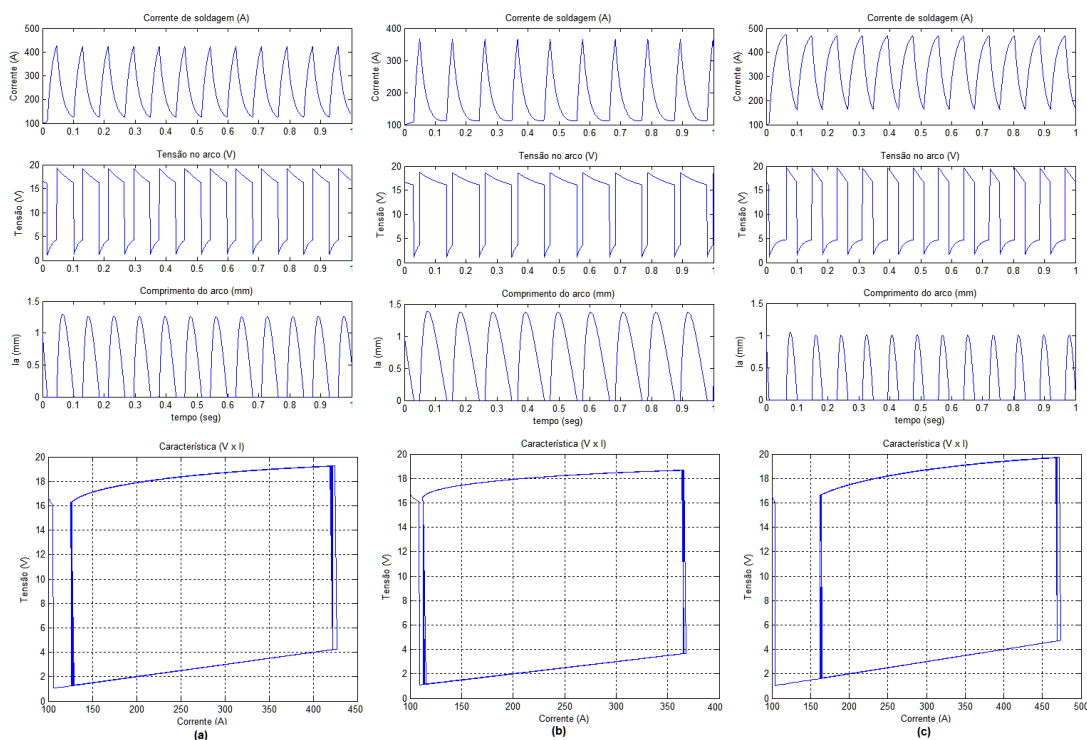


Figura D2 - Oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco e comprimento do arco e características (V versus I) no arco. a) velocidade de alimentação reduzida de 30%; b) velocidade de alimentação do arame de referência; c) velocidade de alimentação acrescida de 30%

Outras observações podem ser adquiridas, ou seja, com o aumento da velocidade de alimentação, a corrente máxima de soldagem torna-se superior e o comprimento do arco inferior aos demais. Pode-se observar que a frequência também aumenta, porém, deve se ressaltar que mantendo o crescimento da velocidade de alimentação do arame indefinidamente, a tendência é reduzir consideravelmente o comprimento do arco até a extinção do mesmo (enterrado na poça).

Já para o caso da menor velocidade de alimentação, o comprimento do arco e a corrente máxima de soldagem ficaram em patamares intermediários aos demais. Mantendo-se a redução da velocidade de alimentação do arame indefinidamente, a corrente de soldagem tende a reduzir e a tendência é aumentar consideravelmente o comprimento do arco até a extinção do mesmo (queimar o bico de contato).

Portanto, quando a velocidade de alimentação do arame sofre alteração, a corrente também varia no mesmo sentido, ou seja, aumentando a velocidade de alimentação do arame haverá o aumento na corrente de soldagem.

D3. Efeito da Variação da DBCP sobre a Frequência de Curto-circuito

A Figura D3 mostra os oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco, comprimento do arco e a característica (V versus I) para três valores de DBCP.

Na Figura D3(b), a DBCP é estabelecida como a referência (14 mm), neste caso a frequência de curto-circuito foi de 10 Hz. Na Figura D3(a), com uma redução na DBCP para 12 mm, a frequência de curto-circuito aumentou para 11 Hz. Para a Fig. D3(c), a DBCP foi acrescida para 16 mm, neste caso, a frequência de curto-circuito foi acrescida para 12 Hz. Em todos os casos, pode-se considerar que as frequências de curtos-circuitos são praticamente iguais, ou seja, mantendo as demais variáveis paramétricas constantes, para estas variações na DBCP não pode concluir uma influência considerável através desta variável.

Outras observações foram observadas, ou seja, aumentando da DBCP, a corrente máxima de soldagem tornou-se inferior e o comprimento do arco foi superior aos demais. Reduzindo a DBCP, o comprimento do arco também reduz. Quando todos os parâmetros são mantidos fixos, realizando apenas o acréscimo da DBCP (sem variar a taxa de fusão), leva-se à redução da corrente de soldagem, ao acréscimo no comprimento do arco, ao aumento do comprimento energizado do eletrodo e ao alargamento da faixa de tensão de curto-circuito estável (porém, esta faixa possui valores de tensão mais baixos). Assim sendo, para maiores valores de DBCP é necessário a utilização de tensões mais baixas para manter o processo operando de forma estável (SOUZA et al., 2011).

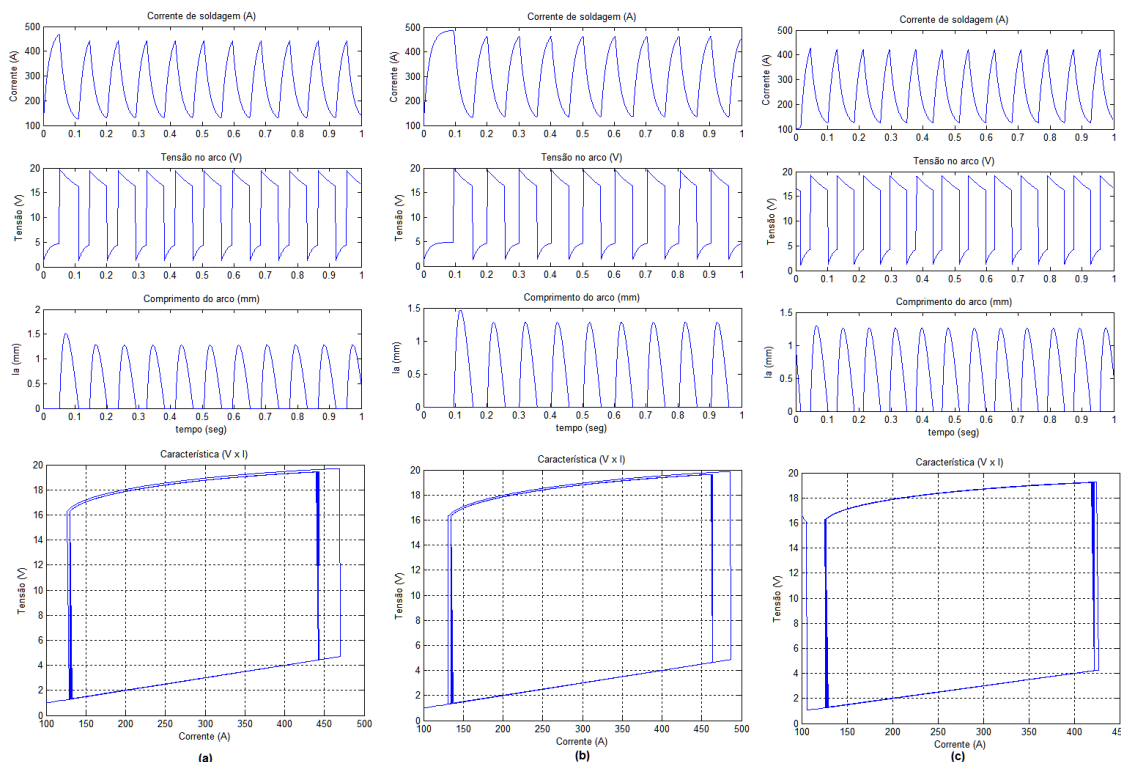


Figura D3 - Oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco e comprimento do arco e características (V versus I) no arco. a) DBCP=12 mm; b) DBCP=14 mm; c) DBCP=16 mm

D4. Efeito da Variação da Resistência Total sobre a Frequência de Curto-circuito

Neste caso são considerados três valores distintos para a resistência total. A Figura A4 mostra os oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco, comprimento do arco e a característica (V versus I) para os três valores de resistência total. Considerando a mudança nos valores da resistência total, tem-se que a constante de tempo e a corrente máxima de soldagem são alteradas.

Na Figura D4(b), a resistência total é estabelecida como a referência, neste caso, a frequência de curto-circuito foi de 12 Hz, tendo uma corrente máxima de aproximadamente 420 A e o comprimento de arco conservar-se em torno de 1,25 mm. Na Figura D4(a) a resistência total é reduzida em relação à da resistência de referência, neste caso, a frequência de curto-circuito reduziu para 7 Hz, a corrente máxima aproxima-se de 440 A e o comprimento de arco aumentou para 2,5 mm.

Na Figura D4(c) com a resistência total acrescida em relação à da resistência de referência, a frequência de curto-circuito manteve-se praticamente com o mesmo valor, ou seja, em torno de 12 Hz, porém, a corrente de soldagem reduz para aproximadamente 400 A e o comprimento do arco tornou-se inferior à 1 mm.

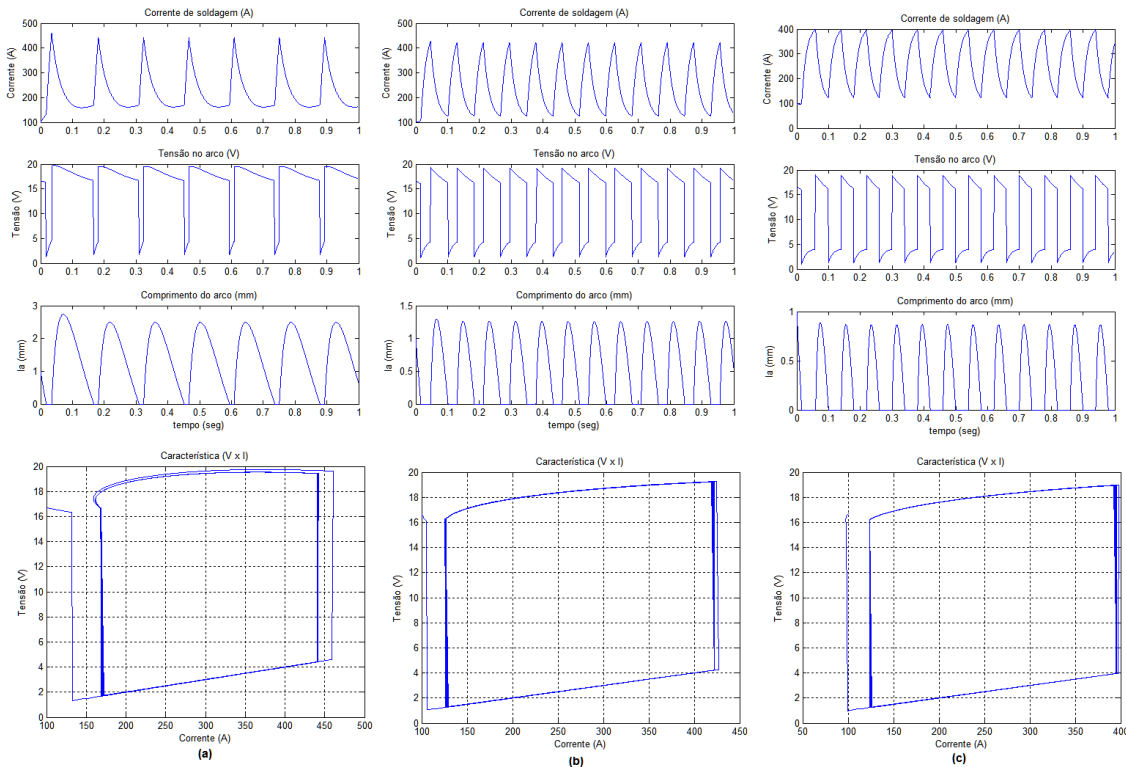


Figura D4 - Oscilogramas de corrente de soldagem, tensão no arco e comprimento do arco e características (V versus I) no arco. Variação da resistência total. a) resistência total inferior; b) resistência total de referência; c) resistência total superior

D5. Conclusões sobre as Variações Paramétricas em relação à Frequência de Curto-circuito

Através de todas as variações analisadas (indutância, velocidade de alimentação do arame, DBCP e resistência total), pode-se concluir que a indutância é a variável que maior influência causa sobre a frequência de curto-circuito. Dentre as demais variáveis analisadas, a redução na resistência total foi a outra variável que obteve consideráveis variações, reduzindo a frequência de curto-circuito. Com relação às variações estabelecidas em todas as simulações realizadas para cada variável, a DBCP e a velocidade de alimentação do arame foram as que menos influências causaram com relação à frequência de curto-circuito.

APÊNDICE - E

Simulação da Máquina Trabalhando com o Modo de Transferência MIG Pulsado Modificado

Wang; Huang; Zhang (2004) propuseram uma nova tecnologia de controle para o processo MIG pulsado para garantir uma gota por pulso (UGPP), evitando o destacamento acidental de gotas. A Figura E1 ilustra os oscilogramas das correntes de soldagem para o MIG pulsado convencional e para o MIG modificado por estes autores.

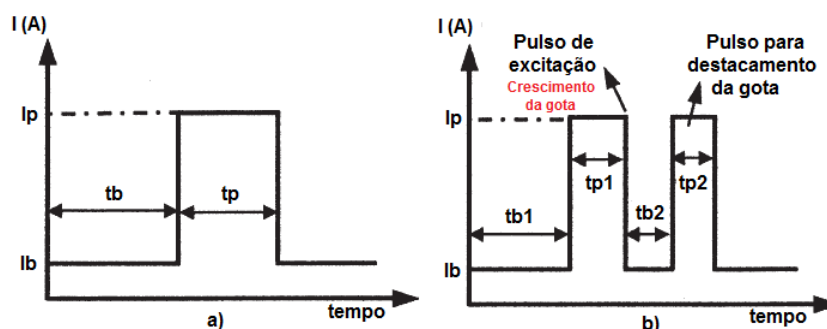


Figura E1 - Oscilogramas da corrente para o MIG pulsado: a) MIG pulsado convencional; b) MIG pulsado modificado por Wang; Huang; Zhang (2004)

No MIG pulsado convencional (a) a gota é destacada principalmente pela componente eletromagnética das forças atuantes sobre a gota em formação, devido a um alto valor de corrente induzido durante o pulso. Neste caso é necessária uma corrente de pulso (I_p) acima da corrente de transição, o que frequentemente pode trazer separação acidental, provocando múltiplas gotas por pulso (MGPP) se os valores da corrente de pulso (I_p) e do tempo de pulso (t_p) não forem devidamente regulados.

No MIG pulsado modificado por Wang; Huang; Zhang (b) existe uma repartição do ciclo de pulso, sendo o mesmo constituído por dois pulsos de corrente, um para crescimento e excitação da gota e o outro de destacamento da gota. Uma corrente de pulso (I_p) é aplicada até o final do período de crescimento da gota (t_{p1}), quando a corrente é comutada para o nível de base (I_b). Neste momento, é imposta à gota uma alteração súbita na força eletromagnética. Como resultado, é introduzida uma oscilação da gota. Depois de um segundo período de base (t_{b2}), é aplicado a segunda corrente de pulso (I_p), a fim de realizar o destacamento da gota.

Esta nova forma de controle da corrente de soldagem para o MIG pulsado elimina a necessidade de uma corrente mais elevada para separar a gota. Assim sendo, a corrente de pulso pode ser até um pouco menor do que a corrente de transição.

As Equações E1 a E4 representam a quantificação do formato de onda do MIG modificado.

$$t_b = t_{b1} + t_{b2} \quad (\text{E.1})$$

$$t_p = t_{p1} + t_{p2} \quad (\text{E.2})$$

$$t = t_b + t_p = 1/f_p \quad (\text{E.3})$$

$$I_m = \frac{I_b \cdot t_{b1} + I_b \cdot t_{b2} + I_{p1} \cdot t_p + I_{p2} \cdot t_p}{t_b + t_p} \quad (\text{E.4})$$

Devido a esta dupla pulsação do MIG Modificado, pode-se esperar um efeito maior deste processo sobre a QEE, justificando se fazer uma simulação desta nova versão de processo de forma comparativa ao MIG pulsado convencional. Assim, uma simulação, conforme apresentado no capítulo VI, foi realizada para o MIG pulsado modificado. Os parâmetros de simulação e o valor do P_{st} determinado, estão na Tabela E1. Verifica-se uma frequência de pulso de 33,33 Hz. Na simulação do MIG pulsado convencional, com frequência de pulso de 34,5 Hz, o valor determinado P_{st} foi de 0,114 pu, enquanto que para o MIG modificado o valor do P_{st} foi superior, ou seja, 0,165 pu.

Tabela E1 - Parâmetros utilizados na simulação do MIG pulsado modificado e o respectivo valor do P_{st} determinado.

Parâmetros	Valores
I_b (A)	50
I_p (A)	300
t_{b1} (ms)	15
t_{b2} (ms)	4
t_{p1} (ms)	6
t_{p2} (ms)	5
I_m (A)	141,6
f_{cc} (Hz)	33,33
P_{st} (pu)	0,165

A Figura E2 mostra os oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e da entrada primária da máquina de soldagem, bem como as curvas característica (*V versus I*) da entrada primária da máquina de soldagem, os espectros de frequência da corrente e tensão da entrada primária da máquina de soldagem e a sensação instantânea de *flicker*.

É importante ressaltar que a afirmação de um maior valor do P_{st} corresponde apenas a estes caso comparativo. Não foram analisados outros casos com frequências semelhantes, pois o maior propósito foi o de confirmar a viabilidade do programa em se permitir incrementar novos modos de transferência metálica.

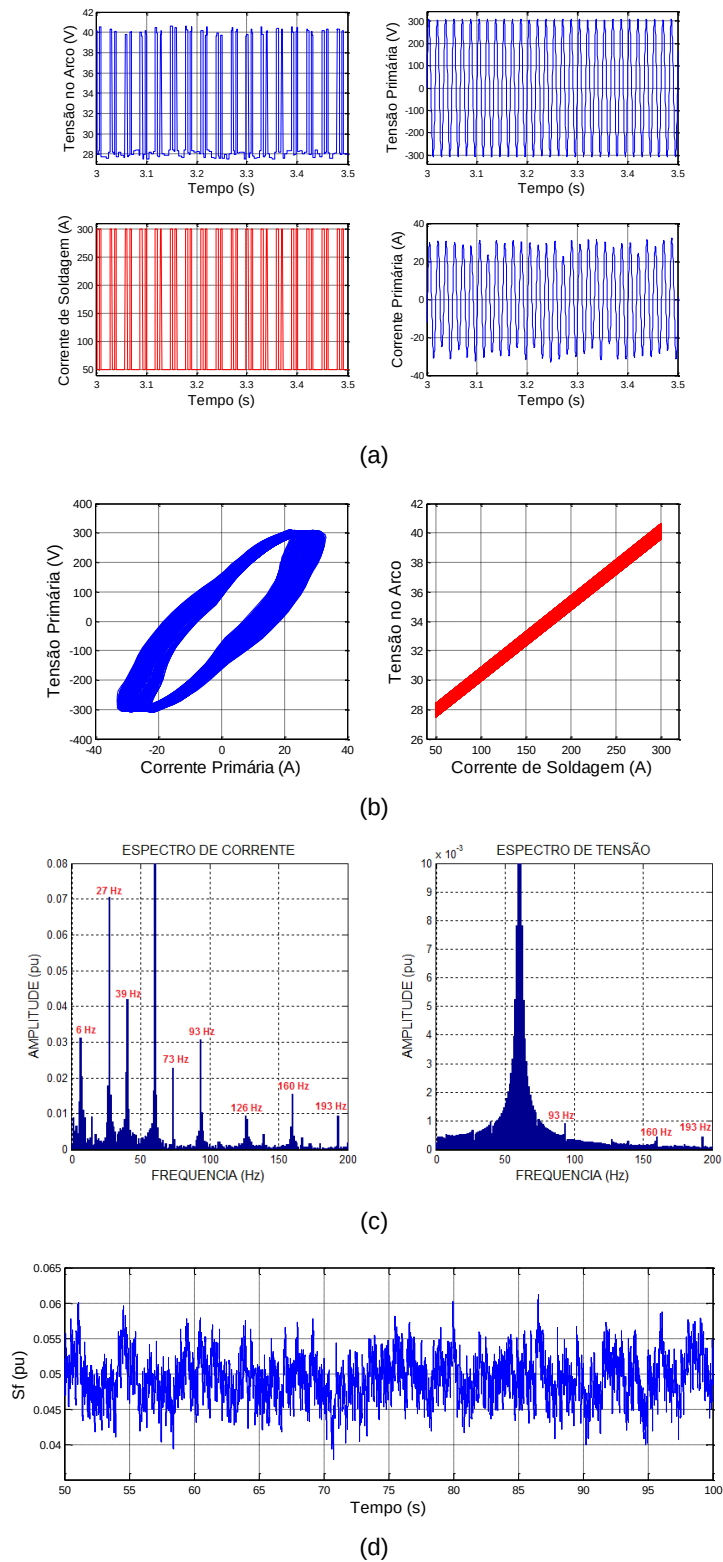


Figura E2 - Simulação do processo MIG Pulsado modificado, com $f_p = 33,33$ Hz: a) oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e da entrada primária da máquina de soldagem; b) curvas característica (V versus I) da entrada primária da máquina de soldagem; c) espectros de frequência da corrente e tensão da entrada primária da máquina de soldagem; e d) sensação instantânea de flicker

APÊNDICE - F

Simulação de Duas Máquinas MIG/MAG Trabalhando com Modo de Transferência por Curto-Circuito sem Perturbação com Diferentes Frequências de Curto-Circuito

A Figura C1 ilustra a arquitetura do programa de simulação para duas máquinas com modo de transferência por curto-circuito sem perturbação. O valor da indutância total é alterado para que uma máquina tenha a frequência de curto-circuito de 55 Hz e a outra de 115 Hz.

As chaves C1 e C2 são configuradas para simular o acionamento das máquinas de soldagem. A chave C1 ativa a máquina de soldagem com frequência de curto-circuito de 55 Hz, ligando em 0,4 segundos e desligando em 7 segundos. A chave C2 ativa a máquina de soldagem com frequência de curto-circuito de 115 Hz, ligando em 4 segundos e desligando em 10 segundos.

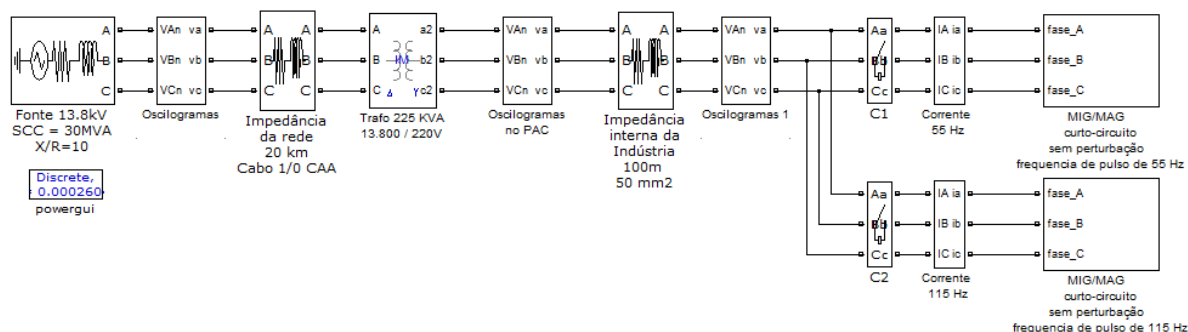


Figura C1 - Arquitetura do programa de simulação para duas máquinas com modo de transferência por curto-circuito sem perturbação (f_{cc} de 55 Hz e 115 Hz)

Desta forma, nota-se que as duas máquinas estão ligadas entre 4 e 7 segundos. A Figura C2 mostra o oscilograma das correntes produzidas pelas duas máquinas de soldagem, obtidas no PAC.

Nota-se uma grande semelhança entre as frequências de modulação no intervalo de apenas 55 Hz e de 115 Hz. Para a frequência de curto-circuito de 55 Hz, a frequência de modulação determinada é de 5 Hz, sendo a frequência harmônica mais próxima a de 60 Hz. Para a frequência de curto-circuito de 115 Hz, a frequência de modulação determinada também é de 5 Hz, mas neste caso, a frequência harmônica mais próxima é a de 120 Hz.

Portanto, este exemplo comprova que a frequência de modulação de 5 Hz para os dois casos está relacionada com as frequências inter-harmônicas (f_{cc} de 55 Hz e 115 Hz) e a frequência harmônica mais próxima destas.

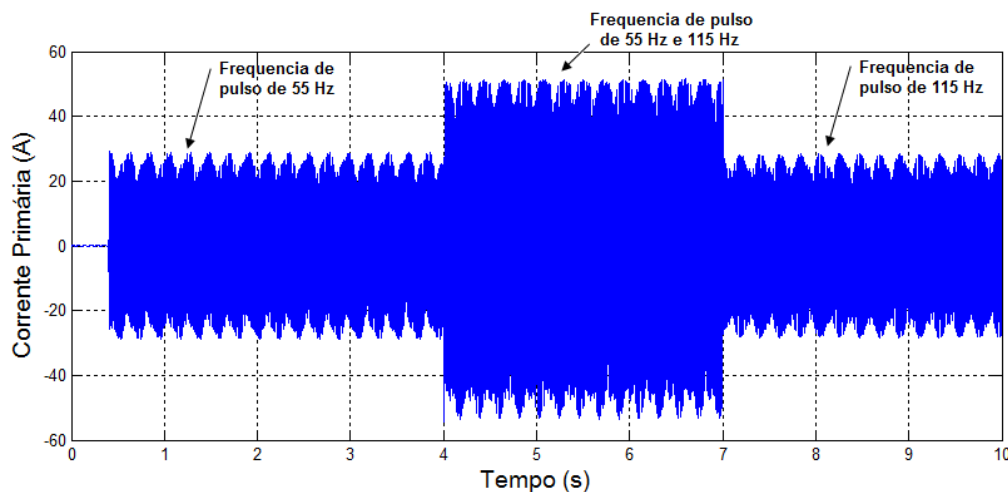
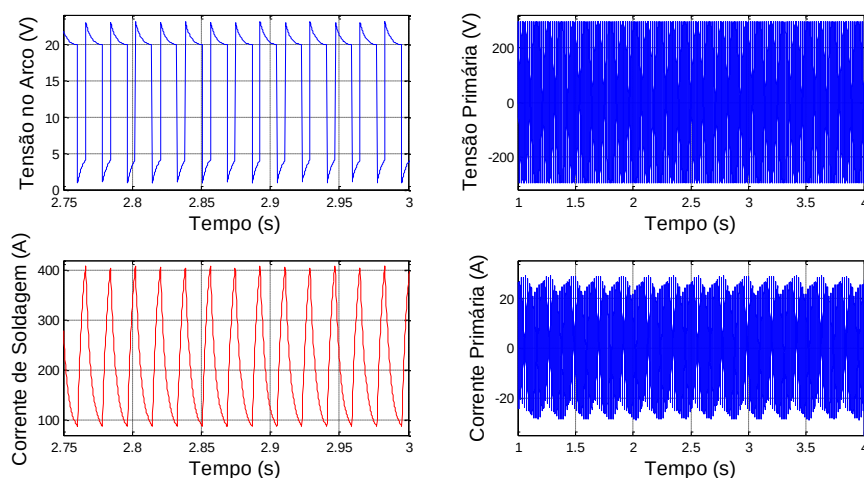
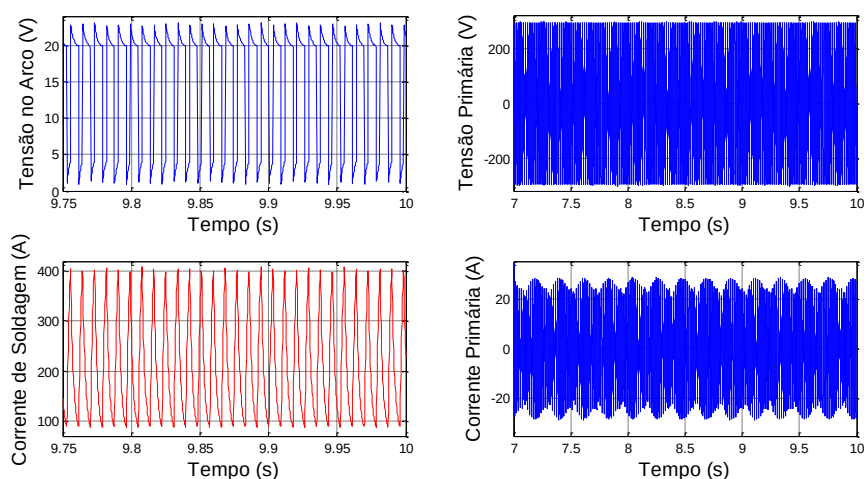


Figura C2 - Oscilograma da corrente de entrada para as duas máquinas, obtidas no PAC

A Figura C3 apresenta os oscilogramas da tensão e corrente no arco de soldagem e no primário da máquina de soldagem para a frequência de curto-circuito de 55 Hz (a) e de 115 Hz (b). Nos dois casos, as tensões no arco e as correntes de soldagem são completamente diferentes enquanto que as correntes de entrada para cada uma das máquinas de soldagem praticamente mantém as mesmas aparências.



(a)

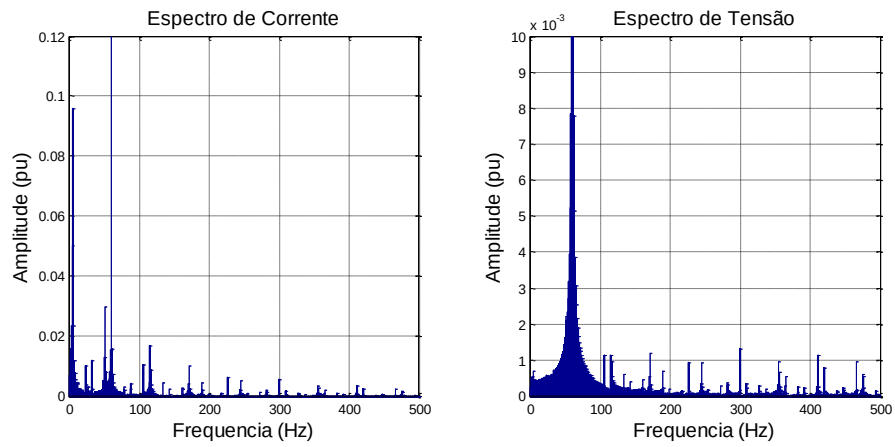


(b)

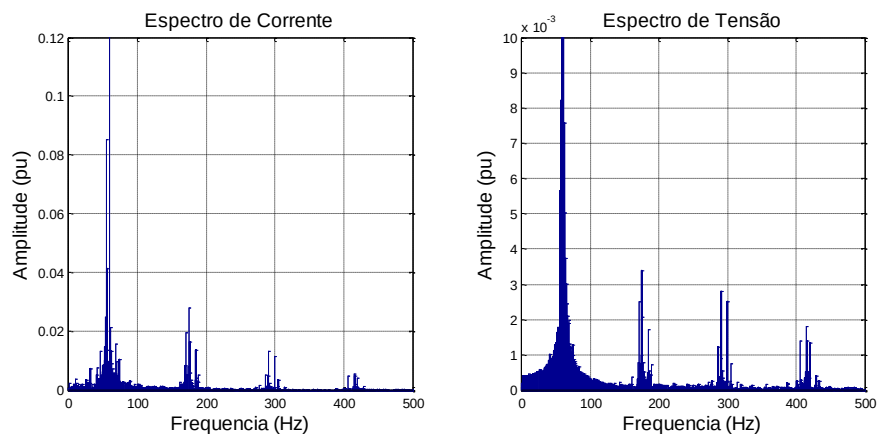
Figura C3 - Oscilogramas da tensão e corrente no arco de soldagem e da tensão e corrente no primário da máquina de soldagem: a) f_{cc} de 55 Hz; b) f_{cc} de 115 Hz

Na Figura C4 são apresentados os espectros da corrente e tensão de entrada da máquina de soldagem com a frequência de curto-circuito de 55 Hz (a) e de 115 Hz (b). A Figura C4(c) mostra os espectros da corrente e tensão de entrada para as duas máquina em pleno funcionamento, obtidos por 1 segundo (resolução de 1 Hz), entre o intervalo de 4 a 7 segundos.

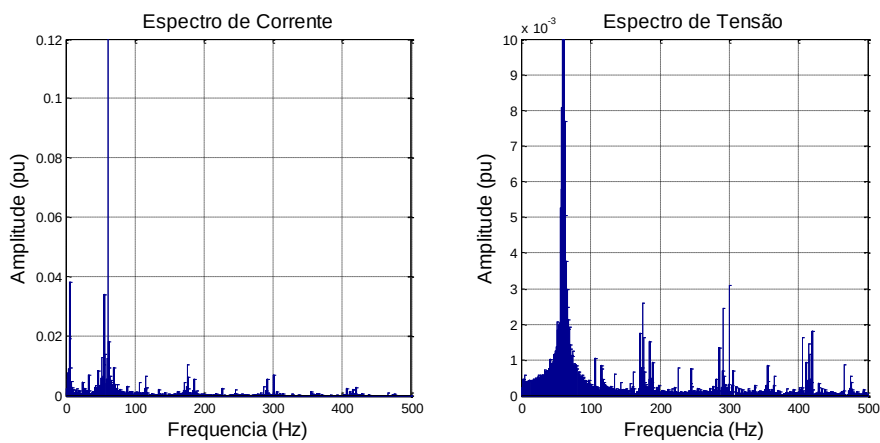
Observando as figuras, nota-se que mesmo tendo a mesma frequência de modulação de 5 Hz, os espectros de frequência inter-harmônicas nos dois casos (f_{cc} de 55 Hz e 115 Hz) são diferenciados.



(a)



(b)



(c)

Figura C4 - Espectros da corrente e tensão de entrada da máquina: a) - f_{cc} de 55 Hz; b) f_{cc} de 115 Hz; e c) duas máquina ligadas

APÊNDICE - G

Simulação de Três Máquinas MIG/MAG Trabalhando com Modos de Transferência MIG Pulsado ($f_p=68,8$ Hz), por Curto-Circuito com Perturbação e Globular

A Figura F1 ilustra a arquitetura do programa de simulação para três máquinas com modo de transferência MIG pulsado ($f_p = 68,8$ Hz), por curto-circuito com perturbação e globular. As chaves C1, C2 e C3 são configuradas para serem acionadas nos tempos determinados. Estas chaves acionam a máquina MIG pulsado, por curto-circuito e globular, respectivamente. As chaves são configuradas da seguinte maneira: o primeiro valor significa o tempo de acionamento ON e o segundo o acionamento OFF e assim sucessivamente.

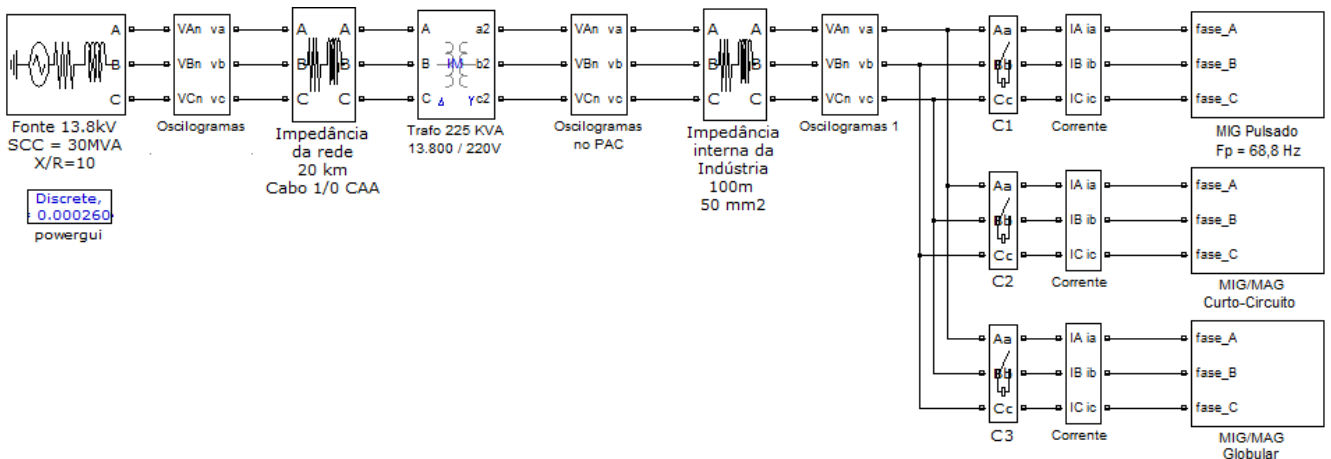


Figura F1 - Arquitetura do programa de simulação para três máquinas com modo de transferência MIG pulsado ($f_p = 68,8\text{Hz}$), por curto-circuito e globular

Com este programa foi possível rodar um exemplo com apenas 8 segundos de simulação.

- $C1 = [0,4/1 \ 6/1]$
- $C2 = [2/1 \ 8/1]$
- $C3 = [5/1 \ 8/1]$

A Figura D2(a) mostra o oscilograma da corrente primária (entrada da máquina) durante o período que cada máquina ia sendo acionada, enquanto a Fig. F2(b) mostra os oscilogramas das correntes primárias de cada uma das três máquinas. Percebe-se que entre 0,4 a 2 s apenas a máquina MIG pulsado está ativa, e que entre 2 a 5 s já estão ligadas as máquinas MIG Pulsado e curto-circuito, tendo as 3 acionadas entre 5 e 6 s e somente as máquinas com transferência por curto-circuito e globular estão ligadas entre 6 e 8 s.

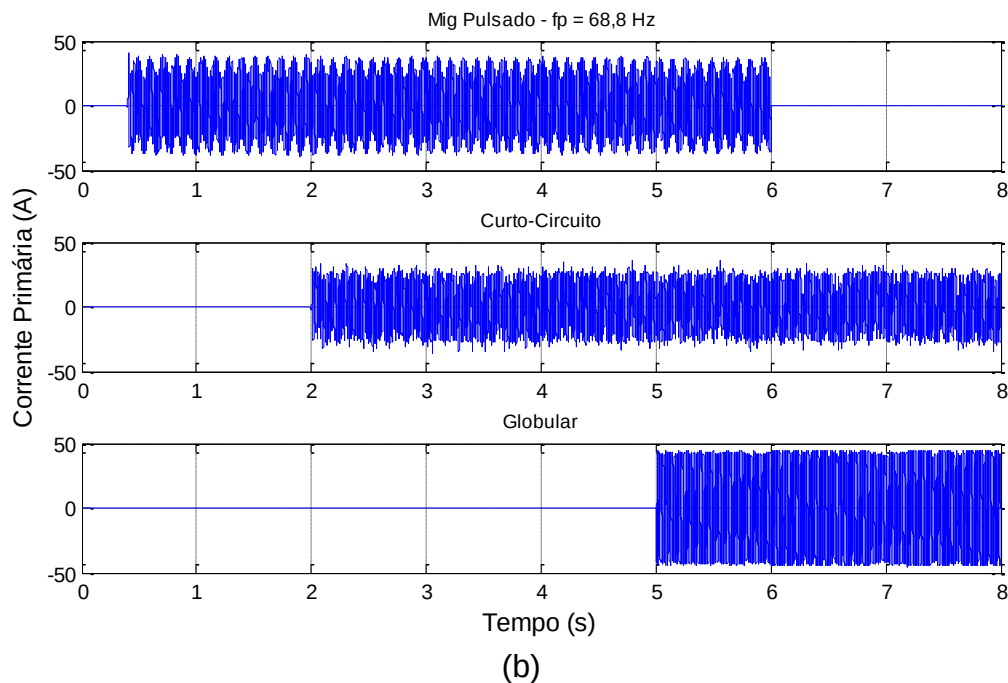
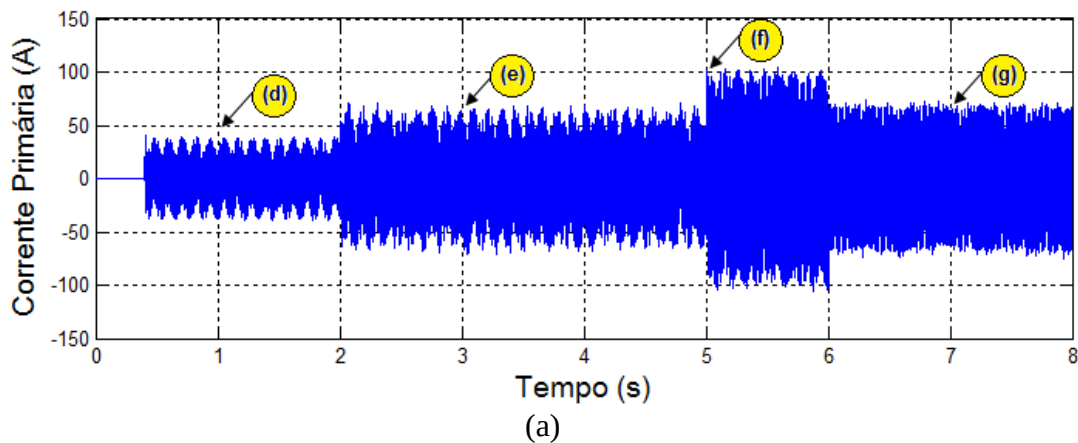


Figura F2 – (a) Oscilograma das correntes instantâneas de entrada durante a operação das três máquinas, medida no PAC; (b) Oscilograma separados para cada uma das correntes instantâneas de entrada das três máquinas obtidas no PAC

A Figuras F3 mostram os espectros de frequências inter-harmônicas das correntes e tensões na entrada comum das máquinas (PAC), obtidos em intervalos de 1 s (resolução de 1 Hz), a partir dos tempos de 1, 3, 5 e 7 s, respectivamente.

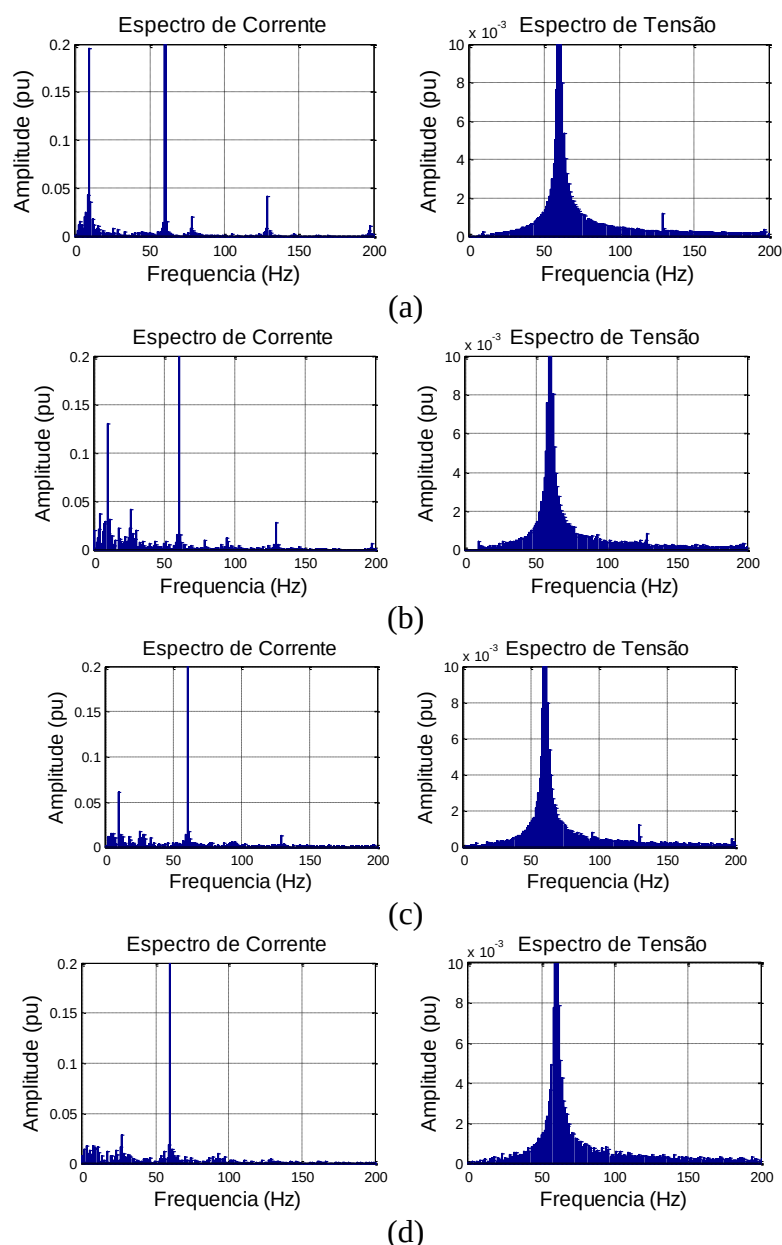


Figura F3 -; Espectro de frequência inter-harmônicas das correntes e tensões na entrada no PAC (resolução de 1 Hz), obtidos nos intervalos de: a) 1 s; b) 3 s; c) 5 s; d) 7 s

Um outro exemplo é apresentado com novos intervalos de acionamento, sendo neste caso, com 14 segundos de simulação.

- $C1 = [0,4/1 \ 8/1 \ 10/1]$
- $C2 = [3/1 \ 12/1]$

- $C3 = [5/1]$

A Figura F4 mostra o oscilograma da corrente primária (entrada comum das máquinas) para as três máquinas de soldagem e em cada uma das máquinas com o seu respectivo modo de transferência.

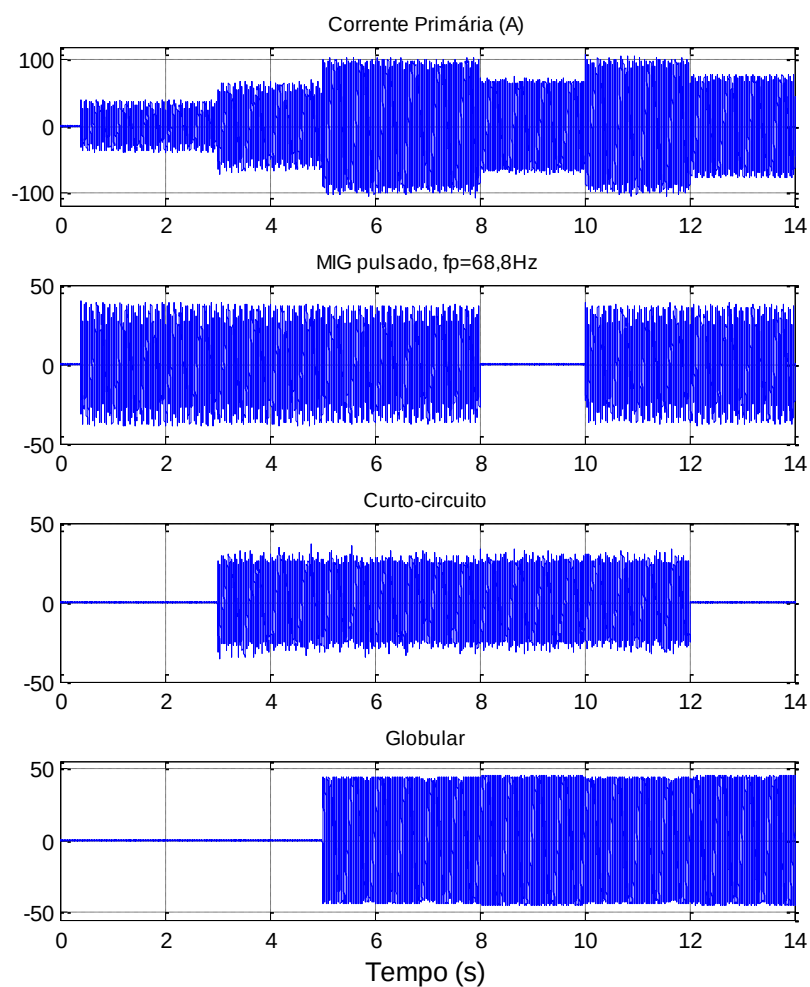


Figura F4 - Oscilograma das correntes instantâneas primárias obtidas no PAC (vista superior) e na entrada individual de cada máquina com o seu respectivo modos de transferência metálica (vistas sequenciais)

A Figura F5 mostra os oscilogramas da corrente RMS, tensão RMS e a potência solicitada pelas três máquinas de soldagem.

Estes exemplos têm a finalidade de apresentar alguns sinais que ao longo do trabalho não foram apresentados, tais como os sinais das correntes instantâneas individualizadas e em conjunto (no PAC), a corrente eficaz, a tensão eficaz e a potência ativa solicitada pelas três máquinas de soldagem. Outros sinais que não foram apresentados nestes exemplos

podem ser obtidos. O usuário tem a possibilidade de obter os sinais de tensão e corrente em qualquer ponto de conexão. Nestes exemplos foram apresentadas as formas de inserir os intervalos de tempos em cada uma das chaves que acionam as máquinas de soldagem.

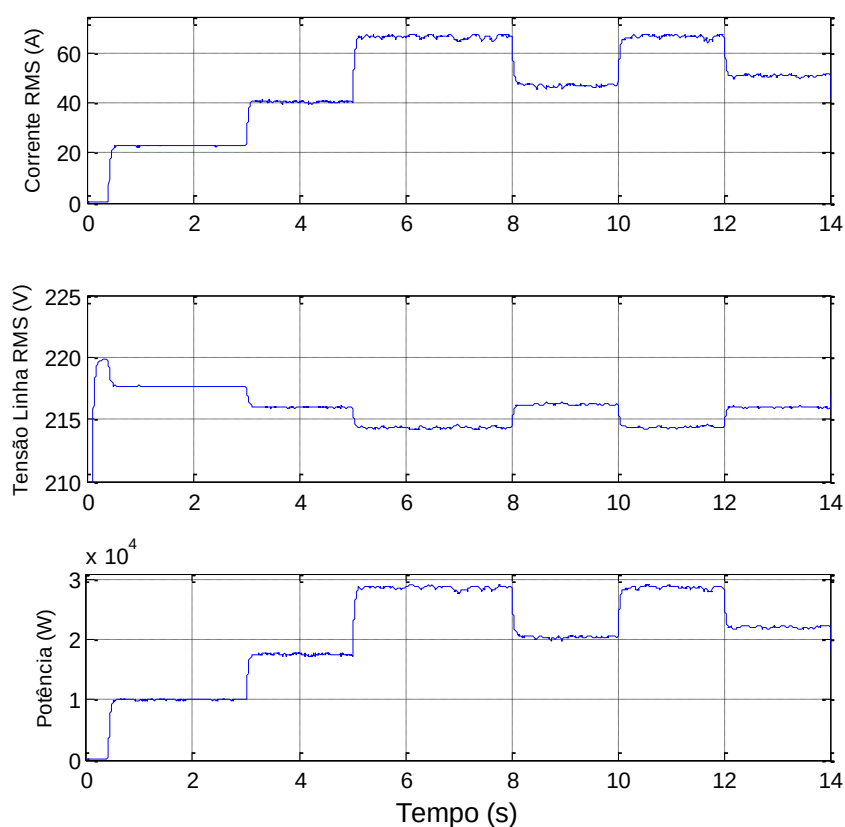


Figura F5 - Oscilogramas da corrente RMS, tensão RMS e potência solicitada pelas três máquinas de soldagem

APÊNDICE - H

Simulação de Cargas Resistivas e Máquinas de Soldagem

Este apêndice apresenta uma simulação que tem a finalidade de mostrar que apenas queda de tensão (redução no valor da tensão no ponto de alimentação devido à carga na rede), sem a presença conjunta de flutuação da tensão, não é condição suficiente para alterar significativamente os valores de S_f e P_{st} .

A Figura F1 ilustra a arquitetura do programa de simulação para duas máquinas e duas carga resistivas (5 e 10 kW).

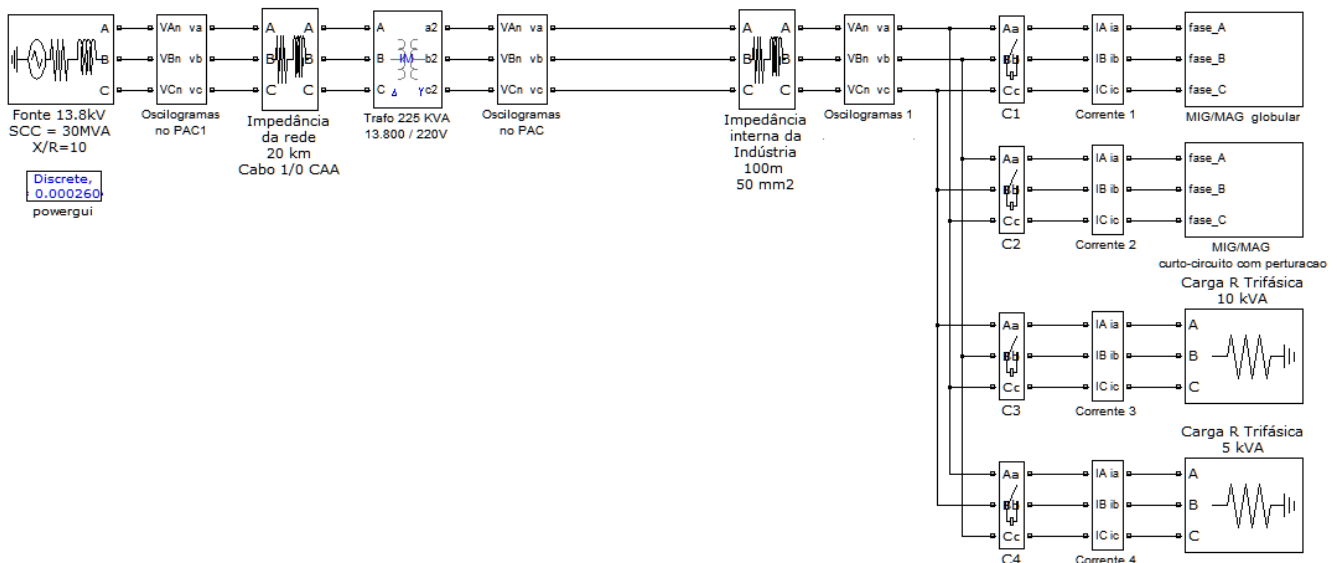


Figura F1 - Arquitetura do programa de simulação para duas cargas resistivas e duas máquinas, uma trabalhando no modo de transferência por curto-circuito com perturbação e a outra no modo globular

O exemplo simulado tem um período de apenas 25 segundos, em cujo tempo existem situações com várias combinações de cargas (máquina de soldagem e cargas resistivas). Para cada combinação de cargas são observados os sinais da corrente e tensão no PAC e determinados os valores do P_{st} correspondentes a cada intervalo. As chaves C1,

C2, C3 e C4 ativam a máquina com modo de transferência globular, a máquina com modo de transferência por curto-circuito (com perturbação), a carga resistiva de 10 kW e a carga resistiva de 5 kW, respectivamente.

A Figura F2 mostra o oscilograma da corrente instantânea no PAC durante o período que cada máquina e cada carga resistiva iam sendo acionadas. São apresentados cinco intervalos de tempo, onde em cada intervalo existe uma combinação de cargas (máquina de soldagem ou carga resistiva). Observa-se que no intervalo de 0,4 a 5 segundos, apenas a máquina trabalhando no modo de transferência globular está em funcionamento. No intervalo de 5 a 10 segundos, apenas as duas máquinas de soldagem estão em funcionamento. Entre 10 a 15 segundos, a máquina com modo de transferência por curto-circuito e a carga resistiva de 10 kW estão em ligadas. No intervalo de 15 a 20 segundos, apenas a carga resistiva de 10 kW está ligada e, finalmente, após os 20 segundos de simulação, apenas as duas cargas resistivas estão ligadas.

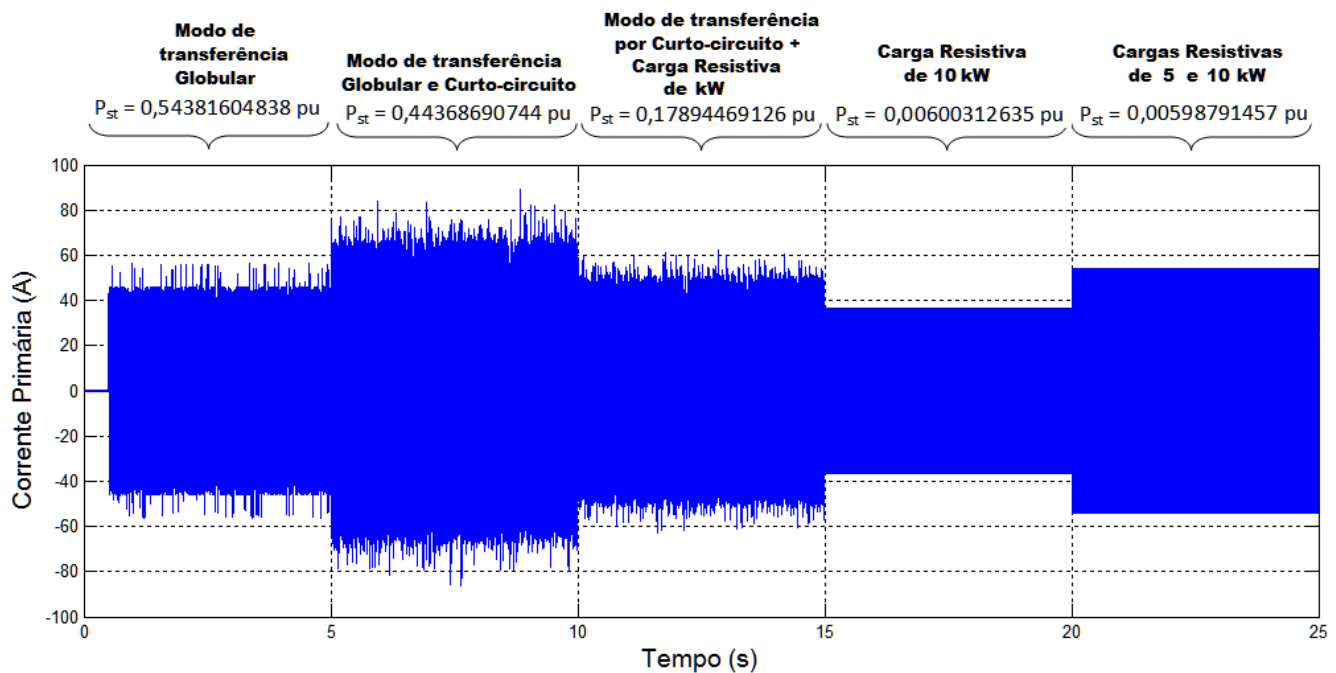


Figura F2 - Oscilograma da corrente de entrada para as duas máquinas e as duas cargas resistivas, obtidas no PAC, com os intervalos das combinações de cargas e os respectivos valores dos P_{st}

Como para se calcular os valores do P_{st} é necessário um intervalo de 10 minutos, em cada intervalo de combinação de cargas o sinal da tensão de entrada de aproximadamente 5 segundos foi replicado até se completar o período desejado (10 minutos). Assim procedendo, os valores do P_{st} determinados foram de 0,548 pu, 0,443 pu, 0,178 pu, 0,006 pu e 0,0065 pu.

Verifica-se que nos instantes onde existe uma queda de tensão sem a presença de uma flutuação da tensão (momentos onde apenas cargas resistivas estão ligadas), o valor do P_{st} torna-se bastante reduzido, ou seja, praticamente nulo. Assim sendo, nota-se que a queda de tensão simplesmente não está relacionada diretamente com o valor do P_{st} , ou seja, mesmo existindo uma queda de tensão mas sem a presença de qualquer flutuação de tensão (amplitudes e frequência inter-harmônicas presentes no sinal da tensão), a S_f e o P_{st} são bastante reduzidos.

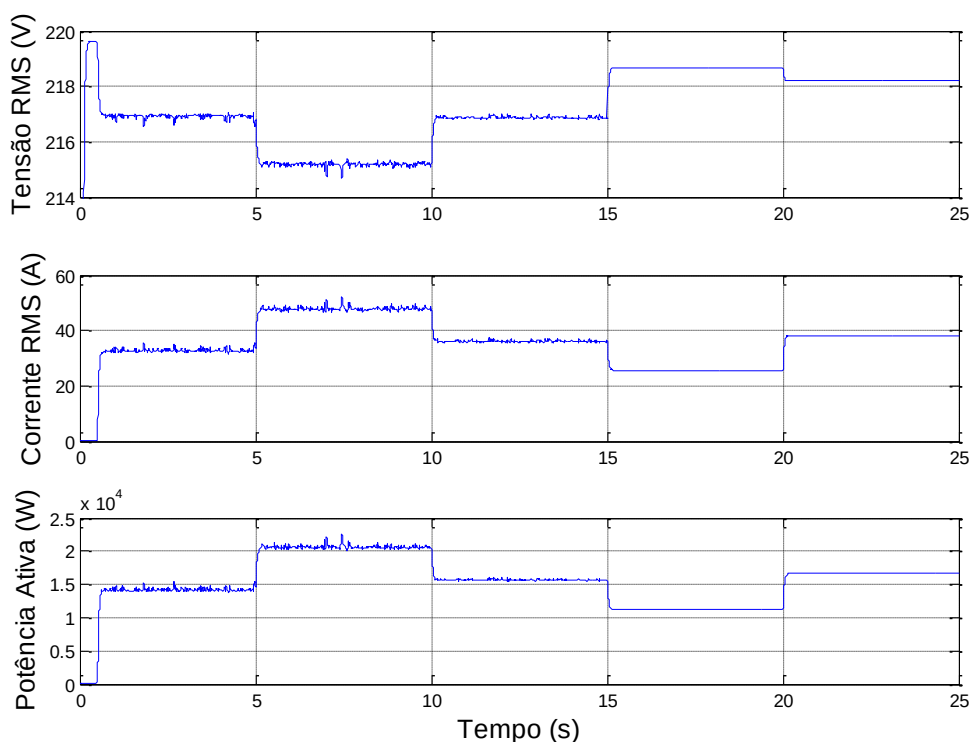


Figura F3 - Oscilogramas da corrente RMS, tensão RMS e potência solicitada pelas duas máquinas de soldagem e as duas cargas resistivas

Como para se calcular os valores do P_{st} é necessário um intervalo de 10 minutos, em cada intervalo de combinação de cargas o sinal da tensão de entrada de aproximadamente 5 segundos foi replicado até se completar o período desejado (10 minutos). Assim procedendo, os valores do P_{st} determinados foram de 0,548 pu, 0,443 pu, 0,178 pu, 0,006 pu e 0,0065 pu.

Verifica-se que nos instantes onde existe uma queda de tensão sem a presença de uma flutuação da tensão (momentos onde apenas cargas resistivas estão ligadas), o valor do P_{st} torna-se bastante reduzido, ou seja, praticamente nulo. Assim sendo, nota-se que a queda de tensão simplesmente não está relacionada diretamente com o valor do P_{st} , ou seja, mesmo existindo uma queda de tensão mas sem a presença de qualquer flutuação de

tensão (amplitudes e frequência inter-harmônicas presentes no sinal da tensão), a S_f e o P_{st} são bastante reduzidos.

Portanto, uma maior queda de tensão não reflete diretamente em uma maior S_f e, por sua vez, em um maior valor para o P_{st} . Com isto, pode-se explicar que variando-se os níveis de curto-circuito da fonte (menor impedância até o PAC), aumentando a relação X/R (aumentando a impedância até o PAC), e os comprimentos dos cabos, as relações das variações das impedâncias não são diretas com o valor do P_{st} .