



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

KAYSE DOS SANTOS MARTEL JÚNIOR

**AUTOMAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES DE MÉDIA TENSÃO
EM PLANTA INDUSTRIAL**

TUCURUÍ

2026

KAYSE DOS SANTOS MARTEL JÚNIOR

**AUTOMAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES DE MÉDIA TENSÃO
EM PLANTA INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Prof. Dr. Éwerton Ramos Granhen.

TUCURUÍ

2026

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

D722a dos Santos Martel Júnior, Kayse.
Automação de banco de capacitores de média tensão em planta industrial / Kayse dos Santos Martel Júnior. — 2026.
128 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Elétrica, Tucuruí, 2026.

1. Automação. 2. Banco de capacitores. 3. Fator de
potência. 4. CLP. 5. Média tensão. I. Título.

CDD 621.3126



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) Nº 1 / 2026 - CTUCU (11.16)

Nº do Protocolo: 23073.015416/2026-11

Tucuruí-PA, 01 de março de 2026.

TÍTULO:

AUTOMAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES DE MÉDIA TENSÃO EM PLANTA INDUSTRIAL

DISCENTE: KAYSE DOS SANTOS MARTEL JÚNIOR

MATRÍCULA: 201633940041

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	<i>Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen, FEE/CAMTUC/UFPA</i>	Orientador
2	<i>Prof. Dr. Jefferson Souza Costa, FEE/CAMTUC/UFPA</i>	Membro
3	<i>Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira, FEE/CAMTUC/UFPA</i>	Membro
4	<i>Eng. Sérgio Augusto Gonçalves, Artemyn Minerals</i>	Membro Externo

Data da Defesa: 27/02/2026	Hora Início: 09:00	Hora Término: 09:43
---------------------------------------	---------------------------	----------------------------

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Formatação	9,0	9,0	9,5	9,5
Linguagem (gramática e semântica)	9,0	9,0	9,5	9,0
Conteúdo técnico	10,0	10,0	10,0	10,0

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Sequência lógica de apresentação	9,5	9,0	9,5	9,5
Administração do tempo	9,5	10,0	9,5	10,0
Expressão oral	10,0	10,0	10,0	9,5
Domínio do tema	10,0	10,0	10,0	10,0

Média por examinador	9,6	9,6	9,7	9,6
Média Final	9,6			
Conceito Final	EXCELENTE			

(Assinado digitalmente em 02/03/2026 18:08)

DAVI CARVALHO MOREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###718#2

(Assinado digitalmente em 01/03/2026 23:48)

EWERTON RAMOS GRANHEN
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###081#9

(Assinado digitalmente em 02/03/2026 18:09)

JEFFERSON SOUZA COSTA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###644#1

Documento assinado digitalmente
gov.br SERGIO AUGUSTO GONCALVES AMARAL
Data: 06/03/2026 10:02:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Visualize o documento original em <https://sipac.ufpa.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **1**, ano: **2026**, tipo: **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)**, data de emissão: **01/03/2026** e o código de verificação: **44a75e1861**

Dedico este trabalho aos meus pais, minha
irmã, meus irmãos, minha esposa e minha
filha.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido saúde, força e perseverança para concluir esta importante etapa da minha vida. Em todos os momentos de dificuldade, foi Ele quem me sustentou e guiou meus passos até aqui.

Aos meus pais, Kayse Martel e Aldilena Moraes, deixo minha eterna gratidão por todo o apoio, incentivo e ensinamentos ao longo da minha vida. Mesmo diante das dificuldades, nunca deixaram de acreditar na importância do estudo como caminho para a transformação. Aos meus irmãos, Thaynara, Witor e Kevyn, agradeço pelo carinho, compreensão e apoio incondicional. Agradeço também a toda a minha família e aos amigos.

À minha esposa, Nayandra, agradeço profundamente pela paciência, companheirismo e amor em todos os momentos. À minha filha Aurora, que ainda irá nascer, deixo registrado que este trabalho também é por você, como símbolo de esforço, esperança e futuro.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ewerton, agradeço pela paciência, dedicação e valiosas orientações ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Em especial, agradeço ao meu amigo Jonathan Medeiros, pela amizade verdadeira, pelo apoio constante e por compartilhar momentos importantes. Ao meu tio Francivaldo e à Cleuma, agradeço imensamente pelo apoio e acolhimento em Tucuruí durante o período da universidade, fundamentais para que eu pudesse seguir firme nos estudos. À família Corrêa, deixo meu sincero agradecimento pelo acolhimento, carinho e por me receberem como parte da família, algo que guardarei com muito apreço.

Agradeço também ao meu amigo Telson, pela amizade, pelo apoio nos estudos, pelas diversas noites em claro preparando-se para provas e pelo carinho com que fui recebido por sua família, o que fez grande diferença nessa caminhada. Aos amigos que fiz durante minha trajetória na UFPA — Josemar, Alexandre, Ricardo, Nilton, Danilo, Mateus, Victor e Walder — deixo meu agradecimento especial e levo todos com muito carinho.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas da Artemyn, bem como à própria empresa, por acreditarem em mim, no meu potencial, e por proporcionarem oportunidades fundamentais para o meu desenvolvimento profissional. Agradeço, em especial, aos engenheiros eletricitas Sérgio Amaral e Rosivaldo Marques, profissionais pelos quais tenho grande admiração e respeito, pelos ensinamentos, apoio técnico e exemplo profissional. Estendo meus agradecimentos a toda a equipe envolvida na aplicação e execução deste projeto, cuja colaboração foi essencial para a sua realização e para a consolidação deste trabalho.

“A educação não transforma o mundo. A educação muda as pessoas. As pessoas transformam o mundo.” — Paulo Freire

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema de automação para o controle do fator de potência de um banco de capacitores de média tensão instalado em uma planta industrial. A metodologia adotada baseou-se no aproveitamento da infraestrutura existente, utilizando um Controlador Lógico Programável (CLP) para a execução de uma lógica de controle em linguagem *Ladder*, integrada ao sistema supervisorio e ao sistema de proteção, a partir de medições elétricas realizadas no barramento de 69 kV. A automação foi projetada para realizar a inserção e retirada automática dos estágios capacitivos, incorporando critérios de histerese, temporizações, intertravamentos de segurança e rotinas de registro de manobras. O sistema foi implantado por 3 meses e operou em regime assistido, permitindo o registro do comportamento do fator de potência, das manobras dos estágios e dos eventos do sistema de proteção. Os resultados evidenciaram a correta integração entre os sistemas de medição, controle e supervisão, bem como a funcionalidade da lógica desenvolvida. Durante a operação, foi identificada uma limitação relacionada à condição mecânica de uma chave a óleo preexistente, o que restringiu a continuidade da operação automática. Conclui-se que a solução proposta é tecnicamente viável, destacando a importância da compatibilidade entre sistemas de automação e equipamentos de campo em aplicações industriais.

Palavras-chave: automação; banco de capacitores; fator de potência; CLP; média tensão.

ABSTRACT

This work presents the development and implementation of an automation system for power factor control of a medium-voltage capacitor bank installed in an industrial plant. The adopted methodology was based on the use of the existing infrastructure, employing a Programmable Logic Controller (PLC) to execute a control logic developed in *Ladder* language, integrated with the supervisory and protection systems using electrical measurements obtained at the 69 kV busbar. The automation was designed to perform the automatic connection and disconnection of capacitor stages, incorporating hysteresis criteria, time delays, safety interlocks, and switching operation records. The system was implemented for three months and operated in an assisted mode., allowing the monitoring of power factor behavior, capacitor stage switching, and protection system events. The results demonstrated proper integration between measurement, control, and supervision systems, as well as the correct operation of the developed control logic. During operation, a limitation related to the mechanical condition of a preexisting oil switch was identified, which restricted the continuity of automatic operation. The results indicate that the proposed solution is technically feasible and highlight the importance of compatibility between automation systems and field equipment in industrial applications.

Keywords: automation; capacitor bank; power factor; PLC; medium voltage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da planta industrial em Barcarena–PA e sua relação espacial com o município de Belém–PA.	21
Figura 2 – Vista geral da planta industrial analisada.	21
Figura 3 – Triângulo de potência.	25
Figura 4 – Triângulo de potência em regime indutivo e capacitivo.	26
Figura 5 – Fator de potência indutivo (corrente atrasada).	26
Figura 6 – Fator de potência capacitivo (corrente adiantada).	26
Figura 7 – Relação entre perdas elétricas e fator de potência.	27
Figura 8 – Diagrama unifilar conceitual da instalação do banco de capacitores conectado em paralelo às cargas.	30
Figura 9 – Pirâmide conceitual da automação industrial aplicada a sistemas elétricos.	33
Figura 10 – Representação conceitual da comunicação RS-485 entre dispositivos de medição e aquisição de dados.	35
Figura 11 – Representação conceitual da comunicação Ethernet TCP/IP em sistemas de automação industrial.	35
Figura 12 – Vista aérea da subestação elétrica da planta industrial	38
Figura 13 – Diagrama unifilar geral da planta industrial	39
Figura 14 – Pátio de alta tensão da subestação com estruturas de chegada da linha de 69 kV	40
Figura 15 – Recorte do diagrama unifilar da chegada da linha de 69 kV da concessionária	41
Figura 16 – Transformadores de corrente instalados no pátio da subestação.	42
Figura 17 – Transformadores de potencial instalados no pátio da subestação.	42
Figura 18 – Medidores eletrônicos de energia da concessionária instalados no painel de medição.	43
Figura 19 – Vista geral dos transformadores de potência instalados na subestação.	44
Figura 20 – Vista frontal do transformador de potência TRA–03.	45
Figura 21 – Placa de identificação do transformador de potência TRA–03.	46
Figura 22 – Recorte do diagrama unifilar do transformador TRA–03	46
Figura 23 – Diagrama unifilar do barramento de média tensão associado ao transformador TRA–03.	47
Figura 24 – Painéis de média tensão com relés de proteção associados ao barramento do transformador TRA–03.	48
Figura 25 – Vista frontal do cubículo do alimentador K14.	49
Figura 26 – Vista geral dos bancos de capacitores instalados no pátio da subestação.	49

Figura 27 – Recorte do diagrama unifilar do alimentador associado ao Banco de Capacitores BCP-03.	51
Figura 28 – Célula capacitiva utilizada no banco de capacitores em média tensão.	52
Figura 29 – Placa de identificação da célula capacitiva.	52
Figura 30 – Indutor de dessintonia instalado no banco de capacitores em média tensão.	54
Figura 31 – Dispositivo de manobra instalado no banco de capacitores.	55
Figura 32 – Vista interna do dispositivo de manobra utilizado nos estágios capacitivos.	56
Figura 33 – Placa de identificação do dispositivo de manobra utilizado nos estágios capacitivos.	56
Figura 34 – Vista geral do Banco de Capacitores BCP-03.	58
Figura 35 – Vista geral do conjunto trifásico correspondente a um estágio do Banco de Capacitores BCP-03.	58
Figura 36 – Arranjo das células capacitivas em paralelo em uma das fases do estágio.	59
Figura 37 – Medição das correntes por fase no relé de proteção do Banco de Capacitores BCP-03.	61
Figura 38 – Botões de acionamento local dos estágios do Banco de Capacitores BCP-03.	62
Figura 39 – Tela do sistema supervisorio para acionamento remoto dos estágios do BCP-03.	63
Figura 40 – Arquitetura funcional da solução de automação do Banco de Capacitores BCP-03	66
Figura 41 – Arquitetura física e de comunicação da automação do Banco de Capacitores BCP-03	67
Figura 42 – Vista interna do cubículo do alimentador K14	68
Figura 43 – Smart Gate C utilizado na disponibilização das medições elétricas	70
Figura 44 – Fluxo de disponibilização das medições ao sistema de automação	70
Figura 45 – Interface supervisorio utilizada na supervisão do sistema automatizado	71
Figura 46 – Controlador Lógico Programável ControlLogix utilizado no projeto	72
Figura 47 – CPU do CLP ControlLogix	73
Figura 48 – Módulo de comunicação Ethernet/IP utilizado no sistema	73
Figura 49 – Módulo de entrada digital utilizado no sistema	74
Figura 50 – Módulo de saída digital utilizado no sistema	74
Figura 51 – Disjuntor auxiliar de habilitação da automação (K14)	76
Figura 52 – Interface de comando automático em paralelo ao comando manual	77
Figura 53 – Infraestrutura de borneiras e interligação dos circuitos de automação	79
Figura 54 – Relés auxiliares de interface para realimentação de posição	80
Figura 55 – Diagrama de interligação dos relés auxiliares de retorno de posição	80
Figura 56 – Diagrama de blocos do sistema de controle automático do fator de potência	82

Figura 57 – Ambiente de programação da lógica de controle no RSLogix 500	84
Figura 58 – Lógica Ladder de aquisição e tratamento do fator de potência	87
Figura 59 – Lógica Ladder de aplicação dos limites de fator de potência e validação temporal	88
Figura 60 – Lógica Ladder de consolidação de permissivas e temporização de religamento do Estágio BCP-006	89
Figura 61 – Lógica Ladder de verificação das permissivas operacionais do Estágio BCP-006	90
Figura 62 – Lógica Ladder de geração dos comandos de liga e desliga do Estágio BCP-006	91
Figura 63 – Lógica Ladder de detecção de falha de acionamento do Estágio BCP-006	92
Figura 64 – Lógica Ladder de consolidação dos estados operacionais do estágio capacitivo	93
Figura 65 – Lógica Ladder de reset e normalização da palavra de comandos do estágio	94
Figura 66 – Estrutura geral do modelo de simulação da compensação automática de reativos	96
Figura 67 – Fator de potência sem atuação do BCP-03	98
Figura 68 – Inserção seletiva do Estágio BCP-007	99
Figura 69 – Atuação sequencial dos estágios do BCP-03	100
Figura 70 – Comportamento do fator de potência durante a operação automática do Banco de Capacitores BCP-03	103
Figura 71 – Contador de manobras do Estágio 01 do Banco de Capacitores BCP-03 (BCP-06)	104
Figura 72 – Contador de manobras do Estágio 02 do Banco de Capacitores BCP-03 (BCP-07)	105
Figura 73 – Registro oscilográfico do relé SIPROTEC 7SJ611 associado ao alimentador K14	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de fator de potência para equipamentos industriais	28
Tabela 2 – Principais funções da automação em sistemas elétricos industriais	33
Tabela 3 – Comparação conceitual entre RS-485 e Ethernet TCP/IP	36
Tabela 4 – Características dos transformadores de corrente do sistema de alta tensão	41
Tabela 5 – Características nominais dos transformadores de potência da subestação	44
Tabela 6 – Dados técnicos do transformador de potência TRA-03	45
Tabela 7 – Dados técnicos da célula capacitiva utilizada no banco de capacitores .	53
Tabela 8 – Dados técnicos do dispositivo de manobra utilizado nos estágios capacitivos	57
Tabela 9 – Premissas adotadas na solução de automação	66
Tabela 10 – Parâmetros operacionais gerais da lógica de controle	83
Tabela 11 – Organização das rotinas da lógica de controle no CLP	84
Tabela 12 – Classificação funcional dos sinais utilizados na lógica	85
Tabela 13 – Mapeamento de entradas e saídas digitais do Banco de Capacitores BCP-03	86
Tabela 14 – Principais instruções Ladder utilizadas na lógica de controle	95
Tabela 15 – Correspondência entre os subsistemas do modelo e o sistema real	96
Tabela 16 – Grandezas elétricas sem compensação automática	97
Tabela 17 – Grandezas após inserção do Estágio BCP-007	98
Tabela 18 – Grandezas após inserção dos dois estágios	99
Tabela 19 – Estados lógicos dos estágios do BCP-03	100
Tabela 20 – Comparação dos indicadores do fator de potência antes e durante a automação	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
BCP	<i>Banco de Capacitores de Potência</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programável</i>
FP	<i>Fator de Potência</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	<i>Interface Homem-Máquina</i>
MT	<i>Média Tensão</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
TC	<i>Transformador de Corrente</i>
TP	<i>Transformador de Potencial</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

φ	Ângulo de defasagem entre tensão e corrente
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
S	Potência aparente
V	Tensão elétrica
I	Corrente elétrica
kV	Quilovolt
kW	Quilowatt
$kVAr$	Quilovolt-ampère reativo
MV	Megavolt
MW	Megawatt
$MVAr$	Megavolt-ampère reativo
Hz	Hertz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos	22
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	Estrutura da Monografia	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Potência elétrica e fator de potência	24
2.1.1	Tipos de potência	24
2.1.2	Potência reativa indutiva e capacitiva	25
2.1.3	Fator de potência	25
2.1.4	Causas do baixo fator de potência	27
2.1.5	Consequências do baixo fator de potência	27
2.1.5.1	Fatores de potência típicos de equipamentos	28
2.2	Compensação de potência reativa com bancos de capacitores .	28
2.2.1	Configuração e ponto de instalação	29
2.3	Normas técnicas aplicáveis	31
2.4	Automação de sistemas elétricos industriais	32
2.5	Comunicação industrial aplicada	34
2.6	Exemplo teórico de correção do fator de potência em rede trifásica	36
3	SISTEMA ELÉTRICO DA PLANTA	38
3.1	Descrição geral da subestação elétrica	38
3.2	Diagrama unifilar geral da planta	39
3.3	Alimentação em alta tensão	39
3.4	Sistema de medição e instrumentação elétrica	40
3.4.1	Transformadores de corrente	41
3.4.2	Transformadores de potencial	42
3.4.3	Sistema de medição da concessionária	43
3.5	Transformadores de potência 69/13,8 kV	43
3.6	Barramento e alimentadores de média tensão	47
3.7	Banco de capacitores em média tensão	48
3.7.1	Configuração e ponto de instalação	50
3.7.2	Composição do banco de capacitores	50
3.7.2.1	Células capacitivas	51

3.7.2.2	Indutores de dessintonia	53
3.7.2.3	Dispositivos de manobra dos estágios capacitivos	54
3.7.3	Arranjo físico e organização dos estágios	56
3.8	Sistema de proteção associado	59
3.8.1	Corrente operacional do banco de capacitores	60
3.8.2	Validação por medição em campo	60
3.9	Regime de operação do banco de capacitores	61
3.9.1	Modo manual local	62
3.9.2	Modo remoto	62
3.9.3	Modo automático	63
3.9.4	Considerações operacionais	64
4	SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE	65
4.1	Visão geral da solução de automação adotada	65
4.2	Integração da automação com o sistema de proteção	66
4.3	Disponibilização das medições ao sistema de automação	69
4.4	Arquitetura de Controle e Execução da Automação	71
4.4.1	Controlador lógico programável na solução implementada	71
4.4.2	Plataforma de hardware e módulos de automação	71
4.4.2.1	Unidade Central de Processamento	72
4.4.2.2	Comunicação com sistemas superiores	72
4.4.2.3	Módulos de entrada digital	72
4.4.2.4	Módulos de saída digital	74
4.4.3	Interface com o sistema supervisorio	74
4.4.4	Sinais de entrada e saída da automação	75
4.5	Implementação física e infraestrutura de campo	75
4.5.1	Filosofia e nível de tensão dos circuitos de comando	75
4.5.2	Habilitação física da automação	76
4.5.3	Interface de comando automático	77
4.5.4	Caminho elétrico do comando	78
4.5.5	Infraestrutura de borneiras e interligação	78
4.5.6	Interface de realimentação de posição	79
4.5.7	Integração funcional da infraestrutura implantada	81
5	ESTRATÉGIA DE CONTROLE E IMPLEMENTAÇÃO DA AUTOMAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES	82
5.1	Filosofia Geral de Controle	82
5.2	Parâmetros Gerais da Estratégia de Controle	83
5.3	Arquitetura do Programa no CLP	83
5.3.1	Estrutura organizacional das rotinas	83

5.3.2	Ciclo de varredura da lógica	85
5.3.3	Endereçamento e organização dos sinais	85
5.3.4	Mapeamento de entradas e saídas digitais	86
5.4	Aquisição e Tratamento da Variável de Controle	86
5.5	Critério de Decisão para Inserção e Retirada	87
5.6	Temporizações de Manobra e Proteção Operacional	88
5.7	Permissivas Operacionais e Liberação da Lógica de Manobra	89
5.8	Geração dos Comandos de Manobra	90
5.9	Deteção de Falhas de Acionamento	91
5.10	Consolidação de Estados Operacionais	92
5.11	Reset e Normalização de Comandos	93
5.12	Principais Instruções Ladder Utilizadas na Lógica de Controle	94
5.13	Replicação da Lógica de Controle entre Estágios	94
5.14	Validação da Estratégia de Controle por Simulação Computacional	95
5.14.1	Estrutura do Modelo de Simulação	96
5.14.2	Condição sem Compensação Automática	97
5.14.3	Inserção Seletiva do Estágio BCP-007	97
5.14.4	Inserção dos Dois Estágios	98
5.14.5	Estados Lógicos de Operação	99
5.14.6	Síntese de Validação	100
6	RESULTADOS	102
6.1	Resultados da Implementação do Projeto	102
6.2	Resultados Operacionais	102
6.2.1	Comportamento do Fator de Potência	103
6.2.2	Registros de Manobras dos Estágios Capacitivos	104
6.2.3	Registros do Sistema de Proteção	105
6.3	Ocorrências Registradas Durante a Operação	106
6.4	Síntese dos Resultados	106
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
7.1	Avaliação dos Objetivos	108
7.2	Síntese dos Resultados	108
7.3	Contribuições do Trabalho	109
7.4	Limitações do Estudo	109
7.5	Sugestões para Trabalhos Futuros	110
7.6	Considerações Finais	110
	Referências	111

APÊNDICES	113
APÊNDICE A – LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO NO PLC .	114
ANEXOS	123
ANEXO A – RELATÓRIOS E REGISTROS DO RELÉ DE PROTEÇÃO SIPROTEC 7SJ611	124

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica constitui um insumo essencial para a operação de sistemas industriais de médio e grande porte. No contexto brasileiro, o setor industrial apresenta participação significativa no consumo nacional de energia elétrica, tornando a eficiência energética, a qualidade do suprimento e a redução de perdas aspectos estratégicos para a diminuição de custos operacionais e o aumento da competitividade (EPE, 2023). Nesse cenário, grandes consumidores industriais demandam soluções técnicas e de automação voltadas à operação eficiente de suas instalações elétricas.

Instalações industriais atendidas em média tensão apresentam desafios específicos em razão da predominância de cargas de caráter indutivo, como motores elétricos e transformadores, que impactam diretamente o fator de potência e o desempenho elétrico do sistema. Em ambientes com variações significativas de carga ao longo do processo produtivo, soluções fixas podem não garantir condições adequadas de operação em todos os regimes, resultando em penalidades tarifárias e em efeitos técnicos indesejáveis, como aumento de correntes, perdas elétricas e sobrecarga de equipamentos (SAADAT, 2010).

Nesse contexto, a automação de bancos de capacitores em média tensão destaca-se como uma alternativa eficaz para o controle dinâmico do fator de potência em instalações industriais. Sistemas automatizados permitem o monitoramento contínuo das grandezas elétricas e a adequação da resposta do sistema às variações de carga, contribuindo para a melhoria da estabilidade operacional, da eficiência energética e da confiabilidade da instalação (DUGAN et al., 2012; GRAINGER; JR., 1994).

O presente trabalho baseia-se em um estudo de caso desenvolvido na planta industrial da Artemyn Minerals, dedicada ao beneficiamento de caulim para aplicações industriais, operando em regime contínuo de produção. O suprimento de energia elétrica da instalação é realizado por meio de uma subestação conectada à rede da concessionária no nível de 69 kV, com rebaixamento interno para 13,8 kV por transformadores de potência responsáveis pela alimentação dos sistemas elétricos da planta.

A planta industrial analisada está localizada no município de Barcarena, no estado do Pará, a aproximadamente 115 km da capital Belém-PA, conforme ilustrado na Figura 1. A Figura 2 apresenta uma vista geral das instalações, permitindo a visualização do porte da unidade e da infraestrutura física associada aos sistemas elétricos em média tensão.

Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento, a implementação e a análise de uma solução de automação aplicada ao controle de bancos de capacitores em média tensão, em uma planta industrial real. O estudo considera as condições dinâmicas de operação do sistema elétrico, os equipamentos existentes, os requisitos normativos

Figura 1 – Localização da planta industrial em Barcarena-PA e sua relação espacial com o município de Belém-PA.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Google Earth.

Figura 2 – Vista geral da planta industrial analisada.



Fonte: Artemyn (2025).

e os aspectos de segurança operacional, visando à melhoria do desempenho elétrico da instalação e à manutenção dos parâmetros de qualidade da energia dentro dos limites regulatórios.

1.1 Justificativa

A automação de bancos de capacitores justifica-se pela necessidade de adequar, de forma dinâmica, a compensação de potência reativa às variações de carga típicas de plantas industriais. Em instalações com perfis de consumo variáveis, a operação manual

desses equipamentos pode resultar em condições de subcompensação ou sobrecompensação, comprometendo o fator de potência global, a eficiência energética e o desempenho elétrico do sistema.

No contexto da planta analisada, o controle do Banco de Capacitores BCP-03 não era realizado de forma automática integrada às medições oficiais do ponto de entrega, dificultando o acompanhamento contínuo do fator de potência e limitando a eficácia da compensação reativa frente às oscilações operacionais. Além disso, a dependência de intervenções manuais aumentava a exposição operacional e reduzia a padronização dos critérios de manobra dos estágios capacitivos.

Dessa forma, a implementação de um sistema automatizado de controle do fator de potência, integrado à infraestrutura elétrica existente e baseado nas medições da concessionária, mostra-se tecnicamente relevante. O trabalho apresenta caráter aplicado ao contemplar o desenvolvimento, a implantação e a validação prática da automação em uma instalação industrial real, contribuindo para a melhoria do desempenho energético e da confiabilidade operacional do sistema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Aplicar uma solução de automação para o controle automático do Banco de Capacitores BCP-03, para correção do fator de potência, integrada aos sistemas elétricos existentes da subestação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) caracterizar o sistema elétrico da planta industrial, incluindo a configuração da subestação, níveis de tensão, transformadores e alimentadores associados ao Banco de Capacitores BCP-03;
- b) definir a arquitetura de automação necessária à inserção e retirada automática dos estágios capacitivos, considerando a integração com os sistemas de proteção, supervisão e medição existentes;
- c) desenvolver e implementar a lógica de controle em Controlador Lógico Programável (CLP), incluindo critérios de decisão baseados no fator de potência, temporizações operacionais, intertravamentos e mecanismos de detecção de falhas;
- d) avaliar o desempenho da estratégia de controle por meio de modelagem computacional e da análise do comportamento do fator de potência da planta após a entrada em operação do sistema automatizado.

1.3 Estrutura da Monografia

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, organizados de forma a apresentar progressivamente os fundamentos teóricos, a caracterização do sistema elétrico analisado, o desenvolvimento da solução de automação e a avaliação dos resultados obtidos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, contextualizando o problema de pesquisa, seus objetivos e a relevância técnica do estudo.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica necessária à compreensão do trabalho, incluindo conceitos relacionados ao fator de potência, compensação de potência reativa, bancos de capacitores e sistemas de automação aplicados a instalações industriais.

No Capítulo 3 é apresentado o sistema elétrico da planta industrial, descrevendo a configuração da subestação, os níveis de tensão envolvidos, os transformadores de potência, os alimentadores e a inserção do Banco de Capacitores BCP-03 no contexto operacional da instalação.

O Capítulo 4 trata do sistema de automação e controle desenvolvido, detalhando a integração com o sistema de proteção, a estratégia de medição adotada, a arquitetura de controle implementada e a infraestrutura física necessária à implantação da solução.

No Capítulo 5 é apresentada a implementação da lógica de controle, incluindo os critérios de decisão, temporizações, intertravamentos, detecção de falhas e o sequenciamento de atuação dos estágios capacitivos, bem como a modelagem computacional utilizada para análise do comportamento do sistema.

O Capítulo 6 apresenta os resultados operacionais obtidos após a implantação da automação, contemplando a análise do desempenho do fator de potência e da operação automática do banco de capacitores.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais do trabalho, reunindo as principais conclusões obtidas e sugestões para desenvolvimentos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para compreender o funcionamento, os impactos energéticos e os aspectos normativos envolvidos na operação e automação de bancos de capacitores em média tensão. São abordados conceitos de potência elétrica, fator de potência, causas e consequências do baixo fator de potência (FP), regulamentações aplicáveis e os equipamentos utilizados na planta, com ênfase nos dispositivos efetivamente aplicados ao projeto de automação do Banco de Capacitores BCP-03.

2.1 Potência elétrica e fator de potência

A potência elétrica é definida como a taxa de transferência de energia em um circuito elétrico, representando a rapidez com que a energia é convertida em outras formas de energia ou trabalho (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Conforme a IEEE (2020), a potência elétrica corresponde à quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Seu entendimento é essencial para análises de eficiência energética, dimensionamento de circuitos e avaliação de desempenho de sistemas industriais.

Em instalações industriais, caracterizadas pelo uso intensivo de motores elétricos, transformadores e cargas eletromagnéticas, a circulação de potência elétrica influencia diretamente os níveis de corrente, as perdas elétricas e a utilização da capacidade instalada do sistema de distribuição.

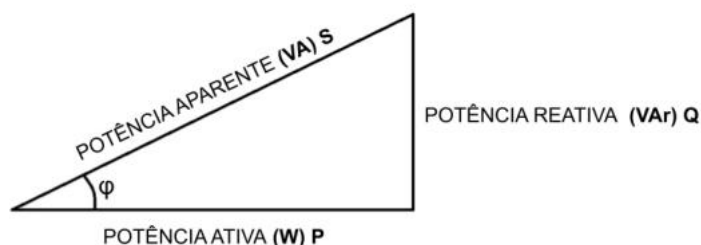
2.1.1 Tipos de potência

A potência elétrica em sistemas de corrente alternada é composta por três grandezas fundamentais: potência ativa, potência reativa e potência aparente (SAADAT, 2010).

- **Potência ativa (P)**: representa a energia efetivamente convertida em trabalho útil, como movimento mecânico, aquecimento ou iluminação. Sua unidade é o watt (W).
- **Potência reativa (Q)**: está associada à energia necessária para o estabelecimento de campos elétricos e magnéticos em cargas indutivas ou capacitivas, não realizando trabalho útil. Sua unidade é o volt-ampère reativo (VAR).
- **Potência aparente (S)**: corresponde à soma vetorial das potências ativa e reativa, representando a potência total fornecida ao sistema elétrico. Sua unidade é o volt-ampère (VA).

A relação entre essas grandezas é tradicionalmente representada pelo triângulo de potências, amplamente utilizado na análise de sistemas elétricos e na avaliação da necessidade de correção do fator de potência, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Triângulo de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.2 Potência reativa indutiva e capacitiva

A potência reativa pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo da natureza da carga conectada ao sistema elétrico. A potência reativa indutiva ocorre quando a corrente elétrica atrasa em relação à tensão, sendo característica de cargas como motores de indução, transformadores e reatores.

Por outro lado, a potência reativa capacitiva ocorre quando a corrente elétrica adianta-se em relação à tensão, sendo característica de bancos de capacitores e filtros capacitivos. A utilização de dispositivos capacitivos permite compensar a potência reativa indutiva das cargas, contribuindo para a melhoria do fator de potência da instalação.

A Figura 4 ilustra o comportamento do triângulo de potências nos regimes indutivo e capacitivo, evidenciando a defasagem angular entre tensão e corrente.

2.1.3 Fator de potência

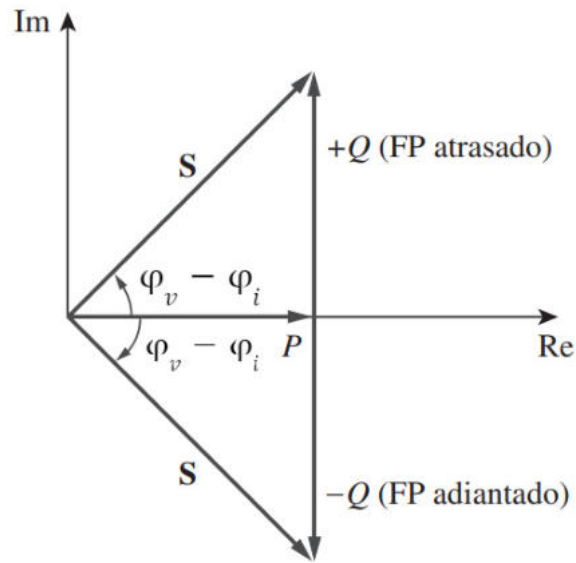
O fator de potência (FP) indica a eficiência com que a potência aparente é convertida em potência ativa, sendo definido pela relação:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\varphi), \quad (1)$$

em que φ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente. Quando $\varphi = 0$, o fator de potência é igual à unidade, condição típica de cargas puramente resistivas.

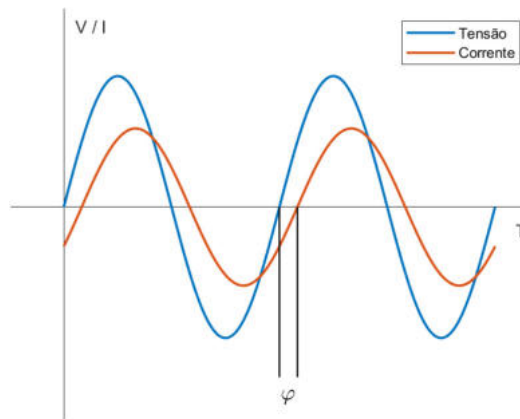
As Figuras 5 e 6 exemplificam os regimes de fator de potência indutivo, no qual a corrente está atrasada em relação à tensão, e capacitivo, no qual a corrente está adiantada.

Figura 4 – Triângulo de potência em regime indutivo e capacitivo.



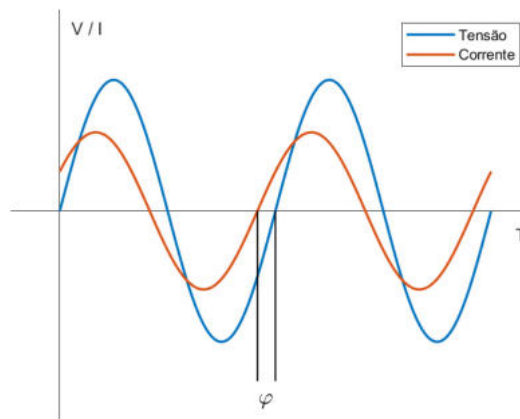
Fonte: Adaptado de Alexander e Sadiku (2013).

Figura 5 – Fator de potência indutivo (corrente atrasada).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 – Fator de potência capacitivo (corrente adiantada).



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.4 Causas do baixo fator de potência

De acordo com Cotrim (2008) e com a literatura clássica sobre qualidade de energia (DUGAN et al., 2012; GRAINGER; JR., 1994), as principais causas do baixo fator de potência em instalações industriais incluem:

- a) motores de indução, especialmente quando operam em vazio ou com baixa carga;
- b) transformadores subutilizados;
- c) utilização de lâmpadas de descarga com reatores indutivos;
- d) grande número de máquinas de baixa potência operando fora da região de maior rendimento;
- e) níveis de tensão superiores aos valores nominais;
- f) presença de equipamentos não lineares, como máquinas de solda a arco.

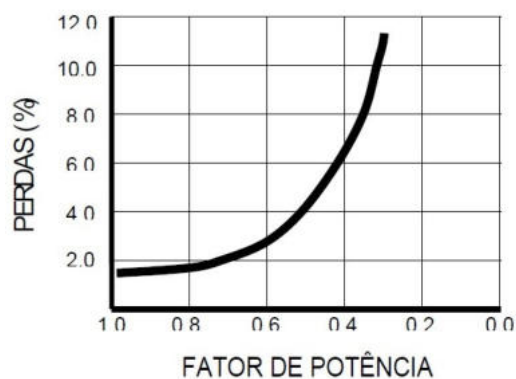
2.1.5 Consequências do baixo fator de potência

O baixo fator de potência implica aumento da corrente elétrica necessária para o fornecimento da mesma potência ativa no sistema. Como as perdas elétricas nos condutores são proporcionais ao quadrado da corrente (I^2R), o aumento da corrente resulta em maiores perdas elétricas, maiores quedas de tensão ao longo dos alimentadores e subutilização da capacidade instalada dos equipamentos elétricos (SAADAT, 2010).

Além dos impactos técnicos, valores reduzidos de fator de potência podem acarretar penalidades financeiras aplicadas pelas concessionárias de energia elétrica, conforme os critérios regulamentares vigentes (ANEEL, 2021).

A Figura 7 ilustra a relação entre perdas elétricas e fator de potência, evidenciando os benefícios associados à correção reativa.

Figura 7 – Relação entre perdas elétricas e fator de potência.



Fonte: Adaptado de CODI (2004).

2.1.5.1 Fatores de potência típicos de equipamentos

A Tabela 1 apresenta valores típicos de fator de potência para alguns equipamentos industriais, utilizados como referência para estimativas de carga e para o dimensionamento conceitual de sistemas de compensação de potência reativa. Esses valores, extraídos da literatura técnica, evidenciam a predominância de baixos fatores de potência em equipamentos indutivos, comuns em ambientes industriais.

Tabela 1 – Valores típicos de fator de potência para equipamentos industriais

Equipamento	FP típico
Motores de indução (sem carga)	0,15 – 0,35
Motores de indução (carga nominal)	0,80 – 0,88
Transformadores (vazio)	0,10 – 0,30
Lâmpadas fluorescentes com reator	0,50 – 0,70
Máquinas de solda	0,35 – 0,55

Fonte: compilado do autor a partir de (COTRIM, 2008; SAADAT, 2010).

2.2 Compensação de potência reativa com bancos de capacitores

Os impactos técnicos e econômicos associados ao baixo fator de potência evidenciam a necessidade de adoção de estratégias de compensação reativa em instalações industriais. A correção desse parâmetro é realizada, predominantemente, por meio da aplicação de bancos de capacitores, capazes de fornecer potência capacitiva ao sistema, reduzindo a demanda reativa das cargas indutivas e restabelecendo condições adequadas de operação elétrica.

Do ponto de vista elétrico, a compensação ocorre pela inserção de potência capacitiva no sistema, em oposição à componente indutiva demandada pelas cargas. Enquanto equipamentos indutivos provocam atraso da corrente em relação à tensão, os capacitores produzem efeito inverso, promovendo o seu adiantamento. A interação entre essas componentes altera o balanço de potências no ponto de acoplamento da instalação, reduzindo o fluxo reativo demandado da rede, elevando o fator de potência e melhorando as condições globais de operação do sistema elétrico (GRAINGER; JR., 1994; MILLER, 1982).

Os bancos de capacitores são amplamente empregados como fontes de suprimento reativo, atuando na compensação da demanda indutiva das cargas. Do ponto de vista sistêmico, sua aplicação produz os seguintes efeitos principais:

- redução da potência reativa fornecida pela rede elétrica;
- diminuição das correntes em transformadores e alimentadores;
- redução das perdas elétricas por efeito Joule;

- melhoria do perfil de tensão da instalação;
- liberação de capacidade para o transporte de potência ativa.

Esses benefícios refletem diretamente na eficiência operacional do sistema elétrico e na adequação do fator de potência aos limites regulatórios (GRAINGER; JR., 1994; SAADAT, 2010).

O desempenho e a confiabilidade dos bancos de capacitores dependem não apenas da potência a ser compensada, mas também da adequada consideração de aspectos construtivos, operacionais e da coordenação com os sistemas de proteção, especialmente em aplicações com perfil de carga dinâmico (WEG, 2017).

Sob o ponto de vista construtivo e operacional, os bancos de capacitores podem ser classificados, de forma geral, em bancos fixos e bancos automáticos. Os bancos fixos permanecem permanentemente conectados ao sistema elétrico, fornecendo compensação constante de potência reativa, sendo aplicados em instalações com perfil de carga estável.

Por outro lado, bancos automáticos são constituídos por estágios capacitivos comutáveis, permitindo a inserção ou retirada de potência reativa conforme as variações operacionais da carga. Essa configuração possibilita o ajuste dinâmico do fator de potência, evitando condições de subcompensação ou sobrecompensação ao longo do regime de operação da instalação.

Em sistemas industriais com elevada variabilidade de carga, a compensação automática em estágios apresenta maior aderência às condições reais de operação, constituindo a base funcional para a implementação de estratégias de controle e automação aplicadas aos bancos de capacitores.

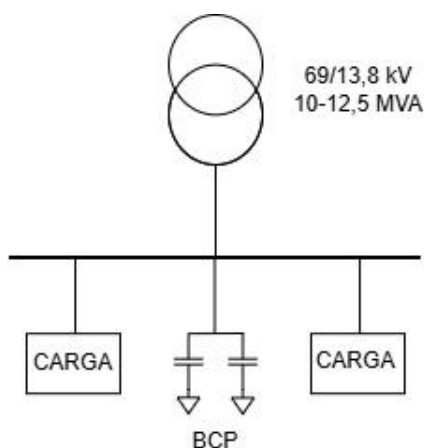
2.2.1 Configuração e ponto de instalação

A definição do ponto de instalação de um banco de capacitores constitui uma decisão técnica fundamental no projeto de sistemas de correção do fator de potência, pois influencia diretamente a eficácia da compensação reativa e o desempenho elétrico global da instalação. Em sistemas industriais de médio e grande porte, é prática consagrada a instalação do banco no barramento do secundário do transformador de potência.

Nessa configuração, o banco é conectado em derivação (shunt) ao barramento, operando em paralelo às cargas da instalação, conforme mostra a Figura 8. Essa topologia permite que a potência reativa capacitiva fornecida seja compartilhada entre os diversos alimentadores, caracterizando a compensação global do consumo reativo, independentemente das variações individuais de carga ao longo do tempo (IEEE, 2014; SAADAT, 2010).

Entre as principais vantagens dessa solução destacam-se a redução da circulação de potência reativa nos transformadores e nos circuitos de distribuição internos, a diminuição

Figura 8 – Diagrama unifilar conceitual da instalação do banco de capacitores conectado em paralelo às cargas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

das correntes elétricas e das perdas associadas, bem como a melhoria do perfil de tensão da instalação. Adicionalmente, a centralização da compensação no barramento principal permite que a correção do fator de potência seja realizada com base nas medições globais do ponto de entrega, atendendo de forma mais eficaz ao limite mínimo regulamentar estabelecido pela concessionária, tipicamente igual ou superior a 0,92. Essa configuração também facilita a supervisão operacional e a implementação de estratégias de controle automático baseadas em medições representativas do sistema (GRAINGER; JR., 1994).

Por outro lado, a instalação de bancos de capacitores em média tensão impõe requisitos mais rigorosos quanto aos dispositivos de manobra, proteção e isolamento elétrico, uma vez que as tensões e correntes envolvidas são superiores às encontradas em sistemas de baixa tensão. Esses aspectos devem ser considerados no projeto e na operação do sistema, especialmente em aplicações com perfil de carga dinâmico (MAMEDE FILHO, 2008; MILLER, 1982).

A operação de bancos de capacitores em média tensão requer a consideração de aspectos específicos associados à sua manobra e inserção no sistema elétrico. A energização de estágios capacitivos pode provocar correntes transitórias elevadas, decorrentes da diferença instantânea de potencial entre o banco e o barramento no momento do fechamento do circuito (SAADAT, 2010; WEG, 2017).

Em função dessas características, a comutação dos estágios deve observar critérios de temporização, sequenciamento e intertravamento operacional, de modo a preservar a integridade dos equipamentos de manobra e assegurar condições seguras de operação. Esses requisitos operacionais tornam-se particularmente relevantes em sistemas automatizados, nos quais a inserção e retirada de estágios ocorre de forma dinâmica, em resposta às variações do fator de potência da instalação (MAMEDE FILHO, 2008).

2.3 Normas técnicas aplicáveis

A operação de sistemas elétricos industriais no Brasil é regida por normas e regulamentações que estabelecem critérios de fornecimento, qualidade, medição e faturamento da energia elétrica. No contexto da correção do fator de potência e da automação de subestações, essas diretrizes definem limites operacionais e requisitos funcionais que influenciam diretamente a adoção de soluções de controle automático.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Normativa nº 1000/2021, estabelece as condições gerais de fornecimento, consolidando regras relacionadas à qualidade do serviço, medição e cobrança de energia ativa e reativa. Complementarmente, o Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), em especial o Módulo 8, define requisitos associados à qualidade da energia elétrica, incluindo critérios de avaliação do fator de potência e da circulação de potência reativa (ANEEL, 2021).

Consumidores atendidos em média ou alta tensão — enquadrados no denominado Grupo A — estão sujeitos à avaliação do fator de potência médio mensal, calculado a partir das grandezas de energia ativa (kWh) e reativa (kVArh) medidas no ponto de fornecimento. Esse enquadramento decorre do nível de tensão de atendimento e da existência de sistema de medição dedicado, características típicas de instalações industriais de médio e grande porte.

Nessas condições, o fator de potência médio mensal deve atender ao critério:

$$FP \geq 0,92$$

Valores inferiores implicam a cobrança de excedente de energia reativa, conforme metodologia estabelecida pela concessionária. O fator de potência do período de faturamento é determinado por:

$$FP = \frac{\text{kWh}}{\sqrt{\text{kWh}^2 + \text{kVArh}^2}} \quad (2)$$

Como a medição é realizada no ponto de entrega — frequentemente associado à subestação do consumidor em instalações alimentadas em níveis como 69 kV — o fator de potência apurado reflete o comportamento agregado de toda a planta. Dessa forma, estratégias de compensação devem considerar medições globais do sistema, assegurando a conformidade regulatória em diferentes regimes operacionais.

Embora a aplicação integral dessas normas não constitua foco deste trabalho, seus princípios fornecem base conceitual para a operação de subestações industriais, nas quais controladores, redes de comunicação e sistemas supervisórios desempenham papel central

na supervisão e controle das instalações elétricas. Nesse cenário, o controle do banco de capacitores configura-se como uma função específica da arquitetura de controle, atendendo simultaneamente a requisitos operacionais, técnicos e econômicos.

Assim, o referencial regulatório e normativo apresentado fundamenta tecnicamente a adoção de estratégias automatizadas para correção do fator de potência, servindo de base para o desenvolvimento e análise da solução implementada nos capítulos subsequentes.

2.4 Automação de sistemas elétricos industriais

A automação de sistemas elétricos industriais tem como objetivo elevar a confiabilidade operacional, a segurança e a eficiência energética das instalações, por meio da integração coordenada entre funções de proteção, controle, medição e supervisão. Em plantas de médio e grande porte, essa abordagem é amplamente aplicada em sistemas de distribuição interna e subestações, nas quais o desempenho elétrico está diretamente associado à continuidade do processo produtivo (GROOVER, 2015).

Historicamente, a operação dessas instalações baseava-se em dispositivos eletromecânicos e comandos locais, com elevada dependência da atuação manual. Com a evolução dos sistemas digitais, dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), CLPs e sistemas supervisórios passaram a compor a arquitetura das subestações, ampliando a capacidade de monitoramento, integração funcional e execução de comandos automáticos (MAMEDE FILHO, 2011; BOYER, 2009).

No contexto da automação de subestações, as funções de proteção, controle, medição e supervisão atuam de forma complementar na operação do sistema elétrico. A proteção é responsável pela detecção e eliminação de faltas, o controle executa manobras operacionais, e os sistemas de medição e supervisão fornecem informações em tempo real para monitoramento e suporte à decisão (MAMEDE FILHO, 2008).

A Tabela 2 apresenta de forma sintética essas funções, destacando suas atribuições e evidenciando a complementaridade entre os diferentes níveis funcionais da automação elétrica.

Do ponto de vista conceitual, a organização funcional da automação é frequentemente representada por meio da pirâmide de automação industrial, que estrutura os níveis de atuação desde o campo até a gestão do sistema (GROOVER, 2015). Essa organização é ilustrada na Figura 9.

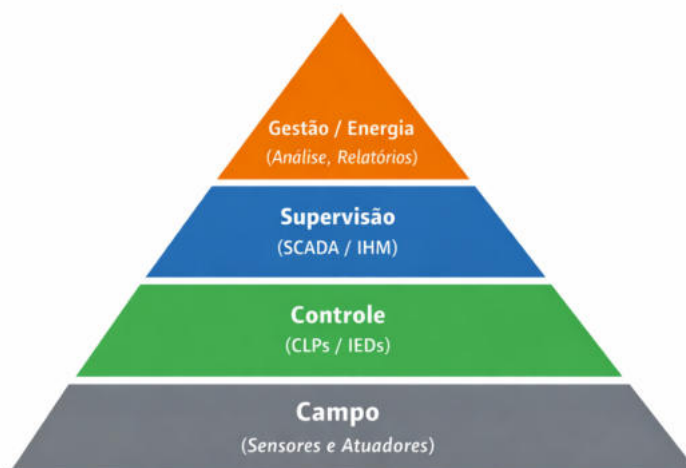
Nessa estrutura, o nível de campo compreende sensores e atuadores responsáveis pela aquisição de sinais e execução das manobras. O nível de controle é composto por dispositivos que processam essas informações e executam as lógicas operacionais, como CLPs e IEDs. O nível de supervisão abrange sistemas de interface homem-máquina, gerenciamento de alarmes e registro de eventos, enquanto o nível de gestão concentra

Tabela 2 – Principais funções da automação em sistemas elétricos industriais

Função	Descrição conceitual
Proteção	Detecção e isolamento automático de faltas e condições anormais de operação.
Controle	Execução de comandos automáticos ou assistidos sobre equipamentos elétricos, com base em critérios operacionais e elétricos.
Medição	Aquisição de grandezas elétricas para monitoramento, análise de desempenho e suporte às funções de controle.
Supervisão	Visualização do estado do sistema, registro de eventos, alarmes e apoio à tomada de decisão operacional.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Pirâmide conceitual da automação industrial aplicada a sistemas elétricos.



Fonte: Adaptado de Mamede Filho (2011).

funções de análise de dados e apoio à tomada de decisão.

Em instalações elétricas industriais, a automação baseia-se na execução coordenada de ações a partir de grandezas medidas e da avaliação do estado do sistema. Diferentemente de processos contínuos, essa automação caracteriza-se por decisões discretas associadas à comutação de equipamentos, definidas por critérios elétricos, operacionais e de segurança (IEC, 2013).

Essa abordagem permite a implementação de intertravamentos, permissivos e condições de bloqueio, assegurando que as manobras ocorram de forma compatível com as funções de proteção.

No contexto da automação aplicada à compensação de potência reativa, diferentes estratégias de controle podem ser adotadas para a operação de bancos de capacitores. Entre as abordagens mais usuais destacam-se o controle baseado na demanda de potência

reativa (kVAr), o controle por nível de tensão e o controle direto pelo fator de potência medido no sistema.

A escolha da estratégia de controle está associada às características operacionais da instalação, ao ponto de medição adotado e aos objetivos técnicos e regulatórios da compensação. Em aplicações industriais atendidas em média ou alta tensão, nas quais o faturamento de energia reativa está vinculado ao fator de potência global medido no ponto de entrega, o controle baseado diretamente nesse parâmetro apresenta maior aderência às condições reais de operação e aos requisitos normativos vigentes.

2.5 Comunicação industrial aplicada

A comunicação industrial constitui elemento fundamental nos sistemas de automação elétrica, viabilizando a troca de informações entre dispositivos de medição, equipamentos de controle e sistemas de supervisão (BOYER, 2009).

Em ambientes industriais e de subestações, as infraestruturas de comunicação devem apresentar robustez construtiva, imunidade a interferências eletromagnéticas e compatibilidade com dispositivos de diferentes gerações tecnológicas (IEC, 2013).

Entre as tecnologias de comunicação amplamente empregadas na automação elétrica destacam-se a comunicação serial baseada no padrão RS-485 e as redes Ethernet estruturadas sobre o protocolo TCP/IP, ambas utilizadas na implementação do sistema desenvolvido neste trabalho. (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

A interface RS-485 constitui um padrão elétrico de comunicação serial diferencial, responsável por definir as características de transmissão do sinal, incluindo níveis de tensão, imunidade a ruídos e capacidade de conexão multiponto. Sua implementação física é realizada, tipicamente, por meio de cabeamento em par trançado blindado, adequado à operação em ambientes industriais. Essa tecnologia é aplicada na interligação de dispositivos de campo, como medidores de energia e relés de proteção, permitindo comunicação em arquiteturas do tipo barramento.

Sobre a interface RS-485 podem ser empregados diferentes protocolos de comunicação responsáveis pela estruturação dos dados transmitidos. Entre eles, destaca-se o Modbus RTU, amplamente utilizado em sistemas de medição e automação industrial (MODBUS ORGANIZATION, 2012).

A organização física típica dessa comunicação é apresentada na Figura 10, que ilustra, de forma conceitual, a interligação entre dispositivos por meio de barramento serial.

As redes Ethernet baseadas no protocolo TCP/IP constituem outra tecnologia amplamente empregada em sistemas de automação. Essa infraestrutura utiliza cabeamento

Figura 10 – Representação conceitual da comunicação RS-485 entre dispositivos de medição e aquisição de dados.

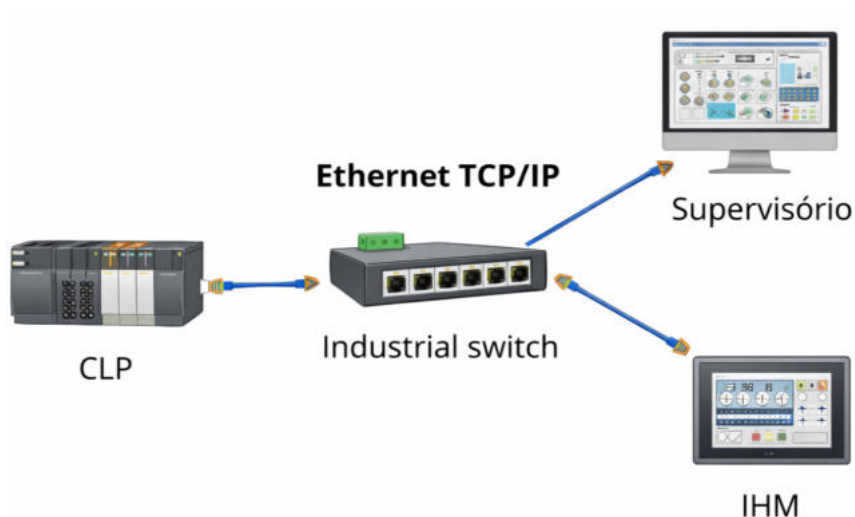


Fonte: Elaborado pelo autor.

em par trançado com conectores RJ-45 e é estruturada, em geral, em topologia estrela, com interligação por switches industriais (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

A Figura 11 apresenta a representação conceitual dessa arquitetura de comunicação, evidenciando a interligação em rede entre dispositivos de controle e supervisão.

Figura 11 – Representação conceitual da comunicação Ethernet TCP/IP em sistemas de automação industrial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 3 apresenta uma comparação conceitual entre as duas tecnologias, sintetizando suas principais características quanto ao meio físico, topologia e campo de aplicação.

Tabela 3 – Comparação conceitual entre RS-485 e Ethernet TCP/IP

Aspecto	RS-485	Ethernet TCP/IP
Tipo de comunicação	Serial diferencial	Rede Ethernet
Meio físico típico	Par trançado blindado	Par trançado RJ-45
Imunidade a ruídos	Elevada	Dependente da infraestrutura
Aplicação típica	Dispositivos de campo	Controle e supervisão

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.6 Exemplo teórico de correção do fator de potência em rede trifásica

Com o objetivo de ilustrar o procedimento clássico de compensação de potência reativa em sistemas elétricos industriais, apresenta-se a seguir um exemplo numérico aplicado a uma rede trifásica alimentada em alta tensão. O exemplo possui caráter estritamente teórico, sendo utilizado apenas para demonstrar os princípios de cálculo envolvidos no dimensionamento da compensação, sem relação direta com os valores reais da planta estudada.

Considere-se uma rede trifásica industrial alimentada em 69 kV, com potência ativa total de $P = 6,0$ MW e fator de potência inicial igual a $FP_1 = 0,88$, condição típica de sistemas com predominância de cargas indutivas. A potência aparente associada a essa condição é dada por:

$$S_1 = \frac{P}{FP_1} = \frac{6000}{0,88} \approx 6818 \text{ kVA}$$

A potência reativa correspondente pode ser obtida por:

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2} \approx \sqrt{(6818)^2 - (6000)^2} \approx 3260 \text{ kVAr}$$

Admita-se que se deseje elevar o fator de potência da instalação para $FP_2 = 0,98$, valor usualmente adotado como referência em sistemas industriais com compensação centralizada. Os ângulos de defasagem associados às condições inicial e final são definidos por:

$$\varphi_1 = \arccos(0,88), \quad \varphi_2 = \arccos(0,98)$$

A potência reativa capacitiva necessária para essa correção pode ser determinada pela expressão:

$$\Delta Q = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Substituindo-se os valores numéricos, obtém-se:

$$\Delta Q \approx 6000 (\tan(\arccos(0,88)) - \tan(\arccos(0,98))) \approx 2400 \text{ kVAr}$$

O resultado indica a necessidade de aproximadamente 2,4 MVar de potência reativa capacitiva para a elevação do fator de potência ao nível especificado. Esse montante é compatível com a aplicação de bancos de capacitores em média tensão organizados em estágios, possibilitando a adequação da compensação às variações operacionais da carga.

Ressalta-se que o exemplo apresentado possui finalidade exclusivamente didática, servindo como base conceitual para a compreensão do dimensionamento da potência reativa. A aplicação prática desses princípios, bem como sua validação por meio de simulação computacional, são abordadas nos capítulos dedicados à implementação e à análise de resultados.

3 SISTEMA ELÉTRICO DA PLANTA

Este capítulo apresenta a caracterização técnica do sistema elétrico da planta industrial objeto deste estudo, com ênfase na subestação própria e nos equipamentos diretamente relacionados ao sistema de compensação de potência reativa. São descritos os níveis de tensão, a configuração do arranjo elétrico e os sistemas de medição e instrumentação, estabelecendo a base necessária para a compreensão da automação do banco de capacitores analisado nos capítulos subsequentes.

A abordagem adotada está direcionada à instalação real, contemplando sua configuração física, funcional e operacional, bem como os elementos que influenciam diretamente a implementação do sistema automatizado.

3.1 Descrição geral da subestação elétrica

A planta industrial em estudo é suprida por uma subestação elétrica de alta tensão responsável pelo recebimento da energia proveniente da concessionária, sua transformação para níveis de média tensão e posterior distribuição às cargas internas da instalação.

O conjunto é composto por um pátio elétrico externo, onde se encontram instalados os principais equipamentos de manobra, proteção e transformação, e por edificações destinadas à instalação dos painéis de média tensão e dos sistemas de proteção, controle e supervisão, conforme ilustrado na Figura 12. Essa segregação física contribui para a segurança operacional, facilidade de manutenção e possibilidade de expansão da instalação.

Figura 12 – Vista aérea da subestação elétrica da planta industrial



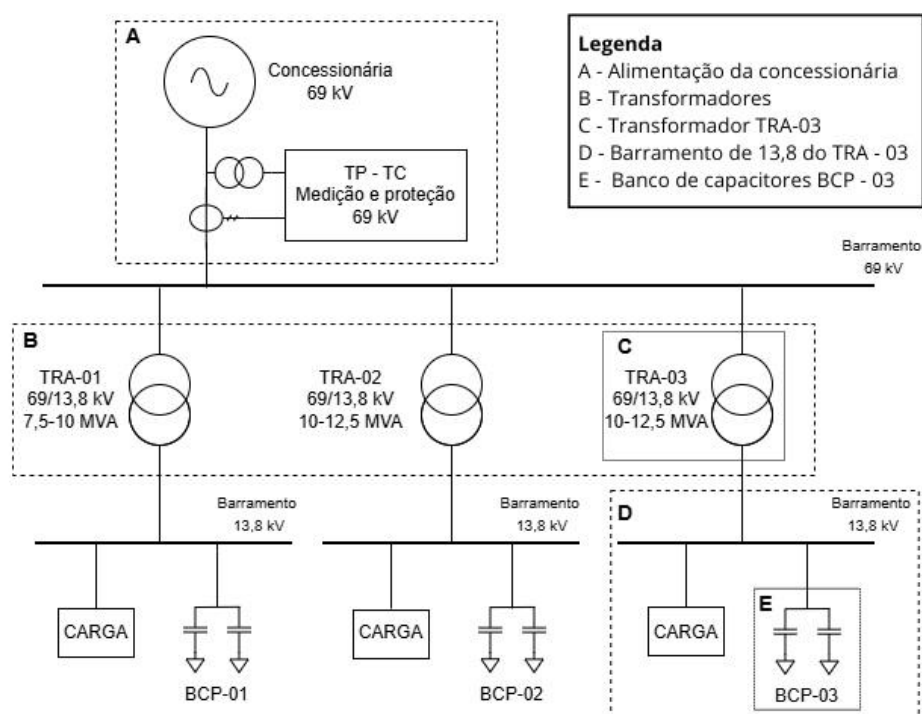
Fonte: Elaborado pelo autor.

No pátio elétrico encontram-se instalados equipamentos como chaves seccionadoras, isoladores, para-raios, barramentos, transformadores de potência e bancos de capacitores. Após a transformação do nível de tensão de 69 kV para 13,8 kV, a energia é encaminhada aos painéis de média tensão responsáveis pela distribuição aos diversos setores produtivos da planta.

3.2 Diagrama unifilar geral da planta

A arquitetura elétrica da instalação é apresentada por meio do diagrama unifilar geral mostrado na Figura 13, no qual são identificados o sistema de alimentação em alta tensão, os transformadores de potência, os barramentos de média tensão e os sistemas de compensação reativa.

Figura 13 – Diagrama unifilar geral da planta industrial



Fonte: Elaborado pelo autor.

O arranjo foi segmentado em áreas funcionais identificadas pelas letras A a E, permitindo a análise individual dos principais subsistemas elétricos da planta. As seções subsequentes apresentam esses subsistemas em maior nível de detalhamento, com ênfase no sistema de compensação automática associado ao transformador TRA-03.

3.3 Alimentação em alta tensão

A alimentação elétrica da planta é realizada em 69 kV por meio de linha aérea proveniente da concessionária de energia elétrica. Esse nível de tensão é compatível com a

demanda de potência da instalação, permitindo a redução das correntes de suprimento e das perdas elétricas associadas ao sistema de distribuição.

No diagrama unifilar geral (Figura 13), esse subsistema corresponde à Área A, que compreende o ponto de recebimento de energia, os equipamentos de seccionamento e os sistemas de medição e proteção instalados no barramento de 69 kV.

Fisicamente, o ponto de conexão encontra-se no pátio de alta tensão da subestação, onde estão instaladas as estruturas de chegada da linha aérea e os dispositivos de manobra e proteção associados, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Pátio de alta tensão da subestação com estruturas de chegada da linha de 69 kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

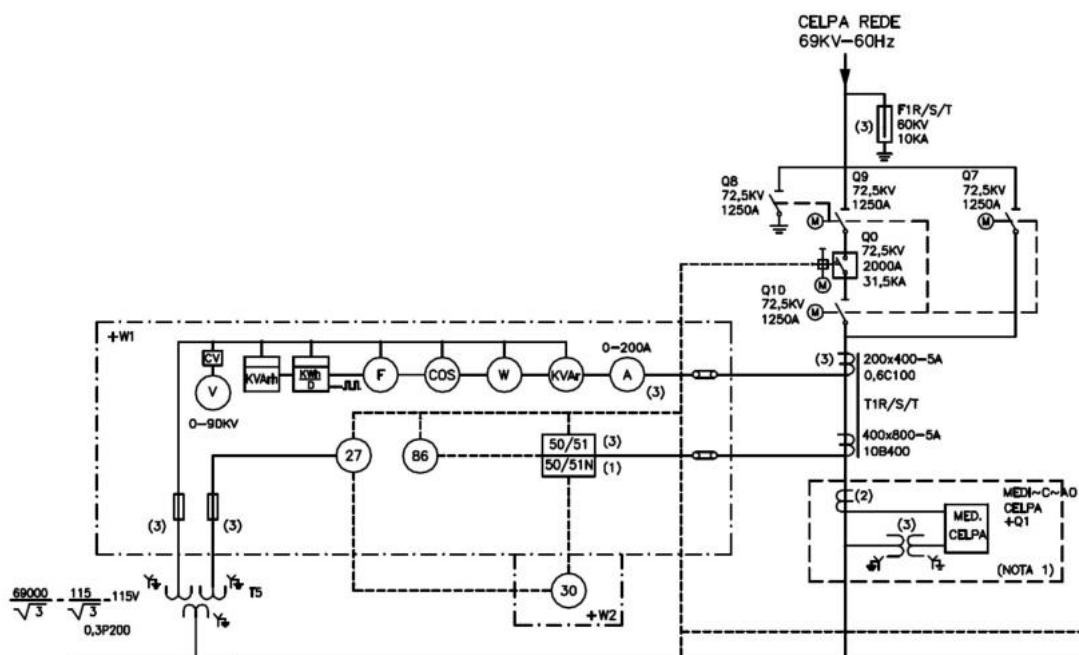
A configuração elétrica desse sistema é detalhada no diagrama apresentado na Figura 15, no qual são identificados os elementos de manobra, proteção e medição associados ao ponto de entrega da concessionária.

A partir desse ponto, a energia é direcionada aos transformadores de potência responsáveis pela redução do nível de tensão para 13,8 kV e alimentação dos barramentos de média tensão da instalação.

3.4 Sistema de medição e instrumentação elétrica

A medição das grandezas elétricas na subestação atende simultaneamente às finalidades de faturamento de energia elétrica e de supervisão operacional do sistema. Para isso, a instalação dispõe de conjuntos específicos de transformadores de corrente, transformadores de potencial e medidores eletrônicos, concentrados no ponto de entrega em alta tensão.

Figura 15 – Recorte do diagrama unifilar da chegada da linha de 69 kV da concessionária



Fonte: Documentação técnica da planta.

De forma geral, o sistema de medição divide-se em dois grupos: o sistema de medição da concessionária, destinado ao faturamento, e o sistema de medição interna, utilizado para proteção, supervisão e controle operacional.

3.4.1 Transformadores de corrente

Os transformadores de corrente (TCs) têm a função de reduzir as correntes do sistema elétrico para níveis padronizados adequados aos circuitos de medição e proteção. No sistema analisado, os TCs possuem corrente secundária nominal de 5 A.

Instalados no pátio de alta tensão e associados ao barramento de 69 kV, esses equipamentos apresentam diferentes relações de transformação e classes de exatidão, permitindo sua utilização simultânea para medição e proteção.

Para medição, são empregados TCs com elevada precisão. Para proteção, utilizam-se transformadores com maior capacidade de corrente e características adequadas para suportar correntes de falta sem saturação.

Tabela 4 – Características dos transformadores de corrente do sistema de alta tensão

Relação	Classe	Aplicação
200/5 A	0,6C100	Medição
400/5 A	10B400	Proteção

Fonte: Dados extraídos da documentação técnica da subestação.

A Figura 16 apresenta os TCs instalados no pátio da subestação e sua disposição nas estruturas metálicas do sistema de 69 kV.

Figura 16 – Transformadores de corrente instalados no pátio da subestação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Transformadores de potencial

Os transformadores de potencial (TPs) são responsáveis por reduzir os níveis de tensão do sistema para valores compatíveis com os circuitos de medição, proteção e faturamento, mantendo isolamento elétrico entre potência e instrumentação.

Na subestação analisada, encontram-se instalados no pátio de 69 kV, fornecendo tensões secundárias padronizadas para relés de proteção, medidores eletrônicos e sistemas supervisórios, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Transformadores de potencial instalados no pátio da subestação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses sinais permitem a obtenção de grandezas como tensões, potências e fator de potência da instalação, fundamentais para a operação e o monitoramento do sistema elétrico.

3.4.3 Sistema de medição da concessionária

A medição para fins de faturamento é realizada por medidores eletrônicos instalados em painel específico da concessionária, conectados aos transformadores de corrente e de potencial dedicados à medição comercial.

A Figura 18 apresenta os equipamentos responsáveis pelo registro das grandezas elétricas no ponto de conexão em 69 kV.

Figura 18 – Medidores eletrônicos de energia da concessionária instalados no painel de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As correntes e tensões do sistema de 69 kV são reduzidas a níveis padronizados pelos TCs e TPs e encaminhadas aos circuitos de entrada dos medidores por meio de cabeamento secundário apropriado, garantindo isolamento elétrica, segurança operacional e precisão metrológica no processo de faturamento.

3.5 Transformadores de potência 69/13,8 kV

A subestação principal da planta industrial dispõe de três transformadores de potência responsáveis pelo rebaixamento do nível de tensão de 69 kV para 13,8 kV, viabilizando a alimentação dos barramentos de média tensão da instalação. Esses equipamentos, identificados como TRA-01, TRA-02 e TRA-03, estão indicados no recorte B do diagrama unifilar geral apresentado na Figura 13.

Cabe destacar que a planta possui ainda diversos transformadores de distribuição instalados nas áreas produtivas, destinados ao rebaixamento de média para baixa tensão e à alimentação de cargas específicas. Contudo, tais unidades não integram o escopo direto deste estudo, que se concentra nos transformadores de potência associados à subestação principal e ao sistema de compensação de potência reativa em média tensão.

Os três transformadores encontram-se instalados no pátio externo da subestação, dispostos de forma adjacente, conforme ilustrado na Figura 19. Essa configuração favorece a operação, a manutenção e o acesso aos equipamentos, além de proporcionar adequada segregação física entre as unidades transformadoras.

Figura 19 – Vista geral dos transformadores de potência instalados na subestação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora operem na mesma classe de tensão e desempenhem função equivalente no sistema elétrico, as unidades apresentam diferenças de fabricante e potência nominal, refletindo ampliações realizadas ao longo da evolução da planta.

A Tabela 5 apresenta as principais características nominais dos transformadores instalados.

Tabela 5 – Características nominais dos transformadores de potência da subestação

Transformador	Fabricante	Potência (MVA)	Tensões (kV)	Resfriamento
TRA-01	ABB	7,5 / 10	69 / 13,8	ONAN / ONAF
TRA-02	Toshiba	10 / 12,5	69 / 13,8	ONAN / ONAF
TRA-03	WEG	10 / 12,5	69 / 13,8	ONAN / ONAF

Fonte: Dados extraídos das placas de identificação.

Dentre as unidades instaladas, o transformador TRA-03 assume papel de destaque por estar diretamente associado ao Banco de Capacitores Automático BCP-03, constituindo o foco das análises desenvolvidas neste trabalho.

A Figura 20 apresenta a vista frontal do equipamento, na qual podem ser identificados seus principais componentes externos, como buchas de alta e baixa tensão, tanque principal, radiadores e conservador de óleo.

Figura 20 – Vista frontal do transformador de potência TRA-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As características elétricas detalhadas do transformador podem ser observadas na placa de identificação apresentada na Figura 21, a partir da qual foi elaborada a Tabela 6. A configuração elétrica associada ao equipamento pode ser analisada por meio do diagrama unifilar apresentado na Figura 22, no qual são representados os dispositivos de proteção, seccionamento e sua interligação ao barramento de média tensão.

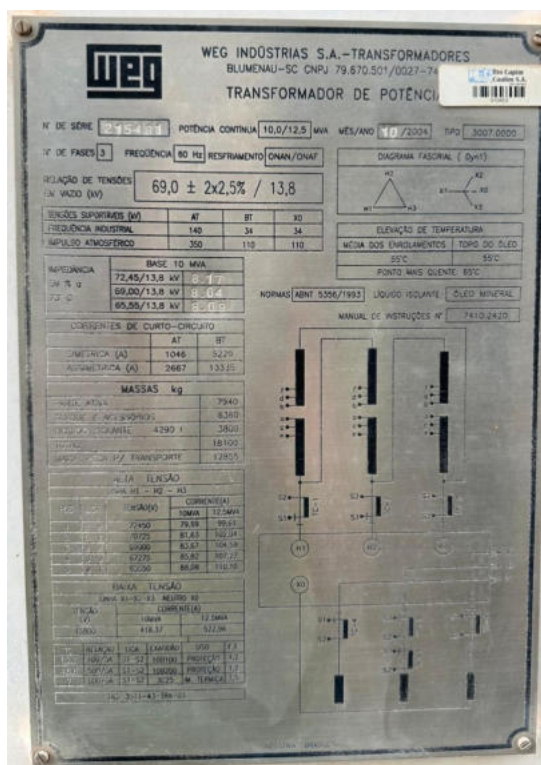
Tabela 6 – Dados técnicos do transformador de potência TRA-03

Parâmetro	Valor
Fabricante	WEG Indústrias S.A.
Tipo	Transformador trifásico imerso em óleo
Ano de fabricação	2004
Potência nominal	10 / 12,5 MVA
Frequência	60 Hz
Tensão primária	69 kV $\pm 2 \times 2,5\%$
Tensão secundária	13,8 kV
Sistema de resfriamento	ONAN / ONAF
Líquido isolante	Óleo mineral
Norma de fabricação	ABNT NBR 5356

Fonte: Placa de identificação do equipamento.

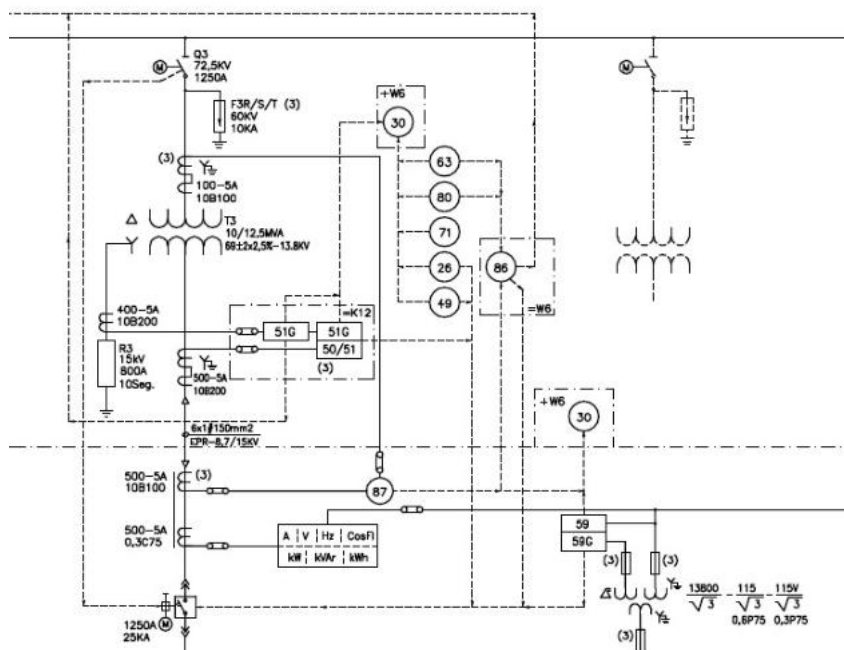
O transformador TRA-03 constitui elemento de interface entre o sistema de suprimento em alta tensão e a rede de distribuição interna associada ao banco de capacitores

Figura 21 – Placa de identificação do transformador de potência TRA-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Recorte do diagrama unifilar do transformador TRA-03



Fonte: Documentação técnica da planta.

objeto deste estudo. Suas proteções elétricas incluem funções de sobrecorrente, falta à terra e detecção de condições anormais de operação, coordenadas com os sistemas de proteção dos demais níveis de tensão.

Nesse contexto, as análises desenvolvidas neste trabalho concentram-se no conjunto formado pelo transformador TRA-03, pelo barramento de média tensão a ele associado e pelo Banco de Capacitores BCP-03, considerando, entretanto, a influência das condições elétricas globais da instalação, especialmente o fator de potência medido no ponto de entrega em 69 kV, utilizado como referência para as estratégias de compensação reativa.

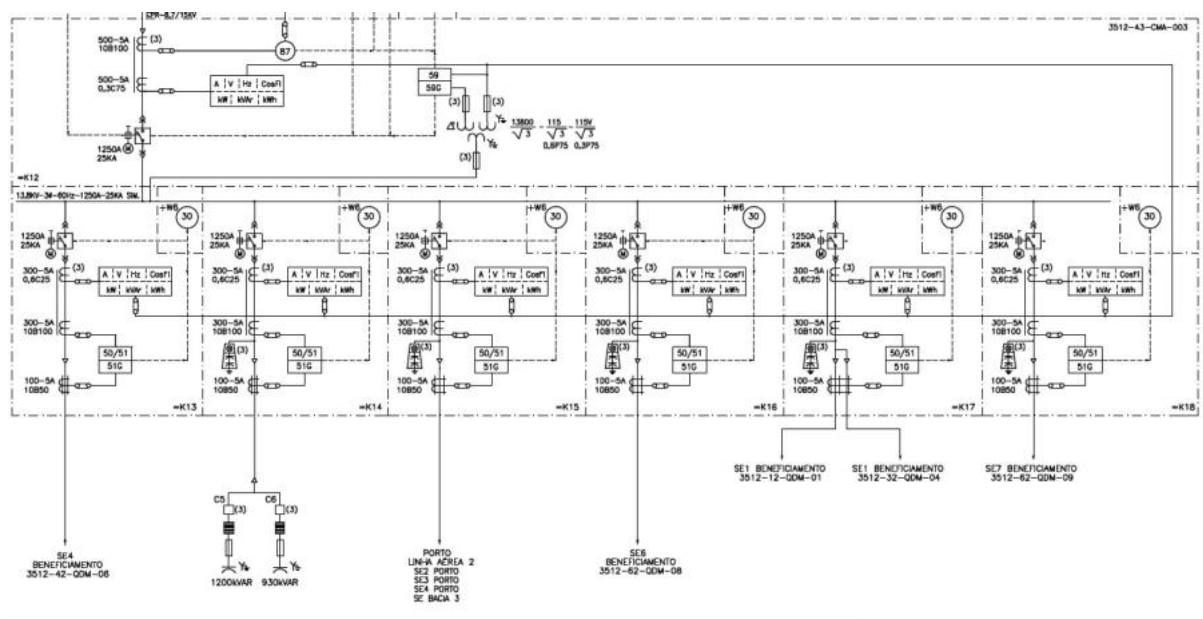
3.6 Barramento e alimentadores de média tensão

A distribuição de energia elétrica em média tensão na planta industrial é realizada por meio de cubículos metálicos de 13,8 kV, nos quais estão instalados os dispositivos de manobra, proteção, medição e supervisão associados aos alimentadores da subestação. Esses cubículos constituem a interface física entre o barramento principal de média tensão e as cargas atendidas pela instalação.

Os cubículos encontram-se interligados ao barramento principal de 13,8 kV, alimentado pelo transformador de potência TRA-03, correspondente ao recorte D da Figura 13. Esse barramento estabelece o ponto central de interligação entre o sistema de transformação e os diversos alimentadores responsáveis pelo suprimento das cargas da planta.

A configuração funcional desse conjunto é apresentada na Figura 23, que ilustra o diagrama unifilar dos alimentadores conectados ao barramento de média tensão, bem como os principais dispositivos de proteção, manobra e medição associados.

Figura 23 – Diagrama unifilar do barramento de média tensão associado ao transformador TRA-03.



Fonte: Documentação técnica da planta.

A partir desse barramento são derivados alimentadores destinados às áreas produtivas, sistemas auxiliares e equipamentos de grande porte. Cada circuito dispõe de disjuntor

de média tensão, relé digital de proteção e transformadores de corrente e potencial, assegurando proteção seletiva, monitoramento das grandezas elétricas e condições seguras de operação.

A Figura 24 apresenta a vista frontal de parte dos painéis de média tensão contendo os relés de proteção associados a esse barramento, permitindo relacionar a representação do diagrama unifilar com a disposição física dos equipamentos na subestação.

Figura 24 – Painéis de média tensão com relés de proteção associados ao barramento do transformador TRA-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os alimentadores conectados ao barramento, destaca-se o circuito identificado como K14, destinado à alimentação do Banco de Capacitores BCP-03, elemento central das análises desenvolvidas neste trabalho.

A Figura 25 apresenta a vista frontal do cubículo correspondente a esse alimentador, permitindo a visualização dos dispositivos de comando local, sinalização, medição e proteção associados ao circuito.

3.7 Banco de capacitores em média tensão

A compensação de potência reativa na planta industrial é realizada por meio de bancos de capacitores instalados em média tensão e conectados aos barramentos de 13,8 kV da subestação. Esses equipamentos integram o sistema elétrico da planta e são responsáveis pela injeção de potência reativa capacitiva no barramento, conforme as condições operacionais da instalação.

Fisicamente, a subestação dispõe de três conjuntos de bancos de capacitores associados aos transformadores de potência. Entretanto, o banco originalmente vinculado ao transformador TRA-01 encontra-se desativado, não participando da operação atual do sistema elétrico. Dessa forma, permanecem em operação apenas os bancos associados aos transformadores TRA-02 e TRA-03, denominados BCP-02 e BCP-03, respectivamente.

Figura 25 – Vista frontal do cubículo do alimentador K14.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 26 apresenta a vista geral dos bancos de capacitores instalados no pátio da subestação, evidenciando a disposição física dos conjuntos, as estruturas metálicas de sustentação, os isoladores e os elementos associados à conexão em média tensão.

Figura 26 – Vista geral dos bancos de capacitores instalados no pátio da subestação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os bancos BCP-02 e BCP-03 apresentam concepção construtiva semelhante, sendo constituídos por estágios capacitivos trifásicos montados em estruturas metálicas elevadas, adequadas à operação em média tensão. Cada estágio é composto por conjuntos de células capacitivas conectadas de forma a fornecer níveis definidos de potência reativa ao sistema, permitindo a adequação da compensação às condições operacionais da planta.

No banco BCP-02, a inserção e a retirada dos estágios capacitivos são realizadas por meio de comando manual local, acionado por botoeiras instaladas no cubículo de média tensão correspondente. Nessa configuração, a operação depende diretamente da atuação do electricista, não havendo mecanismos de ajuste automático em função das variações do sistema elétrico.

O banco de capacitores BCP-03, objeto central deste trabalho, possuía originalmente filosofia operacional semelhante, com comutação manual dos estágios. No escopo do projeto desenvolvido, esse banco passou por processo de modernização voltado à incorporação de recursos de controle e supervisão, mantendo-se, entretanto, sua arquitetura elétrica original. Em função dessa intervenção, o BCP-03 constitui o elemento de referência para as análises apresentadas nos capítulos subsequentes.

3.7.1 Configuração e ponto de instalação

O Banco de Capacitores BCP-03 encontra-se conectado ao sistema de média tensão por meio de alimentador dedicado, derivado do barramento de 13,8 kV associado ao transformador TRA-03.

Essa configuração estabelece a interface elétrica entre o banco e a rede de distribuição interna da subestação, permitindo sua integração aos sistemas de proteção, manobra e medição existentes. A Figura 27 apresenta o diagrama unifilar correspondente a esse circuito, representando o recorte E do diagrama geral da planta.

A adoção de um alimentador exclusivo possibilita a aplicação de proteções específicas e a realização de intervenções operacionais no banco sem impacto direto sobre os demais circuitos da subestação.

3.7.2 Composição do banco de capacitores

A composição de um banco de capacitores em média tensão envolve a integração de diferentes componentes elétricos, cada um com função específica no processo de fornecimento de potência reativa e na operação segura do sistema. Esses elementos são projetados de forma coordenada, considerando não apenas os requisitos elétricos da compensação reativa, mas também aspectos construtivos, operacionais e de confiabilidade associados à instalação (MAMEDE FILHO, 2008; WEG, 2017).

No banco de capacitores analisado neste trabalho, destacam-se como principais

isolados de conexão.

Figura 28 – Célula capacitiva utilizada no banco de capacitores em média tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais características elétricas da célula capacitiva podem ser observadas na placa de identificação apresentada na Figura 29, a qual reúne os dados nominais necessários à correta especificação e aplicação do equipamento no sistema elétrico.

Figura 29 – Placa de identificação da célula capacitiva.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas informações apresentadas na placa de identificação, a Tabela 7 sintetiza as principais características elétricas e construtivas das células capacitivas empregadas no banco de capacitores em estudo.

Tabela 7 – Dados técnicos da célula capacitiva utilizada no banco de capacitores

Parâmetro	Valor
Fabricante	BREE
Tipo	Capacitor de potência em média tensão
Potência nominal	200 kVAr
Tensão nominal	7,96 kV
Frequência	60 Hz
Capacitância nominal	8,415 μ F
Categoria de temperatura	-5 °C a +50 °C
Dispositivo interno de descarga	Sim
Líquido isolante	Óleo isolante
Aplicação	Banco de capacitores em média tensão

Fonte: Dados extraídos da placa de identificação da célula capacitiva.

A análise da placa de identificação evidencia a adequação das células capacitivas à operação em sistemas de média tensão, bem como a presença de dispositivos internos de descarga, responsáveis pela redução da tensão residual nos terminais após a desenergização. Esse recurso contribui para a segurança operacional durante atividades de manutenção e para a confiabilidade do sistema de compensação reativa.

A potência nominal unitária das células capacitivas constitui o parâmetro base para a composição dos estágios do banco de capacitores, sendo sua associação elétrica definida de modo a atender à potência reativa especificada para cada nível de inserção. O detalhamento dessa configuração, bem como o dimensionamento da potência reativa resultante da associação das células, é apresentado em seção posterior, dedicada à estruturação dos estágios capacitivos do banco analisado.

3.7.2.2 Indutores de dessintonia

Em sistemas industriais com presença de cargas não lineares — como conversores estáticos, acionamentos eletrônicos e fornos a arco — a associação de indutores de dessintonia aos bancos de capacitores constitui prática consolidada de engenharia. Esses dispositivos têm como finalidade principal evitar a ocorrência de fenômenos de ressonância entre a capacitância do banco e a indutância equivalente do sistema elétrico, condição que pode resultar na amplificação de correntes harmônicas e na sobrecarga dos componentes capacitivos (DUGAN et al., 2012).

No banco de capacitores analisado neste trabalho, os indutores de dessintonia encontram-se associados em série aos estágios capacitivos, formando circuitos do tipo LC. Nessa configuração, a frequência de ressonância do conjunto é deslocada para valores

inferiores às ordens harmônicas predominantes da instalação, reduzindo a probabilidade de excitação ressonante e mitigando os efeitos das distorções harmônicas sobre as células capacitivas e os dispositivos de manobra.

A Figura 30 apresenta um dos indutores de dessintonia instalados no banco de capacitores da subestação, evidenciando sua construção física com núcleo a ar, a disposição do enrolamento e a montagem sobre estrutura metálica elevada, características típicas de aplicações em média tensão.

Figura 30 – Indutor de dessintonia instalado no banco de capacitores em média tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da mitigação de efeitos harmônicos, os indutores exercem influência direta no comportamento transitório do banco durante as manobras de energização dos estágios. A indutância em série contribui para a limitação das correntes de inrush, reduzindo os esforços eletrodinâmicos impostos às células capacitivas e aos dispositivos de comutação, aspecto relevante para a confiabilidade operacional e a vida útil do conjunto.

No contexto do banco de capacitores BCP-03, a utilização de indutores de dessintonia constitui elemento essencial para a operação segura do sistema de compensação reativa, assegurando sua compatibilidade com o perfil de cargas da planta e com as condições elétricas do sistema de distribuição em média tensão.

3.7.2.3 Dispositivos de manobra dos estágios capacitivos

A inserção e a retirada dos estágios capacitivos do Banco de Capacitores BCP-03 são realizadas por meio de dispositivos de manobra compatíveis com a classe de tensão de operação e com as correntes associadas à comutação de cargas capacitivas em média

tensão. No sistema analisado, essa função é desempenhada por equipamentos do tipo CSL, projetados especificamente para esse tipo de aplicação.

A Figura 31 apresenta a vista externa de uma das unidades instaladas no banco, evidenciando sua fixação na estrutura metálica e a interligação ao circuito elétrico. Cada estágio capacitivo é constituído por três dispositivos monofásicos, um por fase, cuja atuação simultânea garante a inserção equilibrada do conjunto trifásico no sistema.

Figura 31 – Dispositivo de manobra instalado no banco de capacitores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A construção interna do equipamento pode ser observada na Figura 32, na qual se destacam o mecanismo de acionamento eletromecânico, os contatos móveis e fixos e a câmara de interrupção imersa em óleo isolante. Esse meio exerce dupla função: promover a isolamento elétrico entre os contatos e atuar na extinção do arco elétrico formado durante as manobras de abertura e fechamento, assegurando a integridade do dispositivo sob condições operacionais severas.

As características elétricas e construtivas do equipamento podem ser verificadas na placa de identificação apresentada na Figura 33. A partir dessas informações, foi elaborada a Tabela 8, que sintetiza os principais parâmetros técnicos do dispositivo empregado na manobra dos estágios capacitivos do BCP-03.

Do ponto de vista operacional, a utilização desse tipo de dispositivo impõe restrições quanto à frequência de manobras, em função dos esforços mecânicos e elétricos associados à comutação de cargas capacitivas. Em razão dessas limitações, tais características foram consideradas no desenvolvimento da lógica de automação, especialmente no que se refere à temporização mínima entre acionamentos e às permissivas de operação, aspectos analisados em seções posteriores.

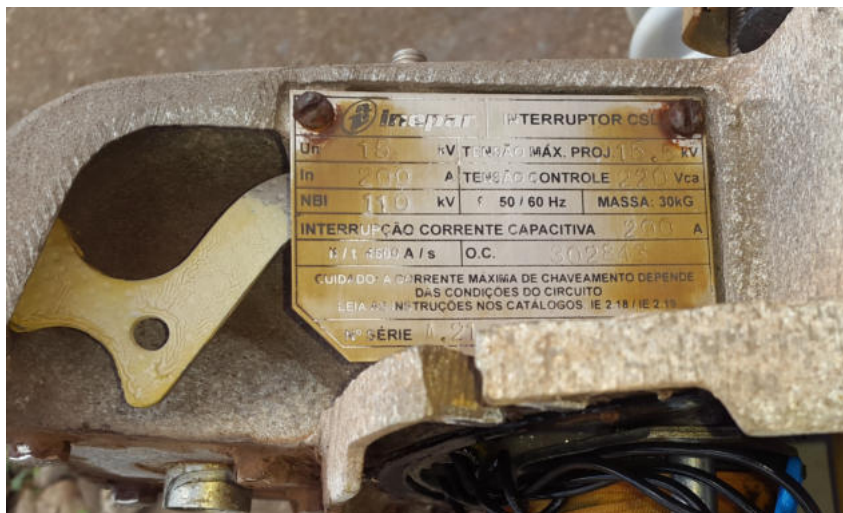
A análise integrada dos componentes que constituem o banco — células capacitivas,

Figura 32 – Vista interna do dispositivo de manobra utilizado nos estágios capacitivos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Placa de identificação do dispositivo de manobra utilizado nos estágios capacitivos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

indutores de dessintonia e dispositivos de manobra — evidencia que a confiabilidade operacional do sistema de compensação reativa depende da coordenação funcional entre esses elementos, tanto sob regime permanente quanto durante condições transitórias de operação.

3.7.3 Arranjo físico e organização dos estágios

O arranjo físico do Banco de Capacitores BCP-03 foi concebido de forma modular, permitindo a organização individual dos estágios capacitivos e o acesso facilitado aos

Tabela 8 – Dados técnicos do dispositivo de manobra utilizado nos estágios capacitivos

Parâmetro	Valor
Modelo	CSL
Fabricante	Inepar
Tensão nominal	15 kV
Corrente nominal	200 A
Frequência nominal	60 Hz
Interrupção de corrente capacitiva	200 A
Número de polos	Monofásica
Meio de interrupção	Óleo isolante
Tipo de acionamento	Eletromecânico
Tensão do circuito de comando	220 Vca

Fonte: Dados extraídos da placa de identificação do dispositivo de manobra.

principais componentes do sistema. Essa configuração é característica de bancos de capacitores em média tensão instalados em pátios de subestações, nos quais requisitos de isolamento elétrico, ventilação natural e segurança operacional impõem a utilização de estruturas elevadas e espaçamentos adequados entre fases e equipamentos.

A Figura 34 apresenta a vista geral do Banco de Capacitores BCP-03 instalado no pátio da subestação. Observa-se que o banco é montado sobre estrutura metálica elevada, suportada por isoladores, e organizado em dois conjuntos fisicamente distintos, correspondentes aos estágios capacitivos identificados como BCP-006 e BCP-007. Essa separação física reflete a independência elétrica e funcional de cada estágio, permitindo sua operação individual conforme as condições do sistema elétrico.

Cada estágio capacitivo é constituído por um conjunto trifásico completo, formado por três fases eletricamente equilibradas. A Figura 35 ilustra a organização típica de um dos estágios, evidenciando a simetria construtiva e a disposição física das fases no banco.

Em cada fase do estágio capacitivo, as células capacitivas são associadas em paralelo, conforme ilustrado na Figura 36. No banco em estudo, cada fase é composta por duas células capacitivas conectadas em paralelo, totalizando seis células por estágio.

Cada célula capacitiva possui potência nominal de 200 kVAr na tensão de fase de 7,96 kV. Assim, a potência reativa equivalente por fase resulta da associação em paralelo de duas unidades:

$$Q_{fase} = 200 \times 2 = 400 \text{ kVAr}$$

Considerando a constituição trifásica do estágio, a potência reativa total fornecida por cada conjunto é dada por:

Figura 34 – Vista geral do Banco de Capacitores BCP-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Vista geral do conjunto trifásico correspondente a um estágio do Banco de Capacitores BCP-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$Q_{estágio} = 3 \times 400 = 1200 \text{ kVAr}$$

Figura 36 – Arranjo das células capacitivas em paralelo em uma das fases do estágio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$Q_{estágio} = 1,2 \text{ MVar}$$

Como o Banco de Capacitores BCP-03 é composto por dois estágios independentes, a potência reativa total instalada no conjunto resulta em:

$$Q_{total} = 2 \times 1,2 = 2,4 \text{ MVar}$$

Esse valor corresponde à capacidade máxima de fornecimento de potência reativa do banco quando ambos os estágios encontram-se energizados.

A disposição física observada no Banco de Capacitores BCP-03 evidencia a integração funcional entre células capacitivas, indutores de dessintonia e dispositivos de manobra, os quais, em conjunto, constituem cada estágio capacitivo. Essa organização modular é fundamental para a operação segura do banco, bem como para a implementação das estratégias de controle, supervisão e automação abordadas nas seções subsequentes.

3.8 Sistema de proteção associado

O sistema de proteção do Banco de Capacitores BCP-03 tem como finalidade garantir a integridade dos equipamentos e a segurança operacional do alimentador K14, responsável pela sua conexão ao barramento de média tensão. A proteção é realizada por meio da atuação conjunta entre o relé digital de proteção e o disjuntor de média tensão do circuito.

Nesse arranjo, o relé executa as funções de medição, supervisão e lógica de proteção, enquanto o disjuntor atua como elemento final de manobra, promovendo a abertura do circuito sempre que identificada uma condição anormal de operação.

O dispositivo de proteção empregado é um IED Siemens da família SIPROTEC, modelo 7SJ62, instalado no cubículo do alimentador K14. O equipamento realiza a medição contínua das correntes por fase por meio dos transformadores de corrente do circuito, processando essas grandezas para a execução das funções configuradas.

No contexto da proteção do banco de capacitores, destacam-se as seguintes funções:

- Sobrecorrente instantânea (50);
- Sobrecorrente temporizada (51);
- Sobrecorrente de terra (51G).

Essas funções asseguram a atuação do sistema frente a faltas no alimentador, desequilíbrios severos ou condições anormais envolvendo os estágios capacitivos.

3.8.1 Corrente operacional do banco de capacitores

A corrente associada à operação dos estágios pode ser estimada a partir da potência reativa instalada. Considerando que cada estágio possui potência de 1,2 MVar e que o sistema opera em 13,8 kV, tem-se:

$$I_{estágio} = \frac{Q}{\sqrt{3}V} = \frac{1,2 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3} \approx 50 \text{ A}$$

Para a operação simultânea dos dois estágios do Banco de Capacitores BCP-03, a corrente trifásica total esperada é da ordem de:

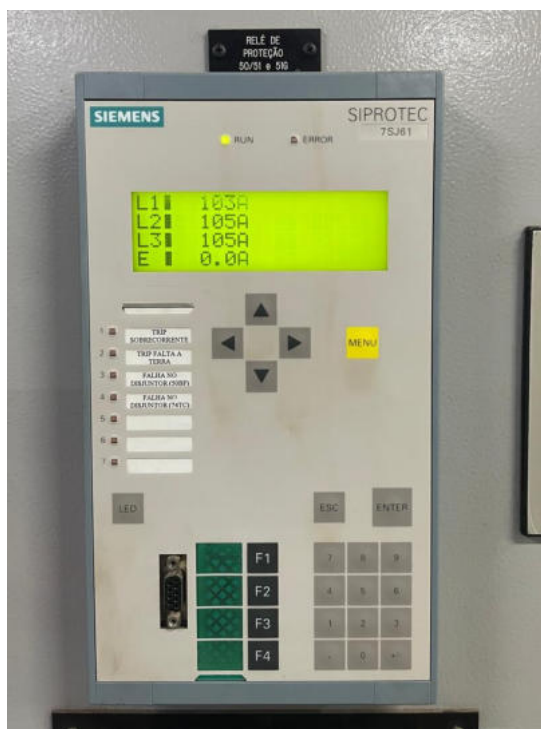
$$I_{total} \approx 2 \times 50 = 100 \text{ A}$$

3.8.2 Validação por medição em campo

A Figura 37 apresenta a medição realizada no relé de proteção do alimentador K14 durante a operação com os dois estágios energizados.

Observam-se correntes entre 103 A e 105 A por fase, valores compatíveis com a estimativa teórica de aproximadamente 100 A para a operação conjunta dos dois estágios. Pequenas diferenças são esperadas e decorrem de variações da tensão do barramento, tolerâncias construtivas das células capacitivas e condições elétricas do sistema no ponto de instalação.

Figura 37 – Medição das correntes por fase no relé de proteção do Banco de Capacitores BCP-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando uma condição de falha é detectada, o relé envia comando de abertura ao disjuntor do alimentador K14, promovendo o desligamento do banco e a isolamento do circuito. Dessa forma, evita-se a permanência de correntes anormais nos estágios capacitivos, preservando células, indutores de dessintonia e dispositivos de manobra.

Dessa forma, o sistema de proteção do Banco de Capacitores BCP-03 integra medição, lógica de proteção e manobra, constituindo elemento essencial para a operação segura do conjunto e para a implementação das estratégias de automação apresentadas nas seções subsequentes.

3.9 Regime de operação do banco de capacitores

O regime de operação do Banco de Capacitores BCP-03 é definido a partir das condições elétricas do sistema e das permissivas estabelecidas pelos dispositivos de proteção, manobra e controle associados ao alimentador K14. A operação do banco ocorre por meio da inserção e retirada de estágios capacitivos trifásicos, respeitando critérios de segurança operacional e as limitações construtivas dos equipamentos envolvidos.

No contexto da subestação, o BCP-03 pode operar em três modos distintos: manual local, remoto via sistema supervisor e automático. Cada modo define a origem dos comandos de manobra, mantendo, em todos os casos, a subordinação às proteções elétricas, intertravamentos e condições permissivas do sistema.

3.9.1 Modo manual local

No modo manual local, as manobras de abertura e fechamento dos estágios capacitivos são realizadas diretamente pelo operador, por meio de botoeiras instaladas no painel de comando do banco de capacitores. Esse modo é utilizado principalmente em atividades de manutenção, comissionamento, testes operacionais e situações de contingência, nas quais se faz necessário o controle direto dos estágios em campo.

A Figura 38 apresenta as botoeiras de acionamento local dos estágios do Banco de Capacitores BCP-03, evidenciando o meio físico disponível para execução dos comandos manuais.

Figura 38 – Botoeiras de acionamento local dos estágios do Banco de Capacitores BCP-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo em operação manual, os comandos permanecem condicionados às permissivas elétricas do sistema, não sendo possível a energização dos estágios sob condições de falha, bloqueio ou atuação de proteções.

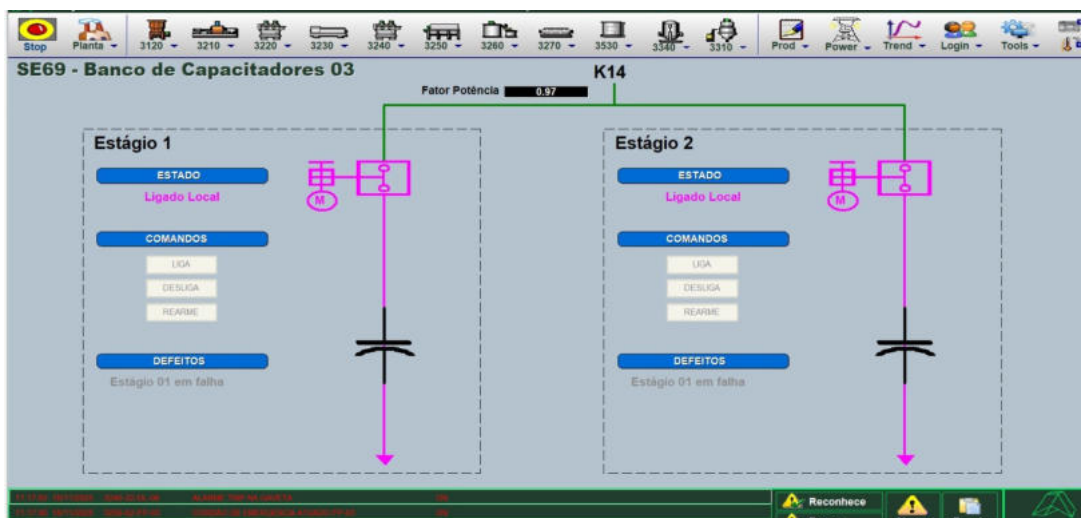
3.9.2 Modo remoto

No modo remoto, os comandos de inserção, retirada e rearme dos estágios são realizados a partir do sistema supervisor da planta. Nesse regime, o operador interage

com o sistema elétrico por meio de telas gráficas, enquanto o CLP atua como elemento intermediário de validação lógica dos comandos.

A Figura 39 apresenta a interface supervisória utilizada para o acionamento remoto dos estágios do Banco de Capacitores BCP-03, permitindo a visualização de estados, alarmes e condições operacionais do sistema.

Figura 39 – Tela do sistema supervisório para acionamento remoto dos estágios do BCP-03.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa configuração, o CLP verifica as permissivas provenientes do sistema de proteção, estados dos dispositivos de manobra e condições elétricas do banco, executando os comandos apenas quando todos os critérios de segurança são atendidos.

3.9.3 Modo automático

No modo automático, o controle dos estágios capacitivos é realizado exclusivamente pela lógica de automação implementada no CLP, sem intervenção direta do operador. A inserção e retirada dos estágios ocorrem de forma dinâmica, com base nas grandezas elétricas monitoradas pelo sistema, em especial o fator de potência utilizado como variável de referência para a compensação reativa.

Esse regime operacional corresponde à filosofia de funcionamento desenvolvida e implementada no escopo deste trabalho, cuja finalidade é promover a correção automática do fator de potência da instalação, mantendo-o dentro dos limites operacionais e regulatórios estabelecidos.

A atuação automática permanece condicionada às permissivas do sistema de proteção, sendo bloqueada sempre que identificadas condições anormais de operação, alarmes ativos ou indisponibilidades de equipamentos.

3.9.4 Considerações operacionais

A filosofia de operação adotada para o banco de capacitores preserva a configuração original do circuito de comando das chaves de manobra. O sistema de automação foi implementado de forma a atuar em paralelo ao circuito manual existente, sem modificar a arquitetura elétrica do painel de comando.

Os sinais provenientes do CLP são inseridos em paralelo aos comandos locais de abertura e fechamento das chaves a óleo. Dessa forma, tanto a operação manual quanto a automática podem acionar diretamente as bobinas de manobra das chaves.

A alimentação do circuito de comando é proveniente do sistema de serviços auxiliares da subestação, em 220 Vca, o que torna a atuação das chaves independente do estado do disjuntor do alimentador do banco de capacitores. Assim, as manobras podem ser realizadas mesmo com o disjuntor aberto, condição na qual apenas o circuito de potência permanece desenergizado.

Os modos de operação descritos estabelecem a base funcional para o desenvolvimento da lógica de automação do banco de capacitores, cuja arquitetura, critérios de controle e estratégias de atuação são apresentados no capítulo seguinte.

4 Sistema de Automação e Controle

Este capítulo apresenta a implementação do sistema de automação aplicado ao Banco de Capacitores BCP-03, descrevendo a arquitetura adotada, os meios de integração entre medição, supervisão, proteção e controle, bem como a infraestrutura física e de comunicação utilizada para viabilizar a operação automática do banco.

A solução foi desenvolvida de forma integrada à infraestrutura elétrica e de automação existente na subestação, preservando integralmente a filosofia de proteção, medição e operação previamente estabelecida. Dessa forma, a implementação ocorreu sem a necessidade de alterações estruturais nos sistemas de média tensão, concentrando-se na camada de supervisão e controle.

Diferentemente dos capítulos anteriores, nos quais foram apresentados aspectos conceituais e construtivos do sistema elétrico, a abordagem adotada neste capítulo possui caráter aplicado, com foco na descrição da solução de engenharia implementada, seus dispositivos constituintes e suas interfaces operacionais.

4.1 Visão geral da solução de automação adotada

A automação desenvolvida tem como finalidade viabilizar a inserção e a retirada automáticas dos estágios do Banco de Capacitores BCP-03 a partir de medições elétricas disponibilizadas ao sistema de controle.

A arquitetura foi estruturada considerando como premissa a utilização de medições representativas do comportamento elétrico global da instalação. Para isso, adotou-se como variável de controle o fator de potência medido no ponto de entrega da concessionária, localizado no barramento de 69 kV da subestação.

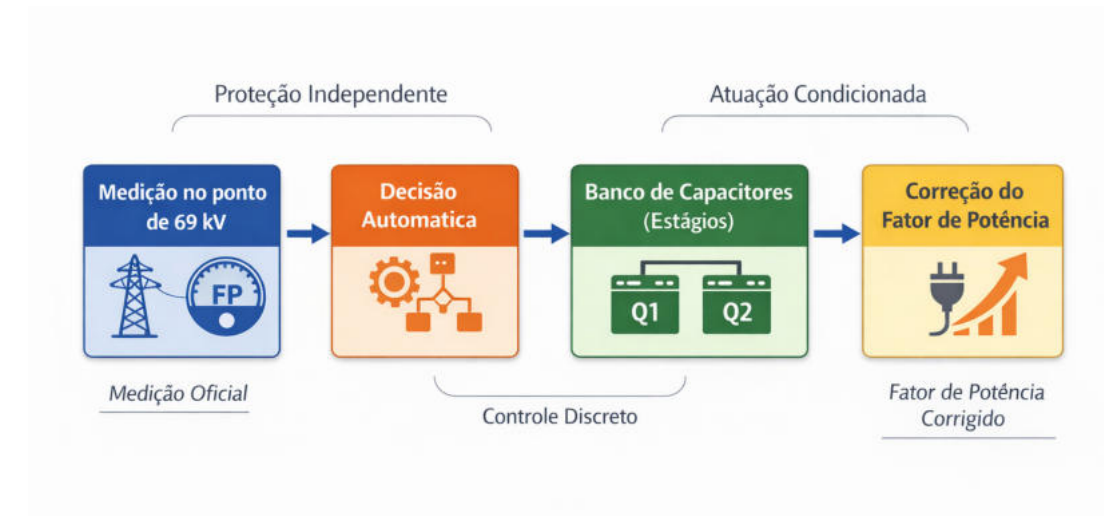
Outra diretriz de projeto consistiu na preservação integral da filosofia de proteção existente. O sistema de automação foi concebido sem qualquer atuação direta sobre o disjuntor do alimentador do banco de capacitores, mantendo o sistema de proteção como elemento soberano da operação elétrica.

De forma funcional, a solução baseia-se na aquisição contínua das medições, no processamento das variáveis em controlador lógico programável e na atuação discreta sobre os estágios capacitivos disponíveis, respeitando permissivas, intertravamentos e estados operacionais do sistema.

A Figura 40 apresenta a arquitetura funcional da solução de automação implementada, evidenciando o fluxo de informações desde a origem das medições até a atuação sobre o Banco de Capacitores BCP-03, bem como a segregação entre os níveis de medição,

supervisão, controle e proteção.

Figura 40 – Arquitetura funcional da solução de automação do Banco de Capacitores BCP-03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Complementando a visão funcional, a Tabela 9 sintetiza as principais premissas consideradas na concepção da solução de automação implementada.

Tabela 9 – Premissas adotadas na solução de automação

Premissa	Descrição
Variável de controle	Fator de potência medido no ponto de entrega (69 kV).
Proteção elétrica	Preservação da filosofia existente, com atuação soberana do relé.
Forma de atuação	Comutação discreta dos estágios capacitivos.
Segurança operacional	Atuação condicionada a permissivas e bloqueios operacionais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

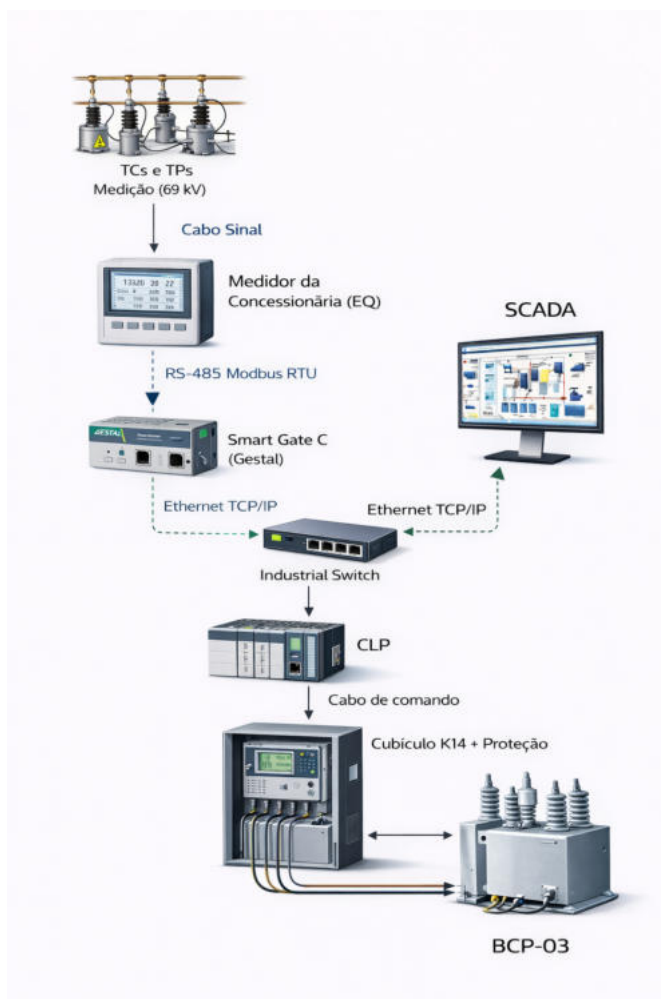
Além da arquitetura funcional, a implementação da automação demandou a integração física e lógica entre dispositivos de medição, concentradores de dados, rede de comunicação industrial, sistema supervisório, controlador lógico programável e elementos de atuação em campo.

A Figura 41 apresenta a arquitetura física e de comunicação do sistema, destacando os meios de transmissão de dados, os protocolos empregados e as interfaces entre supervisão, controle e proteção no contexto da automação do Banco de Capacitores BCP-03.

4.2 Integração da automação com o sistema de proteção

A integração entre o sistema de automação e o sistema de proteção do Banco de Capacitores BCP-03 foi estruturada de modo a preservar integralmente a filosofia

Figura 41 – Arquitetura física e de comunicação da automação do Banco de Capacitores BCP-03



Fonte: Elaborado pelo autor.

de proteção existente do alimentador K14, assegurando que a atuação automática dos estágios capacitivos ocorra de forma supervisionada e subordinada às condições elétricas do circuito.

Do ponto de vista funcional, a proteção do banco permanece associada ao alimentador dedicado, sendo implementada por meio do relé digital instalado no cubículo de média tensão. Esse relé é responsável pela supervisão contínua das grandezas elétricas do circuito e pela atuação direta sobre o disjuntor em condições de falha.

As medições utilizadas pelo sistema de proteção são obtidas localmente, por meio de transformadores de corrente e de potencial instalados na parte interna do cubículo, no próprio barramento de 13,8 kV do alimentador K14. Dessa forma, as grandezas monitoradas correspondem exclusivamente às condições elétricas do circuito que alimenta o Banco de Capacitores BCP-03, não havendo qualquer relação com a medição global do barramento de 69 kV utilizada na lógica de controle do fator de potência.

A partir dessas medições, o relé executa as funções de proteção parametrizadas,

tais como sobrecorrente de fase e de terra, avaliando continuamente a integridade elétrica do alimentador e dos equipamentos a ele conectados.

Quando identificada uma condição de falha, o relé envia comando elétrico de abertura à bobina do disjuntor de média tensão, promovendo a isolação imediata do banco de capacitores. Esse mecanismo garante que correntes anormais não permaneçam circulando pelos estágios capacitivos, preservando a integridade das células, dos indutores de dessintonia e dos dispositivos de manobra.

A Figura 42 apresenta a vista interna do cubículo do alimentador K14, evidenciando o disjuntor de média tensão, os compartimentos funcionais e os elementos associados ao sistema de proteção do circuito.

Figura 42 – Vista interna do cubículo do alimentador K14



Fonte: Elaborado pelo autor.

No contexto da automação implementada, os comandos gerados pelo CLP destinam-se exclusivamente à abertura e ao fechamento das chaves seccionadoras sob carga (CSLs).

Embora o acionamento das bobinas de manobra seja eletricamente independente do estado do disjuntor do alimentador — uma vez que o circuito de comando é alimentado

pelos serviços auxiliares da subestação — a lógica estabelece critérios operacionais que condicionam a execução automática das manobras.

Estados como atuação da proteção ou qualquer condição anormal detectada pelo relé implicam no bloqueio lógico da automação, impedindo a emissão de novos comandos automáticos para o banco de capacitores.

Estabelece-se, portanto, uma hierarquia operacional clara, na qual:

- o sistema de proteção possui prioridade absoluta de atuação;
- a lógica de automação respeita as sinalizações e estados do sistema elétrico;
- os comandos automáticos são emitidos apenas quando atendidos os critérios definidos na estratégia de controle.

Essa filosofia de integração assegura que a modernização implementada não altere a arquitetura elétrica original do circuito de comando, preservando a seletividade, a confiabilidade e a segurança operacional da subestação.

4.3 Disponibilização das medições ao sistema de automação

Para viabilizar a execução do controle automático do Banco de Capacitores BCP-03, foi estabelecida uma infraestrutura dedicada à aquisição e disponibilização das medições elétricas utilizadas pelo sistema de automação.

As grandezas medidas no ponto de entrega da concessionária são registradas em medidor eletrônico de faturamento, responsável pelo armazenamento oficial das variáveis elétricas da instalação. Para utilização dessas informações no ambiente de automação, emprega-se um sistema intermediário de aquisição e integração de dados.

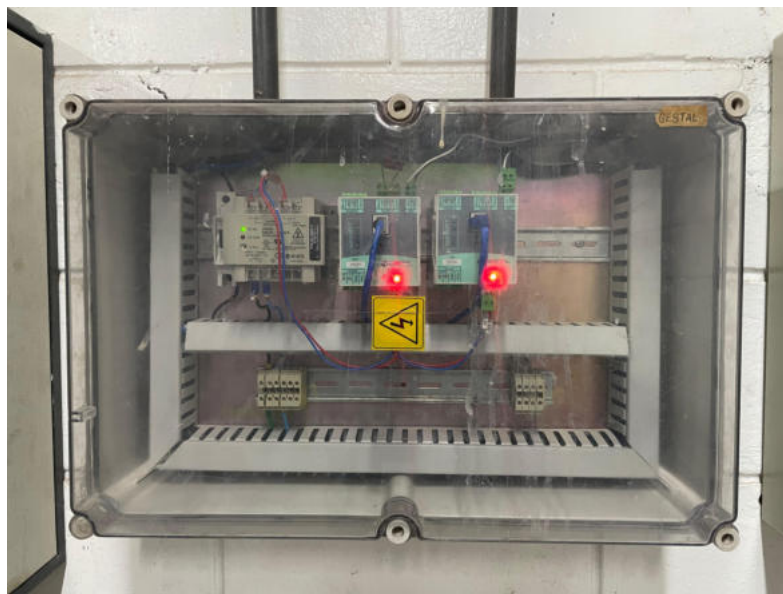
A comunicação entre o medidor e o concentrador Smart Gate C é realizada por meio de protocolo Modbus RS-485. Esse equipamento atua como *gateway* de comunicação, realizando a interface entre o sistema de medição e a rede de automação industrial da planta.

A Figura 43 apresenta o concentrador Smart Gate C instalado na subestação, responsável pela aquisição e disponibilização das medições elétricas ao ambiente de supervisão e controle.

A partir do concentrador, as medições são disponibilizadas em rede Ethernet TCP/IP, sendo distribuídas ao sistema supervisor e aos dispositivos de controle conectados à infraestrutura de comunicação da subestação.

O fluxo completo dessas informações, desde a origem da medição até sua disponibilização ao sistema de automação, é apresentado na Figura 44.

Figura 43 – Smart Gate C utilizado na disponibilização das medições elétricas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 – Fluxo de disponibilização das medições ao sistema de automação



Fonte: Elaborado pelo autor.

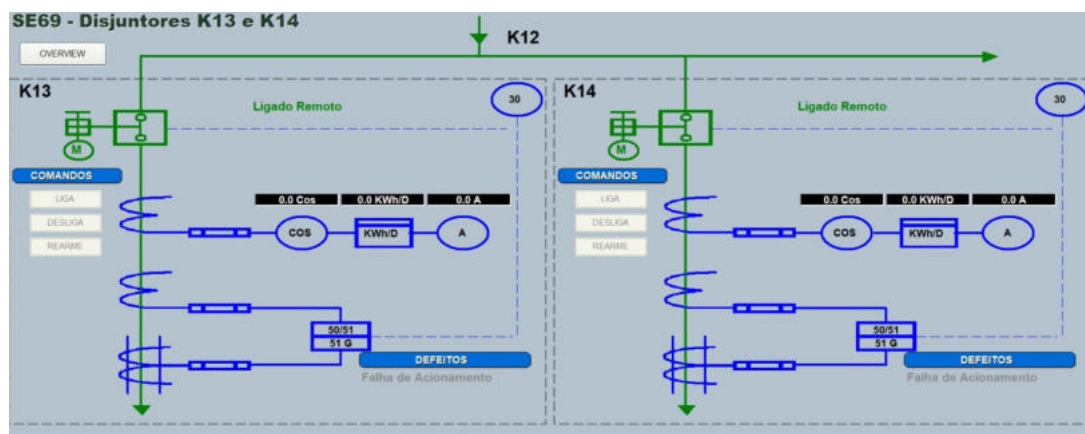
No ambiente supervísório, o sistema SCADA realiza a aquisição, visualização e tratamento das grandezas elétricas disponibilizadas pelo concentrador. Além da supervisão operacional, o sistema é responsável por escrever no CLP as variáveis necessárias à execução da automação, estabelecendo a interface entre medição e controle.

O sistema supervísório adotado pela empresa é o Citect SCADA, da Schneider Electric, plataforma amplamente utilizada em aplicações industriais para supervisão, aquisição de dados e operação remota. No presente trabalho, o sistema é responsável pela visualização das grandezas elétricas, monitoramento do estado dos estágios capacitivos, registro de eventos e disponibilização de informações operacionais ao usuário. A Figura 45 apresenta a interface supervísória utilizada.

A partir da escrita das variáveis no CLP, estabelece-se a base informacional necessária à execução da automação, permitindo que o controlador processe as condições elétricas da instalação e determine a necessidade de inserção ou retirada de estágios capacitivos.

Dessa forma, a infraestrutura de medição e comunicação implantada assegura a integração entre o sistema de faturamento da concessionária e o ambiente de automação industrial, viabilizando a utilização das medições globais da planta como referência para o controle automático do Banco de Capacitores BCP-03.

Figura 45 – Interface supervisória utilizada na supervisão do sistema automatizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Arquitetura de Controle e Execução da Automação

A execução da automação do Banco de Capacitores BCP-03 foi estruturada a partir da utilização de um CLP como elemento central de processamento e comando das manobras associadas aos estágios capacitivos.

A arquitetura implementada integra medições disponibilizadas ao sistema, informações operacionais provenientes da proteção e estados dos dispositivos de campo, permitindo que a atuação automática ocorra de forma coordenada e condicionada às permissivas elétricas do alimentador.

4.4.1 Controlador lógico programável na solução implementada

No arranjo adotado, o CLP está inserido no nível de automação da subestação, sendo responsável pelo processamento das variáveis de entrada e pela geração dos comandos de inserção e retirada dos estágios do banco de capacitores.

Sua atuação restringe-se ao nível de controle, não executando funções de proteção nem realizando medições elétricas diretas. As informações necessárias à execução da automação são recebidas por meio do sistema supervisório e dos sinais de campo integrados à lógica de controle.

4.4.2 Plataforma de hardware e módulos de automação

A execução física da automação é realizada por meio de CLP Allen-Bradley da família ControlLogix, já pertencente à infraestrutura de automação da subestação. A utilização de controlador existente permitiu a implementação da solução sem modificações estruturais no sistema de controle da planta.

O equipamento encontra-se instalado em rack dedicado no painel de automação, juntamente com módulos de comunicação e de entrada e saída responsáveis pela interface

com supervisão, proteção e dispositivos de campo.

A Figura 46 apresenta o controlador empregado na automação.

Figura 46 – Controlador Lógico Programável ControlLogix utilizado no projeto



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2.1 Unidade Central de Processamento

A execução da lógica de automação é realizada pela Unidade Central de Processamento (CPU) instalada no rack principal do CLP. Essa unidade executa ciclicamente o programa de controle, processando as variáveis de entrada e atualizando os estados das saídas digitais destinadas aos circuitos de comando. A Figura 47 apresenta a CPU utilizada no sistema.

4.4.2.2 Comunicação com sistemas superiores

A integração entre o CLP e os sistemas de supervisão é realizada por meio de módulo de comunicação Ethernet/IP, responsável pela troca de dados com o sistema SCADA e demais plataformas conectadas à rede industrial da subestação.

Esse módulo viabiliza a atualização contínua das variáveis operacionais necessárias à automação, bem como o envio de estados e alarmes ao ambiente supervisor.

A Figura 48 apresenta o módulo de comunicação utilizado.

4.4.2.3 Módulos de entrada digital

Os sinais provenientes do campo são adquiridos por módulos de entrada digital, responsáveis pela leitura das permissivas operacionais da automação.

Figura 47 – CPU do CLP ControlLogix



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 – Módulo de comunicação Ethernet/IP utilizado no sistema



Fonte: Fabricante (imagem ilustrativa).

Entre os principais sinais monitorados destacam-se:

- estado do disjuntor do alimentador K14;
- indicações de atuação da proteção;
- estados das chaves capacitivas;
- sinais de falha e intertravamentos.

A Figura 49 apresenta o módulo empregado na aquisição desses sinais.

Figura 49 – Módulo de entrada digital utilizado no sistema



Fonte: Fabricante (imagem ilustrativa).

4.4.2.4 Módulos de saída digital

Os comandos de manobra são enviados por meio de módulos de saída digital, responsáveis pelo acionamento dos circuitos auxiliares das chaves capacitivas.

Os comandos são realizados por pulsos temporizados, evitando energização contínua das bobinas de acionamento e reduzindo esforços mecânicos sobre os dispositivos de manobra.

A Figura 50 apresenta o módulo de saída digital utilizado.

Figura 50 – Módulo de saída digital utilizado no sistema



Fonte: Fabricante (imagem ilustrativa).

4.4.3 Interface com o sistema supervisor

A interação entre operador e sistema automatizado ocorre por meio do sistema supervisor da planta, responsável pela visualização das grandezas elétricas, estados

operacionais e alarmes associados ao Banco de Capacitores BCP-03.

Comandos remotos, quando habilitados, são enviados ao CLP, que executa a validação das permissivas antes da atuação física sobre os dispositivos de campo.

4.4.4 Sinais de entrada e saída da automação

Para execução da lógica de controle, o CLP processa variáveis provenientes dos sistemas de medição, proteção e campo, destacando-se:

- fator de potência disponibilizado ao sistema;
- estado do disjuntor do alimentador;
- indicações da proteção;
- estados das chaves capacitivas.

Como saídas, são gerados comandos digitais destinados à inserção e retirada dos estágios capacitivos, respeitando intertravamentos e temporizações definidos na lógica de controle.

4.5 Implementação física e infraestrutura de campo

A implantação da automação do Banco de Capacitores BCP-03 demandou a implementação de interfaces físicas entre o sistema de controle e os circuitos de comando e sinalização das chaves de manobra existentes no painel do banco. Essa etapa teve como objetivo viabilizar a atuação automática dos estágios capacitivos, preservando simultaneamente a filosofia operacional original do sistema e os requisitos de segurança elétrica da subestação.

As adequações realizadas abrangeram os circuitos de comando, os circuitos de realimentação de posição, os dispositivos de habilitação da automação e a infraestrutura de interligação entre o painel de automação e os equipamentos de campo.

4.5.1 Filosofia e nível de tensão dos circuitos de comando

Os circuitos de acionamento das chaves de manobra do banco de capacitores operam em tensão auxiliar de 220 Vca, proveniente do sistema de serviços auxiliares da subestação. Essa tensão é empregada na energização das bobinas de fechamento e abertura das chaves a óleo responsáveis pela inserção e retirada dos estágios capacitivos.

A automação foi concebida de modo que o CLP atuasse exclusivamente como elemento de comando lógico, utilizando contatos de saída para permitir ou interromper a

passagem da tensão auxiliar já existente no circuito original. Dessa forma, o controlador não constitui a fonte de alimentação das bobinas, mas sim o elemento responsável pela liberação do circuito de acionamento.

Essa filosofia preserva a arquitetura elétrica original do sistema, mantém a possibilidade de operação manual e assegura segregação funcional entre a lógica de controle e os circuitos de potência de comando.

4.5.2 Habilitação física da automação

A disponibilização da tensão de comando para atuação automática é condicionada ao fechamento do dispositivo auxiliar identificado como K14. Esse elemento atua simultaneamente como proteção do circuito de comando e como chave de habilitação física da automação, permitindo ou impedindo a atuação do sistema automático sobre os circuitos de manobra.

Quando K14 encontra-se aberto, a tensão auxiliar de 220 Vca não é disponibilizada ao circuito de comando automatizado, impossibilitando a energização das bobinas de abertura e fechamento das chaves capacitivas, independentemente dos comandos emitidos pela lógica do CLP. Nessa condição, a automação permanece fisicamente bloqueada, embora a lógica de controle continue operacional.

Essa configuração estabelece uma camada adicional de segurança, permitindo a inibição completa da atuação automática por meio de intervenção direta no painel, sem necessidade de alteração na programação do controlador.

A Figura 51 apresenta o dispositivo responsável pela habilitação física do circuito automático.

Figura 51 – Disjuntor auxiliar de habilitação da automação (K14)



Fonte: Elaborado pelo autor.

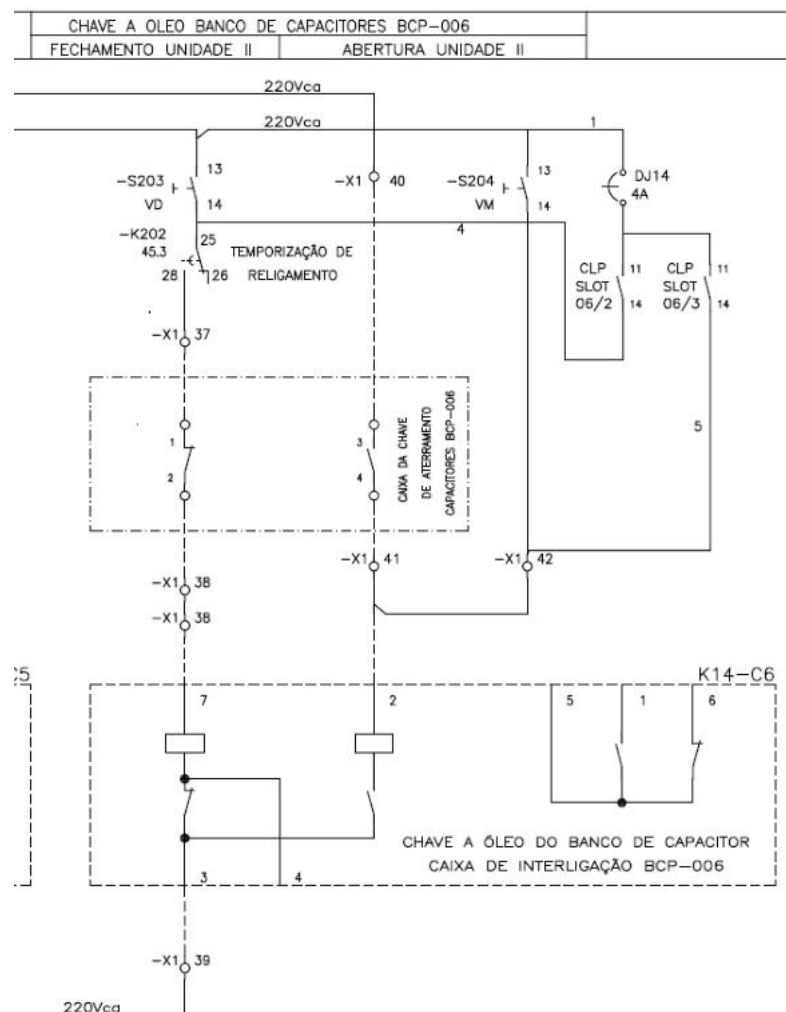
4.5.3 Interface de comando automático

A inserção da automação nos circuitos de manobra foi realizada por meio da interligação das saídas digitais do CLP diretamente aos circuitos de comando das bobinas de fechamento e abertura das chaves, em paralelo aos comandos manuais existentes por botoeiras locais.

Dessa forma, as saídas do CLP passam a desempenhar a função de comando remoto, atuando eletricamente como contatos de acionamento equivalentes às botoeiras de campo, sem alteração da lógica original de potência do circuito.

A Figura 52 apresenta o diagrama de interligação entre as saídas do CLP e o circuito de comando das chaves, evidenciando a inserção do comando automático em paralelo ao comando manual.

Figura 52 – Interface de comando automático em paralelo ao comando manual



Fonte: Documentação técnica da planta, atualizada pelo autor.

Essa configuração garante que a operação manual permaneça disponível, permitindo a atuação local independentemente da lógica implementada no CLP. Ressalta-se, entretanto,

que o comando manual permanece sujeito às proteções e temporizações físicas existentes no circuito original, incluindo a temporização de religamento do estágio.

4.5.4 Caminho elétrico do comando

O percurso funcional do comando automático pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. derivação da tensão de 220 Vca do sistema de serviços auxiliares;
2. habilitação do circuito por meio do disjuntor K14;
3. passagem pelas proteções e temporizações físicas existentes no circuito, incluindo o contato associado à temporização de religamento (K202);
4. fechamento do contato de saída digital do CLP, inserido em paralelo à botoeira de comando manual;
5. energização da bobina de fechamento ou abertura da chave;
6. realização da manobra mecânica do estágio capacitivo.

De forma mais específica, quando a lógica de controle determina a inserção de um estágio, o contato de saída correspondente do CLP é fechado, permitindo a energização da bobina de fechamento por meio do circuito auxiliar existente. De maneira análoga, quando é comandada a retirada do estágio, o contato de saída atua sobre o circuito de trip da chave, energizando a bobina de abertura e promovendo a desenergização mecânica do estágio capacitivo.

Não há utilização de contato de selo elétrico externo, uma vez que a sustentação da posição da chave é garantida pelo próprio mecanismo interno do equipamento, sendo o comando aplicado sob a forma de pulso temporizado.

O ponto de interligação identificado como X1.42 corresponde a um dos bornes de interface entre o painel de automação e a caixa de interligação da chave do Banco de Capacitores BCP-006, representando o elo físico de passagem do sinal de comando proveniente da saída digital do CLP para o circuito auxiliar de acionamento do equipamento de campo.

4.5.5 Infraestrutura de borneiras e interligação

A interligação elétrica entre o painel de automação e os equipamentos de campo foi realizada por meio de borneiras de interface montadas em trilhos DIN.

Figura 53 – Infraestrutura de borneiras e interligação dos circuitos de automação



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 53 apresenta a infraestrutura implementada, composta por régulas de bornes numeradas destinadas à distribuição dos circuitos de comando e sinalização.

Por meio dessas borneiras são encaminhados os sinais de comando provenientes das saídas do CLP, bem como os retornos de posição das chaves de manobra e demais sinais auxiliares necessários à operação do sistema. A padronização e numeração sequencial dos bornes asseguram rastreabilidade entre o diagrama elétrico, o painel físico e a programação do controlador.

4.5.6 Interface de realimentação de posição

Para monitoramento das posições das chaves de manobra foram implementados circuitos de realimentação baseados em relés auxiliares de interfaceamento.

Para cada estágio capacitivo foram utilizados dois relés auxiliares, correspondentes às indicações de chave aberta e chave fechada, totalizando quatro relés para os dois estágios do banco.

Esses dispositivos recebem os sinais provenientes dos contatos auxiliares das chaves à óleo e os convertem em contatos secos padronizados para leitura pelas entradas digitais do CLP, promovendo isolamento galvânico entre os circuitos de campo em 220 Vca e as entradas digitais do CLP, além de aumentar a robustez e confiabilidade na aquisição dos estados operacionais.

A Figura 54 apresenta os relés auxiliares instalados no painel de automação.

Complementando a infraestrutura de realimentação apresentada anteriormente, a

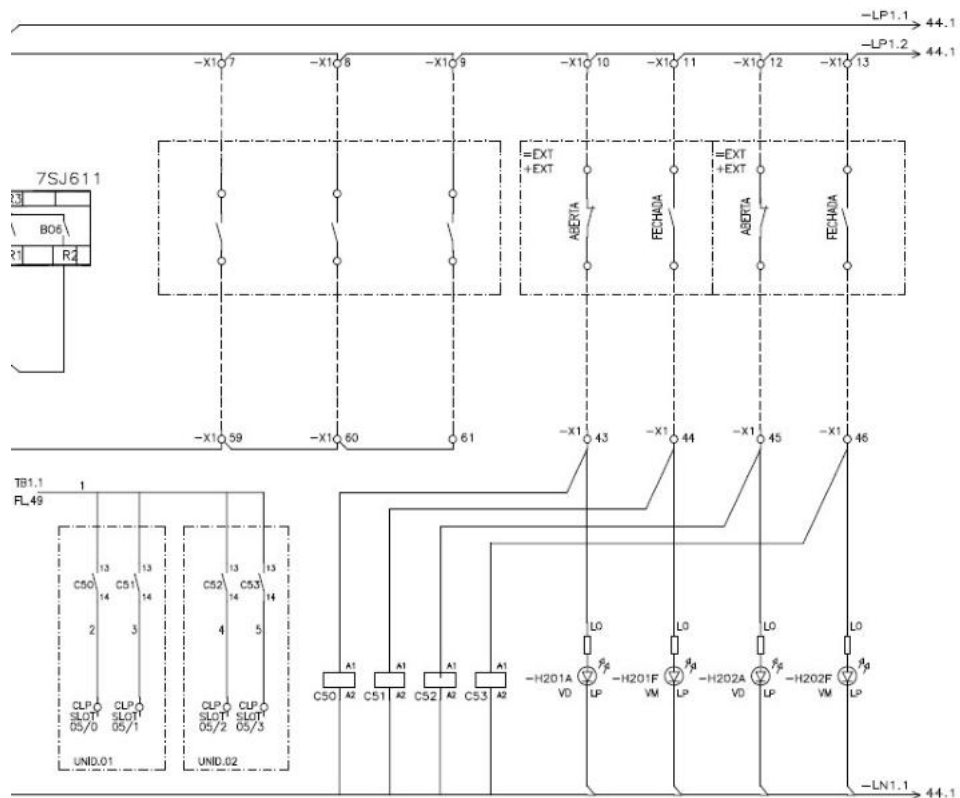
Figura 54 – Relés auxiliares de interface para realimentação de posição



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 apresenta o diagrama funcional de interligação dos relés auxiliares responsáveis pela interface dos sinais de posição das chaves de manobra.

Figura 55 – Diagrama de interligação dos relés auxiliares de retorno de posição



Fonte: Documentação técnica da planta, atualizada pelo autor.

Os sinais provenientes dos contatos auxiliares das chaves, correspondentes às indicações de posição aberta e fechada de cada estágio capacitivo, são encaminhados às borneiras de interface identificadas no painel e, posteriormente, às bobinas dos relés auxiliares designados para essa finalidade.

Quando ocorre a mudança de posição da chave, o contato auxiliar correspondente é acionado, energizando o relé intermediário, cuja comutação gera um contato seco padronizado encaminhado às entradas digitais do CLP.

Ressalta-se que esses relés não participam dos circuitos de comando das bobinas de abertura ou fechamento das chaves, sendo utilizados exclusivamente para realimentação de posição e validação das manobras executadas.

4.5.7 Integração funcional da infraestrutura implantada

A infraestrutura física implementada estabeleceu a integração elétrica entre o sistema de automação e os equipamentos de campo, permitindo que o CLP realizasse comandos automáticos e simultaneamente validasse a execução das manobras por meio dos sinais de retorno de posição.

Essa arquitetura possibilita:

- comando automático de inserção e retirada dos estágios;
- confirmação elétrica das manobras executadas;
- implementação de intertravamentos baseados em posição;
- detecção de falhas de acionamento;
- bloqueio de atuações indevidas.

A partir da infraestrutura implantada estabelece-se o fluxo funcional completo da automação: o fator de potência medido no ponto de entrega é processado pelo CLP, que, quando satisfeitas as permissivas operacionais, atua por meio de saídas digitais inseridas em paralelo aos comandos manuais, energizando os circuitos de manobra das chaves. As posições resultantes são então realimentadas ao sistema por meio dos relés auxiliares de interface, permitindo a validação elétrica das manobras e a implementação de intertravamentos baseados em posição.

Dessa forma, a automação foi integrada ao sistema elétrico existente de maneira segura, supervisionada e compatível com a filosofia operacional da instalação, constituindo a base física necessária para a implementação da lógica de controle descrita no Capítulo 5.

5 Estratégia de Controle e Implementação da Automação do Banco de Capacitores

Este capítulo apresenta a estratégia de controle e a implementação da automação do Banco de Capacitores BCP-03, constituindo a etapa central da solução desenvolvida. São descritos os critérios técnicos adotados para a comutação automática dos estágios capacitivos e a estrutura lógica implementada no CLP para o controle do fator de potência da instalação.

A automação foi estruturada segundo um modelo de controle discreto, organizado em rotinas de aquisição de dados, processamento lógico, tomada de decisão e execução de comandos. O algoritmo contempla temporizações operacionais, aplicação de histerese no controle do fator de potência, intertravamentos de segurança e verificação de estado dos dispositivos de manobra.

Para fins de apresentação, o detalhamento refere-se ao estágio BCP-006. O estágio BCP-007 segue a mesma filosofia, diferenciando-se apenas pelos parâmetros de atuação e pelo endereçamento dos sinais.

5.1 Filosofia Geral de Controle

A estratégia de controle do banco de capacitores é estruturada em malha fechada, tendo o fator de potência como variável de realimentação. O valor medido é continuamente adquirido e processado pelo CLP, que executa a lógica de decisão responsável pela comutação dos estágios capacitivos.

A arquitetura funcional do sistema é apresentada na Figura 56. Observa-se que essa grandeza elétrica atua como sinal de entrada do bloco decisório, no qual são aplicados critérios lógicos, temporizações e permissivos operacionais antes da emissão dos comandos.

Figura 56 – Diagrama de blocos do sistema de controle automático do fator de potência



Fonte: Elaborado pelo autor.

A atuação baseia-se na comparação entre o valor instantâneo e limites pré-definidos. Para garantir estabilidade, adota-se histerese por meio da definição de valores distintos

para inserção e retirada dos estágios, estabelecendo uma faixa operacional que reduz comutações sucessivas causadas por variações naturais da carga.

A compensação reativa ocorre exclusivamente por comutação discreta de estágios completos, não sendo empregado controle contínuo ou proporcional, em conformidade com as características construtivas do banco instalado.

5.2 Parâmetros Gerais da Estratégia de Controle

Os parâmetros operacionais da lógica foram definidos com base nas condições elétricas observadas na planta, nas recomendações da concessionária e nas limitações construtivas dos dispositivos de manobra empregados nos estágios capacitivos.

A síntese dos ajustes adotados é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros operacionais gerais da lógica de controle

Parâmetro	BCP-006	BCP-007
FP para inserção	0,927	0,935
FP para retirada	0,998	0,990
Tempo de validação	60 s	60 s
Tempo mínimo de religamento	5 min	5 min
Tempo de pulso de comando	3 s	3 s
Tempo de detecção de falha	3 s	3 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

A parametrização estabelece atuação escalonada entre os estágios, evitando inserções simultâneas e assegurando estabilidade frente às variações naturais do perfil de carga da instalação.

5.3 Arquitetura do Programa no CLP

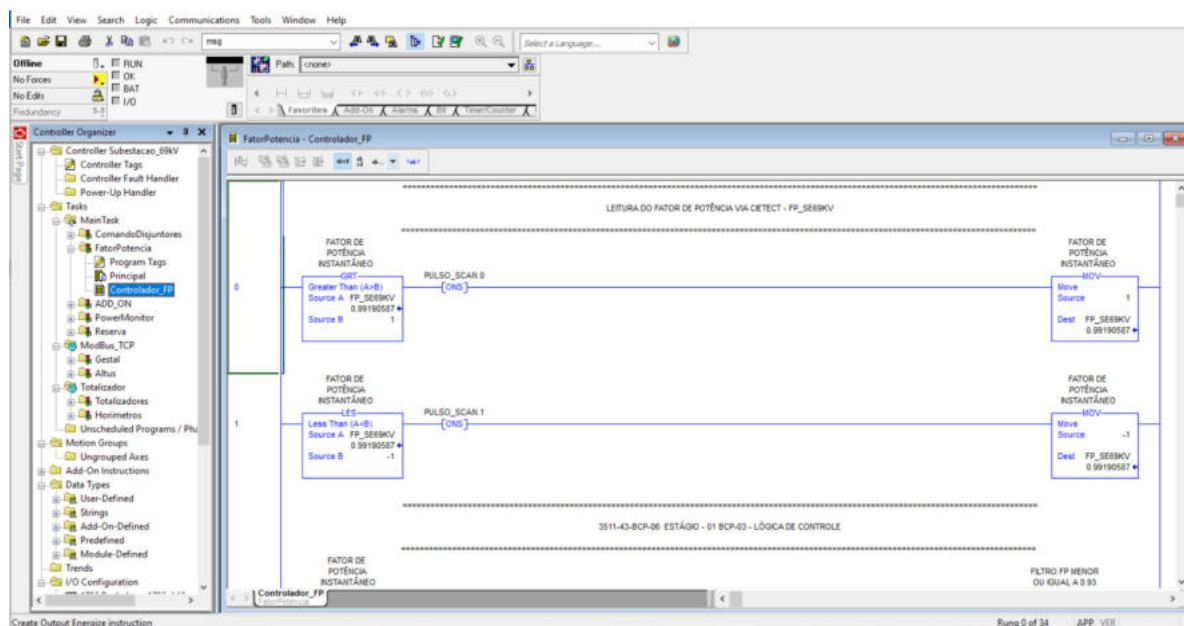
A lógica foi implementada em CLP segundo arquitetura modular, estruturada para garantir organização funcional, rastreabilidade operacional e facilidade de manutenção. A programação foi desenvolvida em linguagem Ladder, distribuída em rotinas dedicadas às etapas de aquisição da variável de controle, tomada de decisão, aplicação de temporizações, validação de permissivas internas, detecção de falhas e geração de comandos de manobra.

A implementação foi realizada no ambiente RSLogix 500, cuja interface é apresentada na Figura 57. Observa-se a organização hierárquica das rotinas, arquivos de dados e estrutura modular adotada, evidenciando a segmentação funcional da lógica de controle.

5.3.1 Estrutura organizacional das rotinas

A organização funcional das rotinas é apresentada na Tabela 11, contemplando os principais blocos de execução responsáveis pela operação automática do banco de

Figura 57 – Ambiente de programação da lógica de controle no RSLogix 500



Fonte: Elaborado pelo autor.

capacitores.

Tabela 11 – Organização das rotinas da lógica de controle no CLP

Rotina	Função principal
Aquisição do fator de potência	Leitura, validação e tratamento do valor proveniente do sistema de medição
Decisão de inserção/retirada	Avaliação dos critérios de atuação dos estágios capacitivos
Temporizações operacionais	Aplicação de tempos de estabilidade e proteção de manobra
Permissivas e bloqueios lógicos	Validação das condições internas para liberação das manobras automáticas
Detecção de falhas	Identificação de falhas de acionamento e bloqueio de estágios
Comandos de manobra	Geração dos pulsos de abertura e fechamento
Supervisão e sinalização	Atualização de estados operacionais e envio de informações ao sistema supervisor

Fonte: Elaborado pelo autor.

A segmentação da programação em rotinas independentes proporciona maior clareza estrutural, simplifica procedimentos de teste e comissionamento e facilita intervenções de manutenção corretiva ou evolutiva na lógica implementada.

5.3.2 Ciclo de varredura da lógica

A lógica de controle é executada de forma cíclica, conforme o ciclo de varredura (scan cycle) da CPU do CLP ControlLogix, da Rockwell Automation. Nesse modelo de processamento, a execução ocorre por meio de tarefas configuráveis, nas quais a CPU realiza sequencialmente a leitura das entradas, o processamento da lógica programada e a atualização das saídas.

No sistema implementado, a lógica foi inserida em tarefa de execução contínua, apresentando tempo de varredura da ordem de poucos milissegundos, valor significativamente inferior às temporizações estabelecidas para a inserção e retirada dos estágios capacitivos. Dessa forma, as decisões de controle são processadas de maneira praticamente instantânea frente à dinâmica do fator de potência da instalação.

Durante cada ciclo, o controlador realiza a leitura do fator de potência e das demais variáveis de supervisão, verifica permissivas internas e condições de bloqueio, aplica os critérios de decisão definidos na estratégia de controle e atualiza os estados internos da lógica, incluindo temporizadores e sinalizações de status.

A natureza cíclica dessa execução assegura monitoramento contínuo do perfil de carga da planta, permitindo que a comutação dos estágios capacitivos seja ajustada de forma consistente e estável às condições operacionais observadas.

5.3.3 Endereçamento e organização dos sinais

Os sinais utilizados na lógica de controle foram organizados segundo um critério de endereçamento funcional no CLP, contemplando variáveis analógicas, entradas digitais, permissivas internas, estados operacionais e saídas de comando.

Essa padronização contribui para a rastreabilidade da lógica, simplifica diagnósticos em campo e facilita atividades de manutenção e eventual expansão do sistema automatizado. A classificação funcional desses sinais é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Classificação funcional dos sinais utilizados na lógica

Tipo de sinal	Descrição
Variáveis analógicas	Fator de potência da barra
Entradas digitais	Feedbacks de posição dos estágios
Permissivas internas	Condições lógicas de habilitação
Estados operacionais	Indicação de funcionamento do estágio
Saídas digitais	Comandos de liga e desliga

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.4 Mapeamento de entradas e saídas digitais

Além da classificação funcional, foi realizado o mapeamento físico dos pontos de entrada e saída empregados na automação do Banco de Capacitores BCP-03, estabelecendo a correspondência entre o endereçamento lógico no CLP e os dispositivos de campo associados a cada estágio capacitivo.

Esse mapeamento assegura rastreabilidade entre a lógica implementada, os módulos de I/O do controlador e os circuitos auxiliares de comando, facilitando diagnósticos operacionais e intervenções de manutenção.

A relação dos principais pontos digitais utilizados na automação é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Mapeamento de entradas e saídas digitais do Banco de Capacitores BCP-03

Endereço no CLP	Descrição do sinal
<i>Saídas digitais</i>	
Local:6:O.Data.0	BCP-006 — Comando de liga
Local:6:O.Data.1	BCP-006 — Comando de desliga
Local:6:O.Data.2	BCP-007 — Comando de liga
Local:6:O.Data.3	BCP-007 — Comando de desliga
<i>Entradas digitais</i>	
Local:5:I.Data.0	BCP-006 — Indicação desligado
Local:5:I.Data.1	BCP-006 — Indicação ligado
Local:5:I.Data.2	BCP-007 — Indicação desligado
Local:5:I.Data.3	BCP-007 — Indicação ligado

Fonte: Elaborado pelo autor.

As saídas digitais são responsáveis pelo envio de pulsos temporizados aos circuitos auxiliares de acionamento das chaves capacitivas, enquanto as entradas digitais correspondem aos contatos auxiliares de posição utilizados para confirmação de estado, validação das manobras e supervisão de falhas de acionamento.

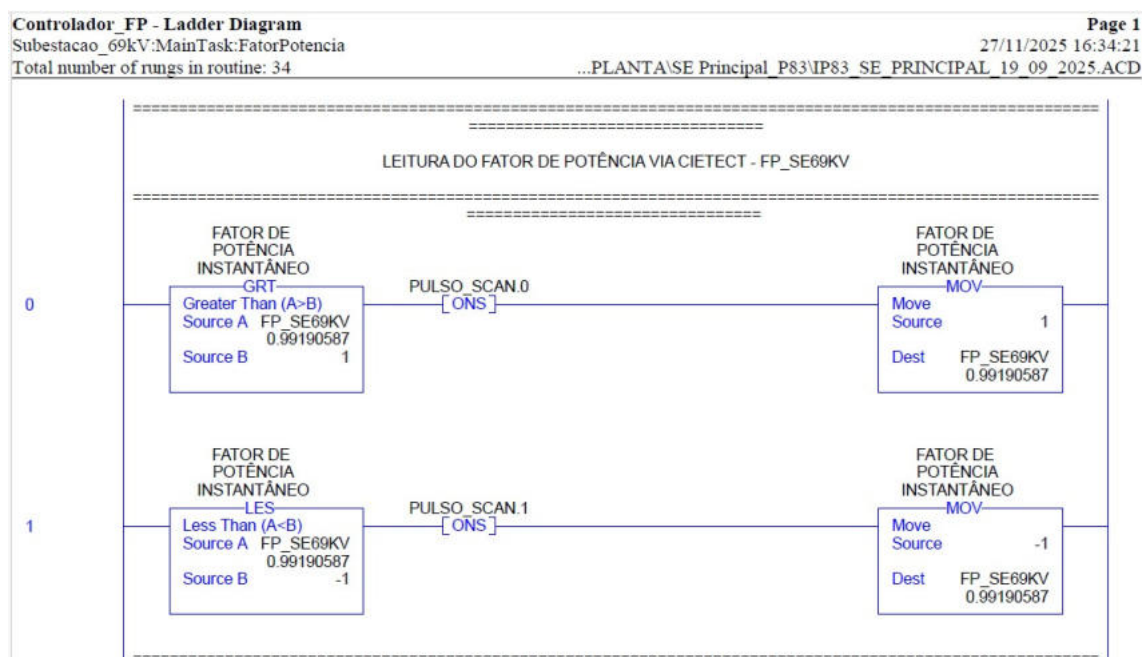
5.4 Aquisição e Tratamento da Variável de Controle

A etapa inicial da lógica de automação corresponde à aquisição e ao tratamento da variável de controle empregada na estratégia de compensação reativa, representada pelo fator de potência global da instalação e disponibilizada ao CLP pelo sistema supervisor.

A Figura 58 apresenta o trecho da programação Ladder responsável pela leitura do valor medido e pelas rotinas de tratamento aplicadas à variável antes de sua utilização na lógica decisória.

A variável FP_SE69KV é inicialmente submetida a instruções de comparação analógica do tipo *GRT* (Greater Than) e *LES* (Less Than), responsáveis por verificar se o valor recebido ultrapassa os limites físicos admissíveis do fator de potência.

Figura 58 – Lógica Ladder de aquisição e tratamento do fator de potência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso o valor instantâneo seja superior a 1 ou inferior a -1, a lógica força sua normalização para o respectivo limite por meio de instruções do tipo *MOV* (Move), garantindo que a variável permaneça restrita ao intervalo válido de operação.

As instruções *ONS* (One Shot) são empregadas para assegurar que a normalização ocorra apenas uma vez por ciclo lógico, evitando reescritas contínuas da variável durante a permanência da condição de saturação.

Após esse tratamento inicial, o valor do fator de potência é disponibilizado às rotinas subsequentes de decisão e temporização, assegurando que a lógica de controle opere exclusivamente com dados coerentes e dentro da faixa operacional esperada.

Essa etapa funciona como um mecanismo de condicionamento da variável de entrada, promovendo maior robustez ao processo de decisão da automação.

5.5 Critério de Decisão para Inserção e Retirada

Com a variável de controle devidamente adquirida e condicionada, a lógica aplica os critérios de inserção e retirada dos estágios capacitivos do Banco de Capacitores BCP-03.

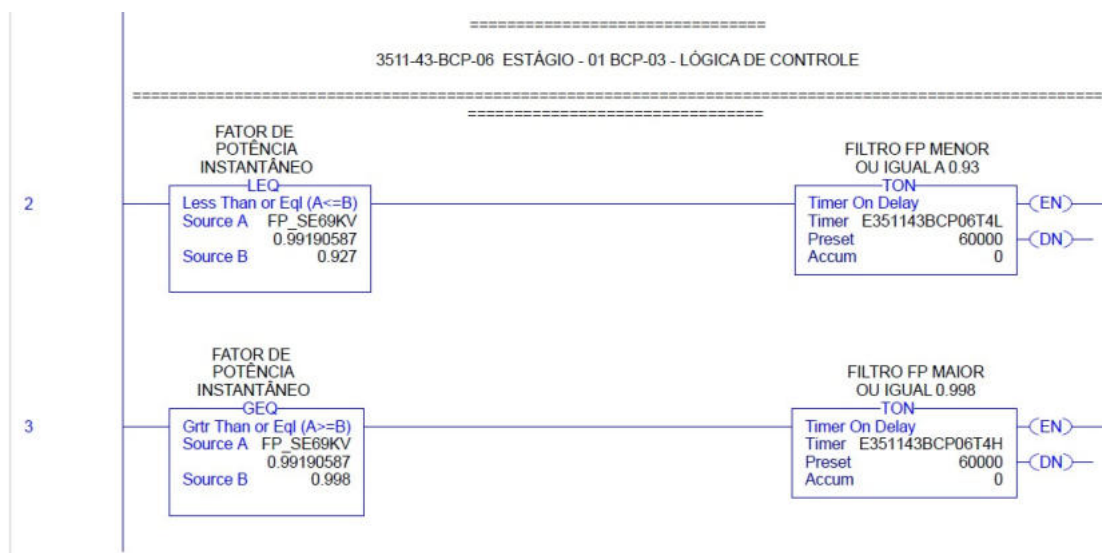
Os limites operacionais de fator de potência e os respectivos tempos de validação adotados foram apresentados na Tabela 10. A decisão baseia-se na comparação do valor instantâneo do fator de potência com os limites configurados para cada estágio.

Para o estágio BCP-006, a inserção é autorizada quando o fator de potência torna-se menor ou igual a 0,927, enquanto a retirada ocorre quando o valor atinge ou supera 0,998.

O estágio BCP-007 segue a mesma estrutura lógica, com valores de atuação próprios.

A implementação do critério decisório é apresentada na Figura 59. A condição somente é considerada válida após permanecer estável durante 60 s, por meio de temporização associada à comparação. Somente após a conclusão do respectivo temporizador é que a lógica libera a autorização para as etapas subsequentes de manobra.

Figura 59 – Lógica Ladder de aplicação dos limites de fator de potência e validação temporal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse mecanismo de comparação associado a validação temporal constitui o núcleo funcional da estratégia de controle implementada.

5.6 Temporizações de Manobra e Proteção Operacional

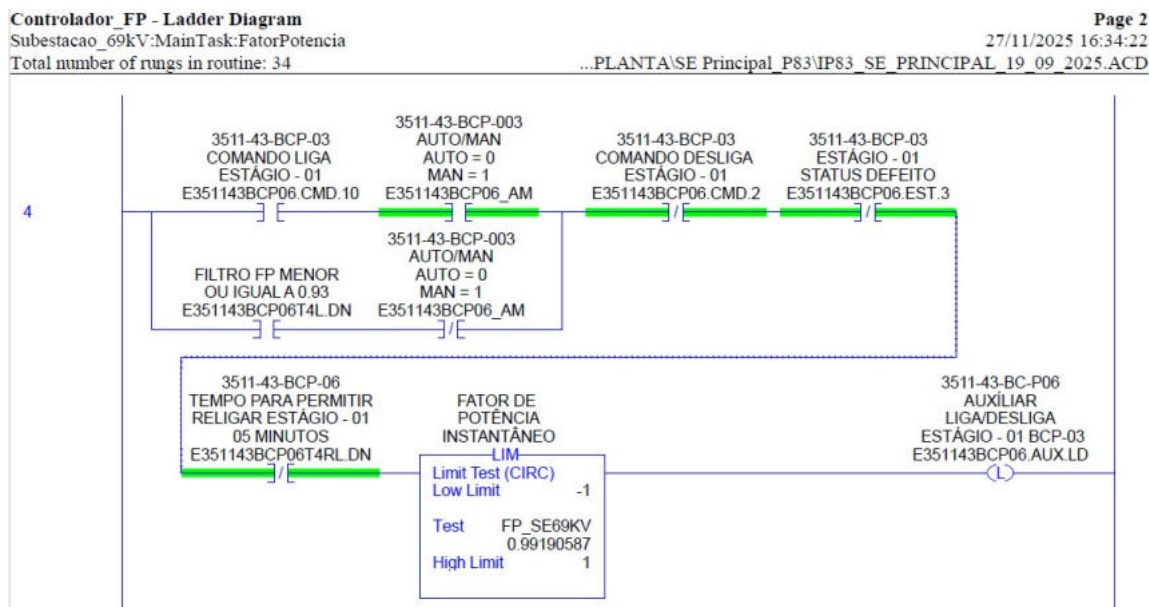
Complementando o critério de decisão baseado no fator de potência, a lógica incorpora mecanismos adicionais destinados à proteção mecânica dos dispositivos de manobra e à consolidação das condições necessárias para liberação da manobra automática.

A Figura 60 apresenta o trecho da programação Ladder responsável pela habilitação da variável auxiliar de liberação (AUX_LD) do Estágio BCP-006.

Após a retirada do estágio, é iniciado um temporizador de bloqueio com duração mínima de 5 minutos, impedindo nova tentativa de inserção automática durante esse intervalo. Essa temporização visa permitir a dissipação das cargas residuais nos elementos capacitivos e evitar ciclos sucessivos de manobra incompatíveis com as características construtivas das chaves.

A habilitação da variável auxiliar ocorre somente quando, além da conclusão do tempo de religamento, permanecem válidas as condições previamente estabelecidas no

Figura 60 – Lógica Ladder de consolidação de permissivas e temporização de religamento do Estágio BCP-006



Fonte: Elaborado pelo autor.

critério decisório e nas permissivas internas da automação, incluindo modo automático ativo, ausência de falha do estágio e inexistência de comando oposto ativo.

Adicionalmente, é realizada verificação de faixa válida da variável de fator de potência antes da liberação da manobra, assegurando coerência da informação utilizada pela lógica.

Somente após a consolidação simultânea dessas condições é que o estágio é considerado apto para nova atuação automática.

Essa estrutura garante compatibilidade entre a estratégia de controle e as limitações físicas dos equipamentos, aumentando a confiabilidade operacional do sistema de compensação reativa.

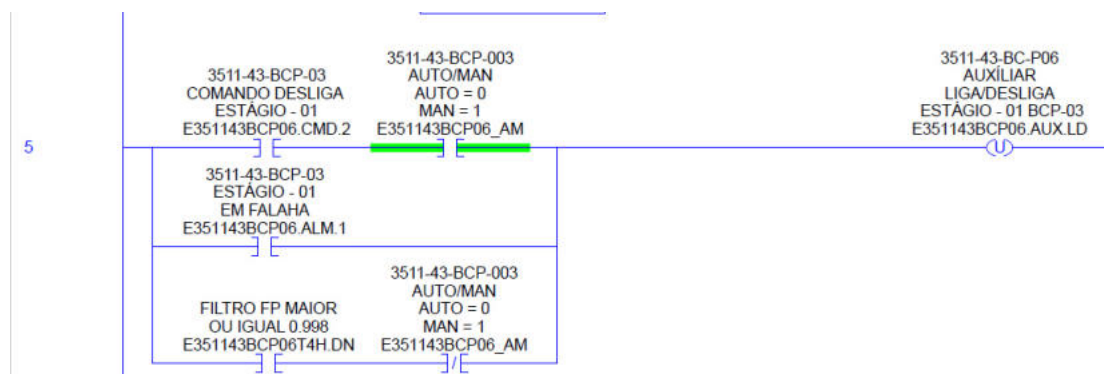
5.7 Permissivas Operacionais e Liberação da Lógica de Manobra

As permissivas operacionais correspondem ao conjunto de condições internas que devem estar simultaneamente satisfeitas para que a lógica autorize a execução das manobras automáticas dos estágios capacitivos.

Diferentemente do critério decisório baseado no fator de potência, as permissivas não determinam *quando* o estágio deve atuar, mas sim *se* ele está apto a atuar naquele instante, sob o ponto de vista lógico e operacional.

A Figura 61 apresenta o trecho da programação Ladder responsável pela verificação dessas condições no Estágio BCP-006.

Figura 61 – Lógica Ladder de verificação das permissivas operacionais do Estágio BCP-006



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre as principais permissivas avaliadas destacam-se:

- inexistência de comando oposto ativo;
- modo de operação selecionado em automático;
- ausência de sinalização de falha do estágio.

Somente quando essas condições permanecem válidas é que a sequência lógica de manobra pode prosseguir, em conjunto com os demais critérios previamente estabelecidos.

Essa estrutura de permissivas constitui uma camada de validação lógica que garante coerência operacional, prevenindo comandos conflitantes e assegurando que a automação atue apenas em condições apropriadas.

5.8 Geração dos Comandos de Manobra

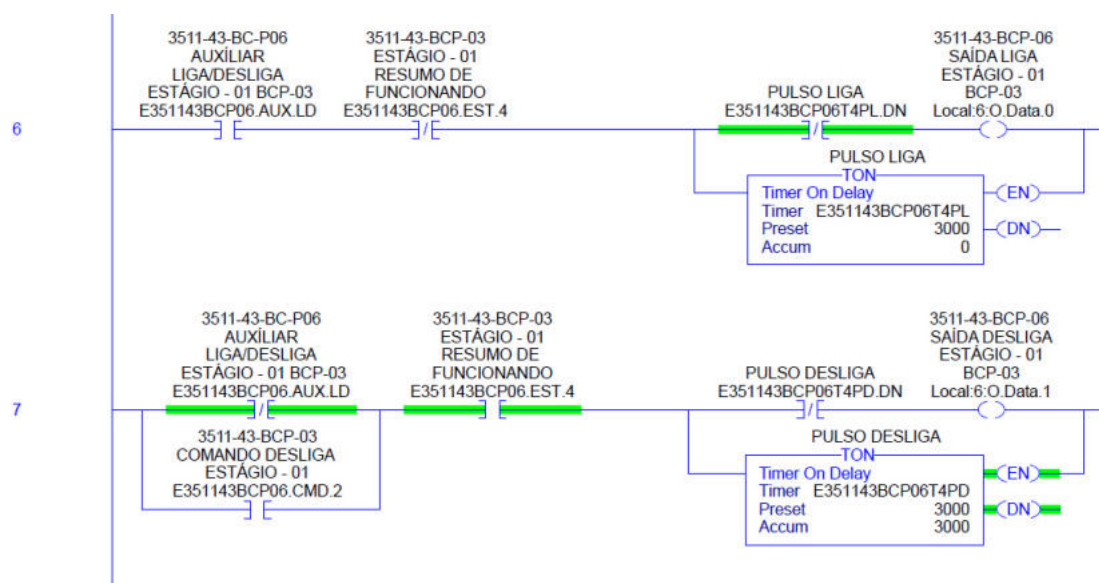
Após a consolidação dos critérios de decisão e das permissivas internas, a lógica executa a etapa de geração dos comandos responsáveis pela inserção ou retirada dos estágios capacitivos.

Nessa etapa, as saídas digitais do CLP realizam o chaveamento do circuito de comando em 220 Vca associado às bobinas de abertura e fechamento das chaves capacitivas. O fechamento do contato de saída libera a alimentação do circuito auxiliar correspondente, permitindo a execução física da manobra.

A Figura 62 apresenta o trecho da programação Ladder responsável pela geração dos pulsos de liga e desliga do Estágio BCP-006.

Quando habilitada a variável auxiliar de liberação de manobra, a lógica energiza o temporizador responsável pela geração do pulso de comando, configurado com duração de 3 s. Durante esse intervalo, o contato de saída do CLP permanece fechado, aplicando efetivamente 220 Vca à bobina de acionamento da chave capacitiva.

Figura 62 – Lógica Ladder de geração dos comandos de liga e desliga do Estágio BCP-006



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comando de retirada é processado de forma análoga, por meio de temporizador independente igualmente parametrizado em 3 s, fechando o contato associado ao circuito de abertura pelo tempo necessário à execução segura da manobra.

A utilização de pulsos temporizados evita energização contínua das bobinas de comando e assegura padronização do tempo de atuação aplicado aos dispositivos de campo, preservando sua integridade mecânica e elétrica.

Essa etapa estabelece a interface final entre a decisão automatizada e a atuação física sobre o Banco de Capacitores BCP-03.

5.9 Detecção de Falhas de Acionamento

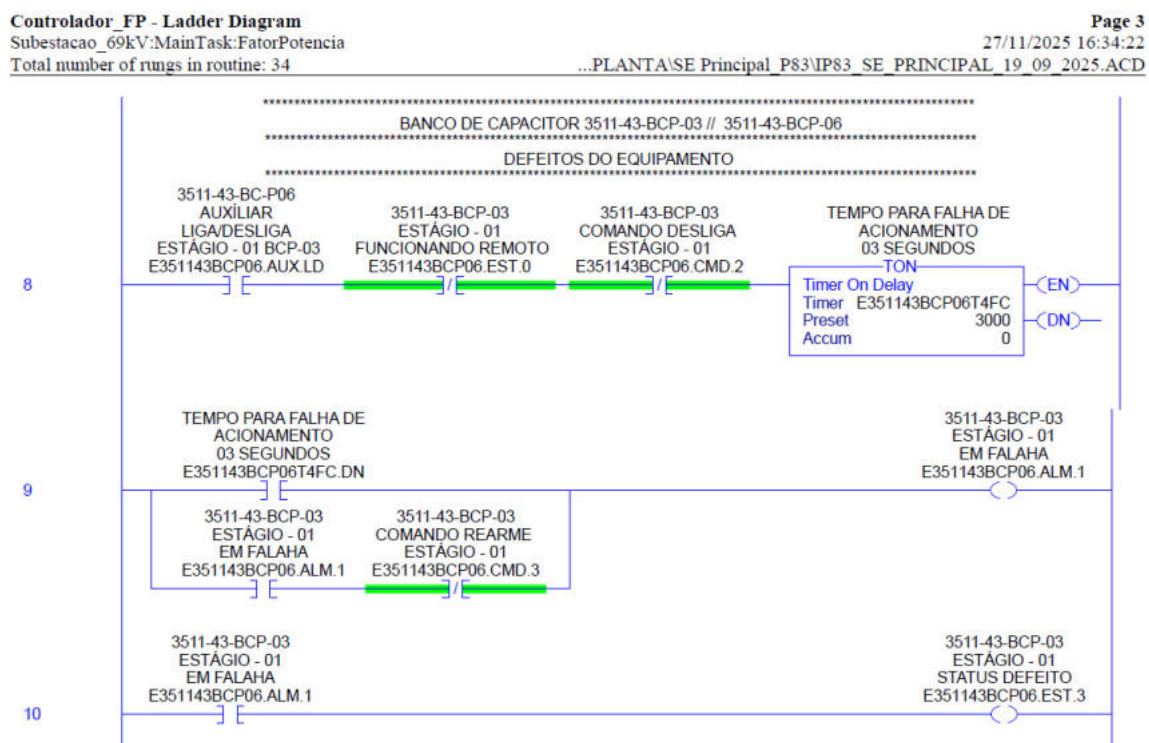
A lógica de controle do Banco de Capacitores BCP-03 incorpora rotina específica para detecção de falhas de acionamento dos estágios capacitivos. Essa rotina tem como objetivo identificar a ausência de confirmação de mudança de estado após a emissão de um comando de manobra.

A Figura 63 apresenta o trecho da programação Ladder responsável pela supervisão do Estágio BCP-006.

O monitoramento é iniciado quando há comando ativo de manobra e o estágio encontra-se sinalizado como em operação. A partir dessa condição, é acionado um temporizador do tipo TON, parametrizado em 3 s, correspondente ao tempo máximo admissível para que ocorra a alteração de posição esperada.

Caso, ao término da temporização, o sinal de feedback de posição não indique a

Figura 63 – Lógica Ladder de detecção de falha de acionamento do Estágio BCP-006



Fonte: Elaborado pelo autor.

mudança coerente com o comando emitido, a lógica caracteriza a condição como falha de acionamento.

A detecção da falha resulta na ativação de alarme interno do estágio e na indicação de status de defeito na lógica de controle. A condição permanece ativa até que seja executado comando de rearme específico, após verificação da causa em campo.

Essa rotina estabelece um mecanismo de supervisão de coerência entre comando e resposta física do equipamento, aumentando a confiabilidade operacional da automação implementada.

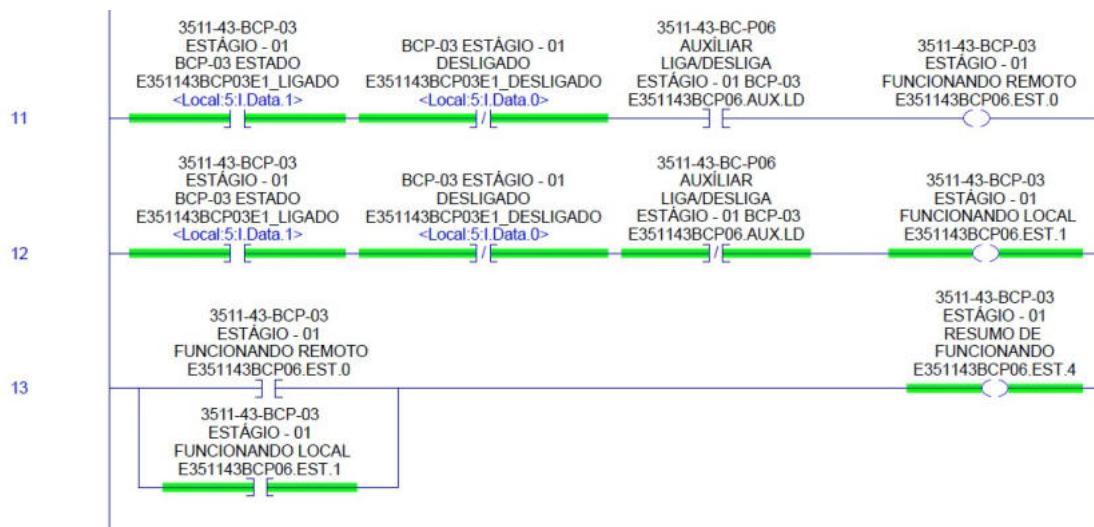
5.10 Consolidação de Estados Operacionais

Além das rotinas de decisão e geração de comandos, a lógica incorpora estrutura específica para consolidação dos estados operacionais do estágio capacitivo, permitindo representação coerente das condições reais de campo no ambiente de controle e supervisão.

A Figura 64 apresenta o trecho da programação Ladder responsável pela consolidação dos estados do Estágio BCP-006.

A lógica interpreta os sinais de posição do estágio (ligado e desligado), combinando-os com a condição da variável auxiliar de liberação de manobra (AUX_LD), a fim de classificar o estado de funcionamento.

Figura 64 – Lógica Ladder de consolidação dos estados operacionais do estágio capacitivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando o estágio encontra-se energizado e a variável auxiliar indica atuação proveniente da lógica automática, é gerado o estado de funcionamento remoto. Caso o estágio esteja energizado sem atuação da lógica automática, o sistema classifica a condição como funcionamento local.

Adicionalmente, a lógica consolida essas informações em um sinal de resumo de funcionamento, utilizado para sinalização global do estágio no sistema de supervisão.

Essa consolidação garante coerência entre os sinais físicos de campo e os estados lógicos disponibilizados ao operador, contribuindo para clareza operacional e rastreabilidade das condições do equipamento.

5.11 Reset e Normalização de Comandos

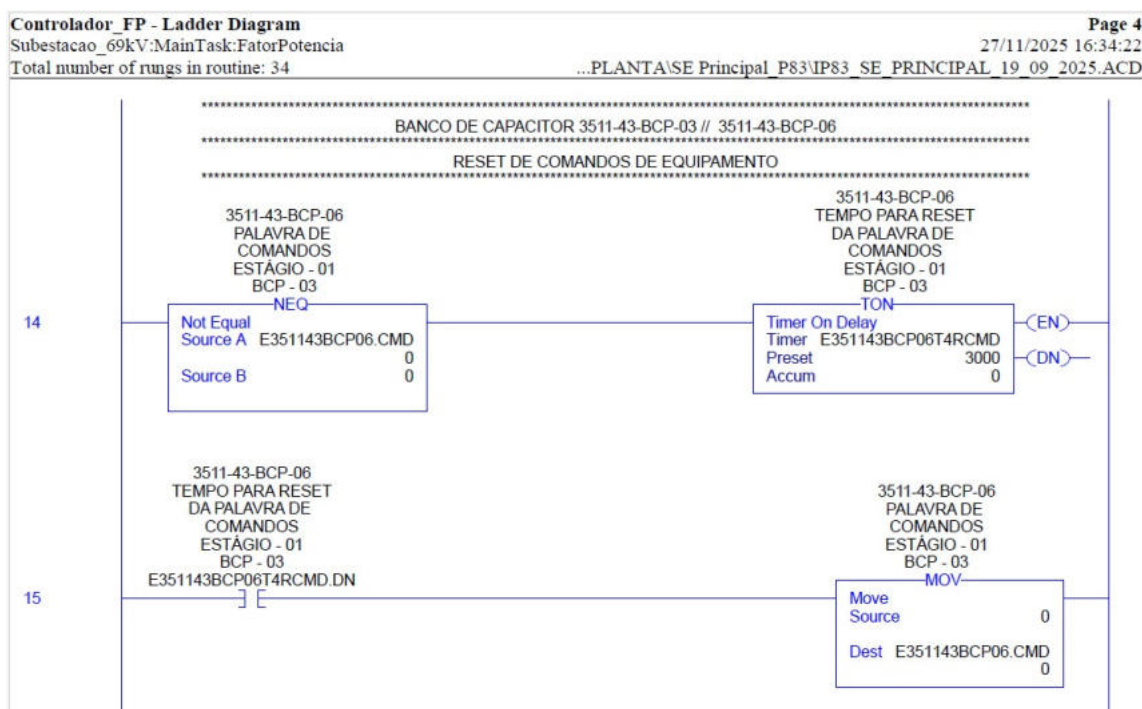
A lógica de automação incorpora rotina específica destinada à normalização da palavra de comandos associada aos estágios capacitivos.

Essa funcionalidade tem como objetivo evitar a permanência indevida de bits ativos na memória lógica do CLP após a emissão de um comando, prevenindo interpretações repetitivas ou ambíguas nos ciclos subsequentes de varredura.

A Figura 65 apresenta o trecho da programação Ladder responsável pela detecção de comando ativo e posterior reset automático da palavra de controle.

Quando a palavra de comandos assume valor diferente de zero, indicando a existência de solicitação de manobra, é iniciado temporizador do tipo TON, parametrizado em 3 s. Decorrido esse intervalo, a lógica executa instrução de movimentação de dados que restabelece o valor zero à palavra de comandos.

Figura 65 – Lógica Ladder de reset e normalização da palavra de comandos do estágio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse mecanismo assegura que cada solicitação de manobra seja tratada como evento transitório, mantendo a estrutura de controle organizada e evitando retenção de estados residuais na memória do controlador.

A normalização automática da palavra de comandos contribui para a robustez da estratégia de automação, garantindo coerência lógica e previsibilidade no comportamento do sistema.

5.12 Principais Instruções Ladder Utilizadas na Lógica de Controle

A implementação da automação foi desenvolvida em linguagem Ladder, utilizando instruções padrão de comparação, temporização, tratamento de dados e controle lógico discreto.

Ao longo deste capítulo foram apresentados diferentes trechos da programação. A Tabela 14 consolida as principais instruções empregadas e sua aplicação geral na estratégia de controle implementada.

5.13 Replicação da Lógica de Controle entre Estágios

Para fins de detalhamento técnico, a lógica apresentada neste capítulo foi descrita com base no Estágio BCP-006 do Banco de Capacitores BCP-03.

Entretanto, a programação foi estruturada de forma modular, permitindo sua repli-

Tabela 14 – Principais instruções Ladder utilizadas na lógica de controle

Instrução	Tipo	Aplicação na lógica
GEQ	Comparação analógica	Verificação de limites superiores.
LEQ	Comparação analógica	Verificação de limites inferiores.
GRT	Comparação analógica	Validações complementares de grandezas analógicas.
LES	Comparação analógica	Análise de condições inferiores de operação.
LIM	Comparação de faixa	Validação de coerência da variável de controle.
NEQ	Comparação lógica	Detecção de alterações de estado em palavras de comando.
TON	Temporização	Validação temporal e proteção de manobra.
ONS	Pulso lógico	Geração de eventos únicos em ciclo de varredura.
MOV	Transferência de dados	Atualização e normalização de variáveis internas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

cação aos demais estágios capacitivos do banco com alterações mínimas de parametrização e endereçamento.

O Estágio BCP-007 mantém a mesma arquitetura funcional de aquisição da variável de controle, aplicação dos critérios de decisão, temporizações operacionais, permissivas internas, detecção de falhas e geração de comandos.

As diferenças entre os estágios restringem-se essencialmente aos limites de fator de potência adotados e aos respectivos endereçamentos de entrada e saída no CLP, previamente apresentados neste capítulo.

Essa estrutura modular permite escalonamento da compensação reativa, assegurando atuação progressiva dos estágios conforme a necessidade operacional da instalação.

A programação completa da automação, contemplando ambos os estágios, é apresentada no Apêndice A.

5.14 Validação da Estratégia de Controle por Simulação Computacional

Com o objetivo de validar funcionalmente a estratégia de automação implementada no Banco de Capacitores BCP-03, foi desenvolvido um modelo computacional no ambiente MATLAB/Simulink destinado à reprodução da lógica de controle e à avaliação de sua resposta frente a diferentes condições operacionais da planta.

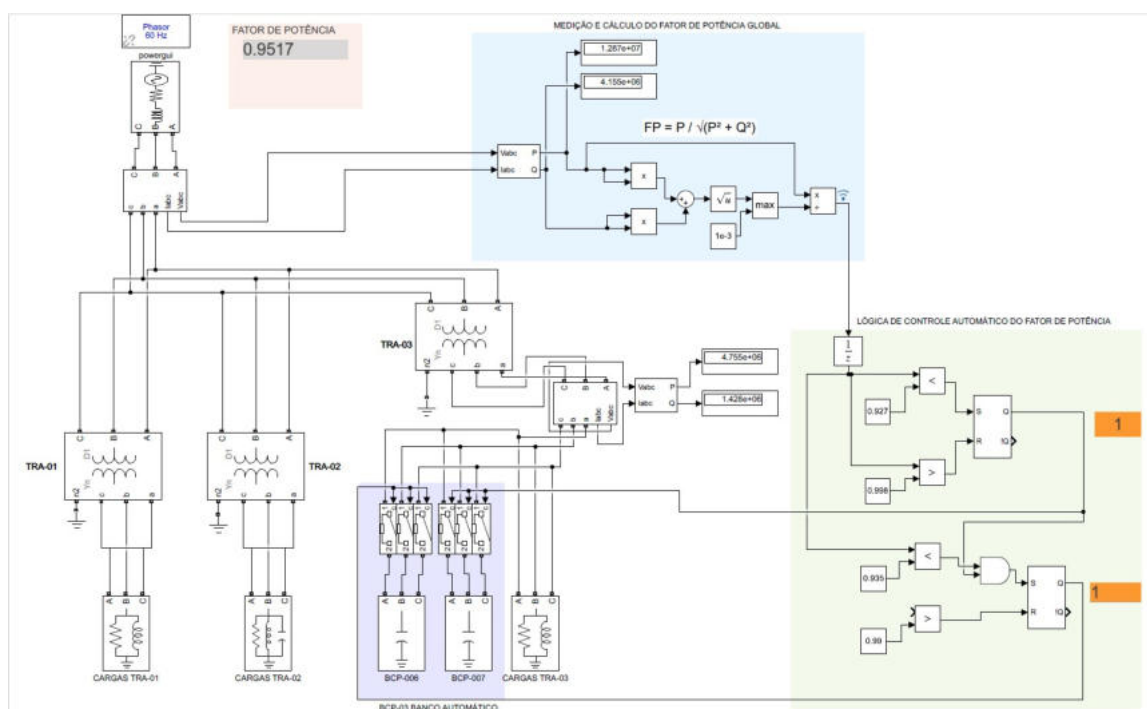
A simulação não teve caráter de dimensionamento elétrico, mas sim de verificação da coerência decisória da lógica, permitindo analisar o escalonamento dos estágios capacitivos,

a atuação seletiva da compensação reativa e o comportamento do fator de potência sob diferentes cenários de carregamento.

5.14.1 Estrutura do Modelo de Simulação

A estrutura geral do modelo desenvolvido é apresentada na Figura 66. O arranjo foi segmentado em subsistemas funcionais que reproduzem, de forma simplificada, os elementos presentes na instalação real e na lógica de automação implementada no CLP.

Figura 66 – Estrutura geral do modelo de simulação da compensação automática de reativos



Fonte: Elaborado pelo autor.

A correspondência entre os subsistemas simulados e seus equivalentes no sistema real é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Correspondência entre os subsistemas do modelo e o sistema real

Cor	Subsistema no modelo	Correspondência no sistema real
Azul	Medição e cálculo do fator de potência	Aquisição de grandezas elétricas no barramento principal
Verde	Lógica de controle automático	Programação Ladder implementada no CLP
Roxo	Banco de Capacitores BCP-03	Banco escalonado de compensação reativa
Vermelho	Fator de potência monitorado	Variável de decisão da automação
-	Sistema elétrico da planta	Transformadores e cargas industriais

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.14.2 Condição sem Compensação Automática

Inicialmente simulou-se a condição de operação do sistema com o Banco de Capacitores BCP-03 presente no modelo, porém com sua atuação automática inibida. Essa condição permite avaliar o comportamento do fator de potência na ausência de compensação reativa automática, servindo como referência para as demais análises.

Para essa simulação foram consideradas as seguintes premissas operacionais:

- Estágios do BCP-03 desligados;
- Compensação fixa ativa no TRA-02;
- Cargas indutivas distribuídas na planta;
- Demanda ativa baseada em dados operacionais.

A partir das grandezas obtidas no barramento principal, o fator de potência foi determinado pela Equação 3 apresentada a seguir:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3)$$

Considerando $P = 11,27$ MW e $Q = 6,24$ MVar, obteve-se fator de potência aproximado de 0,875 atrasado.

Os resultados consolidados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Grandezas elétricas sem compensação automática

Grandeza	Valor
Potência ativa	11,27 MW
Potência reativa	6,24 MVar
Potência aparente	12,89 MVA
Fator de potência	0,875 atrasado
Estado do BCP-03	Inibido

Fonte: Elaborado pelo autor.

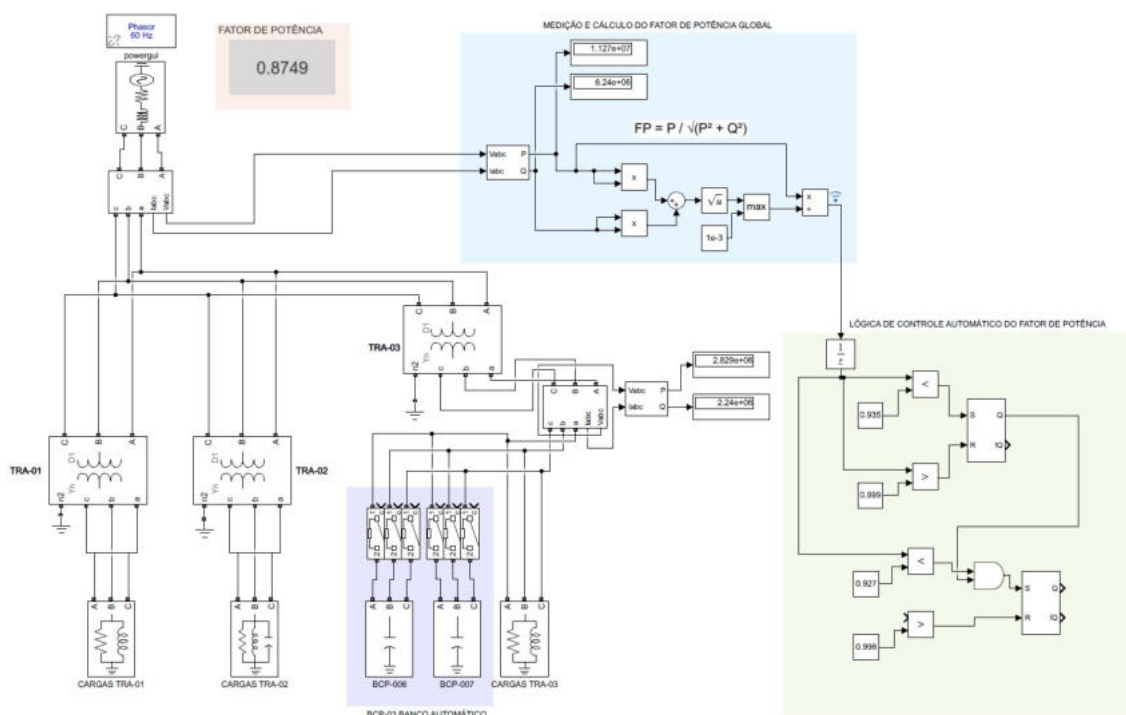
O comportamento do fator de potência nessa condição é ilustrado na Figura 67.

Observa-se operação abaixo da faixa estabelecida na lógica de controle, evidenciando a necessidade de compensação automática.

5.14.3 Inserção Seletiva do Estágio BCP-007

Para validação da atuação escalonada, ajustou-se a demanda de potência reativa do sistema de forma que apenas o primeiro estágio fosse requerido para adequação do fator de potência.

Figura 67 – Fator de potência sem atuação do BCP-03



Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação considerou o BCP-03 habilitado em modo automático, mantendo-se a compensação fixa existente e ajustando-se a potência reativa indutiva do TRA-01 para 250 kVar por fase.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Grandezas após inserção do Estágio BCP-007

Grandeza	Valor
Potência ativa	11,46 MW
Potência reativa	3,27 MVar
Potência aparente	11,92 MVA
Fator de potência	0,9613 atrasado
BCP-007	Inserido
BCP-006	Desligado

Fonte: Elaborado pelo autor.

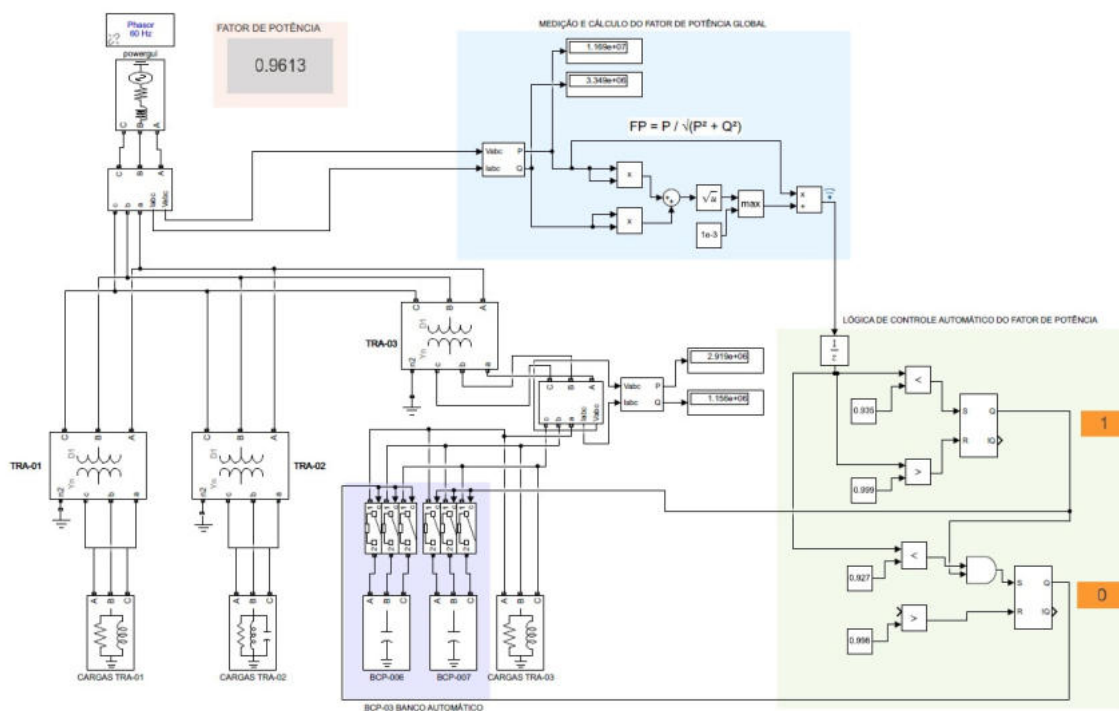
A atuação seletiva é ilustrada na Figura 68.

Verifica-se que a compensação fornecida pelo primeiro estágio foi suficiente para restabelecer o fator de potência à faixa operacional, não ocorrendo acionamento do segundo estágio.

5.14.4 Inserção dos Dois Estágios

Para validação da atuação complementar, promoveu-se incremento adicional da demanda de potência reativa do sistema, elevando-se a potência indutiva do TRA-01 para

Figura 68 – Inserção seletiva do Estágio BCP-007



Fonte: Elaborado pelo autor.

450 kVAr por fase.

Nessa condição, a inserção inicial do primeiro estágio mostrou-se insuficiente, ocasionando a atuação automática do segundo estágio.

Os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Grandezas após inserção dos dois estágios

Grandeza	Valor
Potência ativa	11,46 MW
Potência reativa	2,67 MVar
Potência aparente	11,76 MVA
Fator de potência	0,9737 atrasado
BCP-007	Inserido
BCP-006	Inserido

Fonte: Elaborado pelo autor.

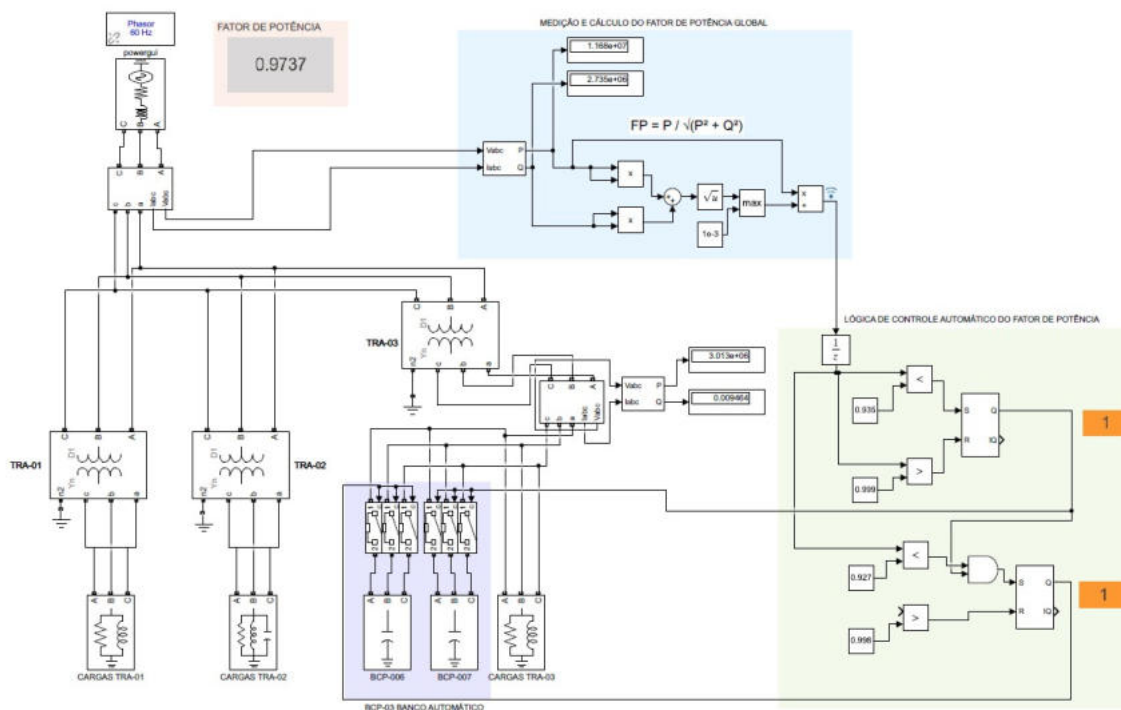
A resposta do sistema é apresentada na Figura 69.

Observa-se elevação progressiva do fator de potência, confirmando a atuação escalonada prevista na lógica de controle.

5.14.5 Estados Lógicos de Operação

Além das grandezas elétricas, avaliou-se o comportamento lógico dos estágios. A síntese dos estados observados é apresentada na Tabela 19.

Figura 69 – Atuação sequencial dos estágios do BCP-03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Estados lógicos dos estágios do BCP-03

Condição	BCP-007	BCP-006
Sem compensação	0	0
Inserção seletiva	1	0
Compensação máxima	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A lógica prioriza a inserção do primeiro estágio e aciona o segundo apenas quando necessário, mantendo os estados por memória até atingimento dos limites de retirada.

5.14.6 Síntese de Validação

A análise conjunta dos cenários simulados evidencia correspondência entre o comportamento do modelo e os critérios implementados na lógica Ladder.

A estratégia demonstrou:

- Inserção seletiva e escalonada de estágios;
- Redução progressiva da potência reativa demandada;
- Elevação do fator de potência à faixa operacional;
- Estabilidade decisória sem chaveamentos indevidos.

Dessa forma, a simulação valida funcionalmente a estratégia de controle adotada, confirmando sua coerência operacional previamente à aplicação em campo.

6 RESULTADOS

Este capítulo apresenta, de forma objetiva e organizada, os resultados operacionais obtidos a partir da entrada em operação da automação do Banco de Capacitores BCP-03 na planta industrial da Artemyn. São expostos registros elétricos, dados operacionais monitorados durante o período de operação assistida e ocorrências verificadas em campo, mantendo caráter descritivo e factual. As análises críticas e interpretações técnicas são desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

6.1 Resultados da Implementação do Projeto

A automação do Banco de Capacitores BCP-03 foi colocada em operação em 07 de dezembro de 2023, marcando o início do período de acompanhamento operacional assistido destinado à verificação do desempenho funcional da lógica implementada e da resposta dos equipamentos de campo frente às condições reais de operação da planta.

Durante a etapa de comissionamento e entrada em operação, foram verificados os seguintes aspectos funcionais do sistema automatizado:

- desenvolvimento da lógica de controle em linguagem Ladder e carregamento do programa no Controlador Lógico Programável (CLP);
- integração funcional entre o sistema de medição em 69 kV, o sistema supervisório SCADA, o CLP e o relé de proteção associado ao alimentador K14;
- implementação de contadores de manobra para cada estágio capacitivo, permitindo o registro automático das inserções e retiradas;
- revisão e atualização dos diagramas elétricos e de comando associados ao Banco de Capacitores BCP-03.

A partir da entrada em operação, a lógica automática passou a atuar sobre a inserção e retirada dos estágios capacitivos com base no fator de potência medido no ponto de entrega, conforme estratégia de controle detalhada no Capítulo 5.

6.2 Resultados Operacionais

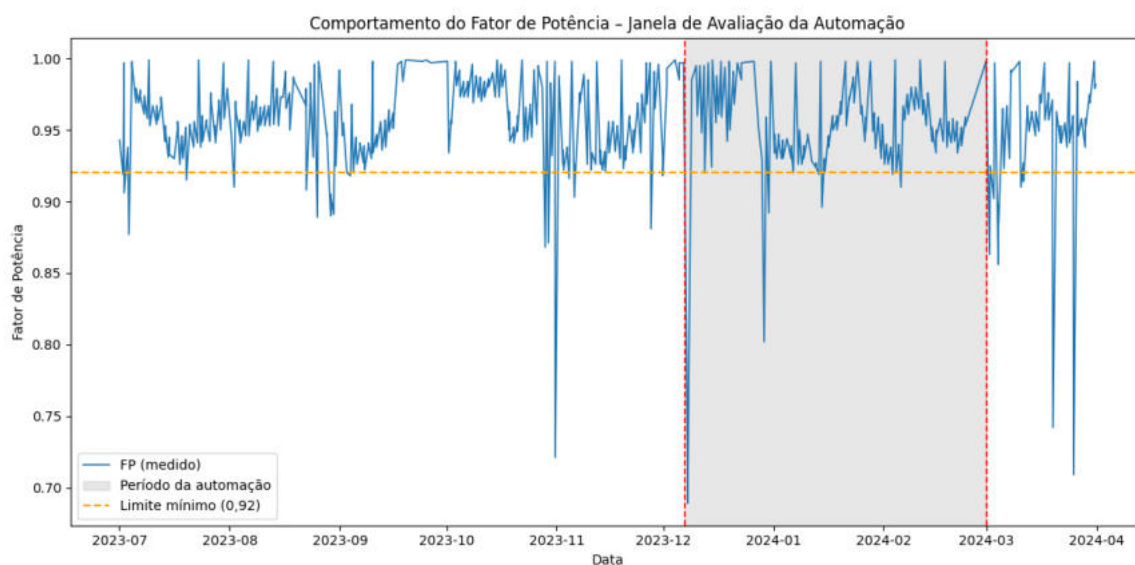
Após a implantação da lógica de controle automático do Banco de Capacitores BCP-03, o sistema foi mantido em regime de operação assistida, permitindo o monitoramento contínuo do fator de potência no barramento de 69 kV, bem como das manobras dos estágios capacitivos e registros do sistema supervisório.

A janela de avaliação da operação automática compreendeu o período de 3 meses, intervalo no qual a lógica implementada atuou de forma contínua na inserção e retirada dos estágios do banco em função das variações instantâneas do perfil de carga da planta industrial.

6.2.1 Comportamento do Fator de Potência

A evolução temporal do fator de potência medido no barramento de 69 kV, destacando o período de operação da automação, é apresentada na Figura 70.

Figura 70 – Comportamento do fator de potência durante a operação automática do Banco de Capacitores BCP-03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o sistema operou predominantemente acima do limite mínimo regulatório de 0,92, estabelecido pelos critérios de faturamento de energia reativa aplicáveis às unidades consumidoras atendidas em média e alta tensão.

Com o objetivo de avaliar quantitativamente o impacto da automação, foram comparados os indicadores estatísticos do fator de potência nos períodos anterior à implantação da lógica automática e durante sua operação, conforme apresentado na Tabela 20.

No período anterior à automação, o sistema apresentava média elevada de fator de potência (0,9584), mantendo-se dentro da faixa regulatória em 94,29% do tempo monitorado. Entretanto, registrou-se permanência fora do limite mínimo em 5,71% das medições, indicando exposição eventual a condições de não conformidade.

Durante a operação automática, a média observada foi de 0,9518, valor ainda compatível com operação próxima da unidade. Mais relevante, porém, foi o aumento da

Tabela 20 – Comparação dos indicadores do fator de potência antes e durante a automação

Indicador	Antes da automação	Durante a automação
Média do FP (pu)	0,9584	0,9518
Desvio padrão	0,0293	0,0375
Conformidade ($\geq 0,92$)	94,29%	95,43%
Tempo fora do limite (%)	5,71%	4,57%
Valor mínimo	0,721	0,689
Valor máximo	0,999	0,999
Número de amostras	333	175

Fonte: Elaborado pelo autor.

permanência dentro da faixa regulatória para 95,43%, com redução do tempo fora do limite para 4,57%.

Embora a média global não tenha apresentado incremento significativo, a lógica de controle implementada proporcionou maior regularidade no atendimento aos requisitos regulatórios, reduzindo a exposição a condições de descumprimento e automatizando a compensação de potência reativa frente às variações dinâmicas de carga da planta.

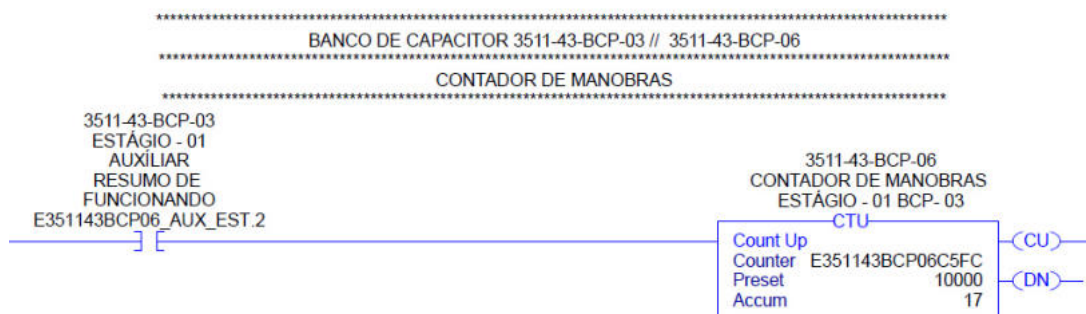
Os resultados indicam que a automação não teve como objetivo elevar substancialmente a média do fator de potência, mas sim garantir estabilidade operacional e maior permanência dentro dos limites exigidos, validando tecnicamente a solução implementada.

6.2.2 Registros de Manobras dos Estágios Capacitivos

A lógica de automação implementada no CLP contempla contadores dedicados para o registro das manobras realizadas por cada estágio capacitivo.

A Figura 71 apresenta o contador de manobras do Estágio 01 (BCP-06).

Figura 71 – Contador de manobras do Estágio 01 do Banco de Capacitores BCP-03 (BCP-06)

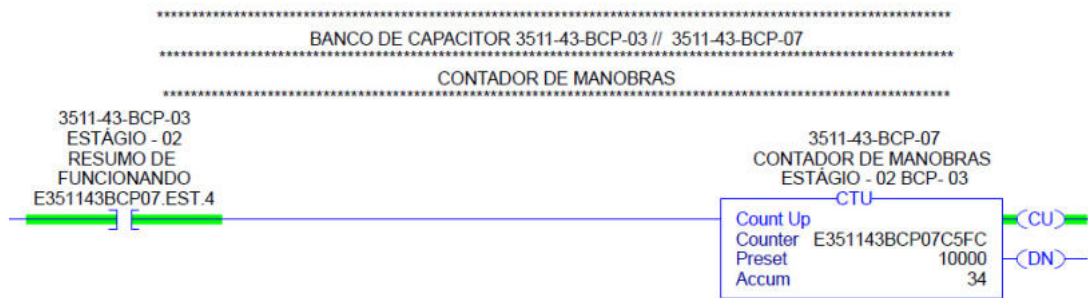


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 72 apresenta o contador de manobras do Estágio 02 (BCP-07).

Os contadores apresentados correspondem ao registro histórico acumulado dos equipamentos desde sua entrada em operação, não sendo possível segregar, de forma precisa,

Figura 72 – Contador de manobras do Estágio 02 do Banco de Capacitores BCP-03 (BCP-07)



Fonte: Elaborado pelo autor.

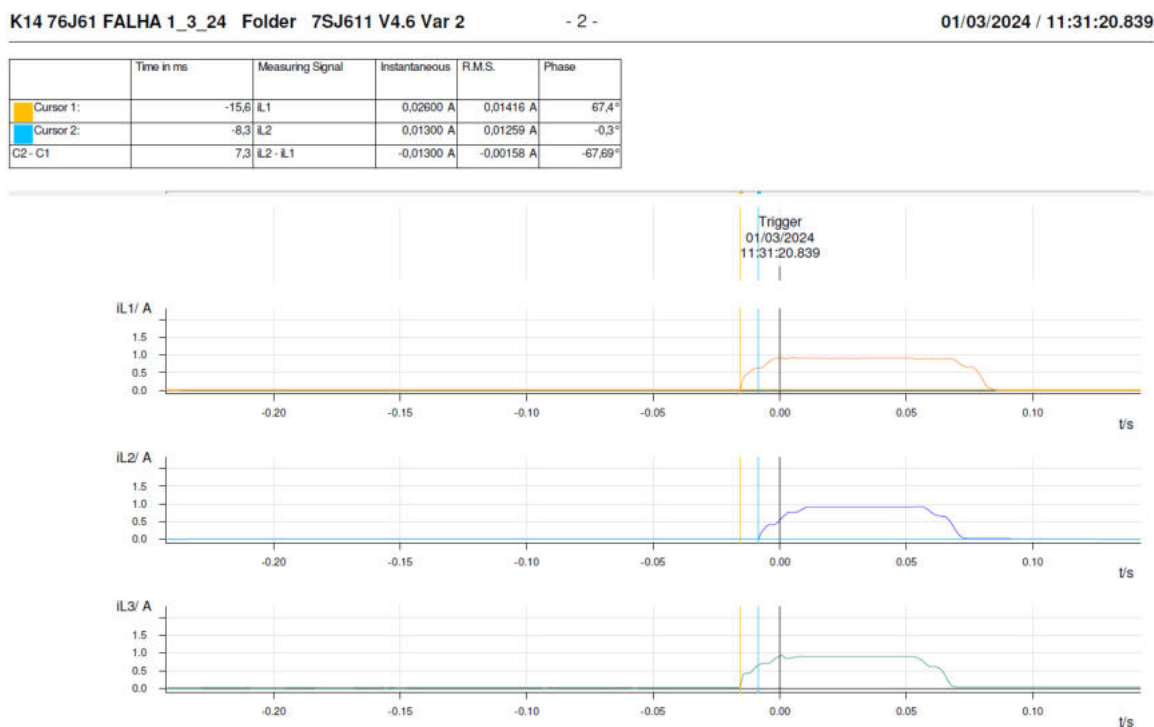
as manobras realizadas exclusivamente durante o período de operação automatizada. Ainda assim, os registros confirmam a funcionalidade da lógica de contagem implementada e sua integração com o sistema de automação e supervisão.

6.2.3 Registros do Sistema de Proteção

Foram analisados os arquivos de registro de eventos do relé de proteção Siemens SIPROTEC 7SJ611, associados ao alimentador K14 do Banco de Capacitores BCP-03.

A Figura 73 apresenta um registro oscilográfico associado a um evento ocorrido em 01/03/2024 às 11:31:20.

Figura 73 – Registro oscilográfico do relé SIPROTEC 7SJ611 associado ao alimentador K14



Fonte: Extraído do relé de proteção SIPROTEC 7SJ611.

Os registros apresentam as formas de onda das correntes de fase no instante do evento, bem como as marcações temporais associadas ao disparo do registro, permitindo verificar a resposta dinâmica do sistema elétrico supervisionado pelo relé de proteção.

A análise cronológica dos eventos evidencia a atuação do sistema de proteção após detecção de distúrbio transitório nas correntes de fase, culminando na abertura do disjuntor do alimentador.

6.3 Ocorrências Registradas Durante a Operação

Durante o período de operação assistida, foi registrada uma ocorrência associada a uma das chaves a óleo do Banco de Capacitores BCP-03, caracterizada por falha de natureza mecânica.

A ocorrência esteve associada a uma tentativa de energização automática de um dos estágios capacitivos, durante a qual foi verificado o fechamento não simultâneo das chaves de manobra. Uma das fases não completou o fechamento, resultando na energização assimétrica do banco de capacitores.

Essa condição provocou desequilíbrio nas correntes de fase e o surgimento de componente residual de corrente, detectada pelo sistema de proteção do relé SIPROTEC 7SJ611. A soma vetorial das correntes deixou de ser nula, caracterizando componente homopolar equivalente à circulação de corrente pelo neutro do sistema, ainda que não exista neutro físico acessível no banco capacitivo.

A anomalia foi interpretada pelo sistema de proteção como condição de sobrecorrente desequilibrada ou falta, culminando na atuação da proteção e abertura do disjuntor do alimentador.

A falha observada não comprometeu a integridade do sistema de proteção nem resultou em danos adicionais aos equipamentos. Contudo, impactou a continuidade da operação automática do banco, motivando a suspensão temporária da automação a partir de 01/03/2024, permanecendo o sistema em operação local até a normalização das condições do equipamento.

6.4 Síntese dos Resultados

De forma consolidada, os principais resultados obtidos a partir da implantação da automação do Banco de Capacitores BCP-03 podem ser sintetizados conforme apresentado a seguir:

- entrada em operação da lógica automática de controle em 07/12/2023, com atuação contínua durante a janela de avaliação operacional;

- inserção e retirada automática dos estágios capacitivos em função das variações instantâneas do fator de potência da planta industrial;
- manutenção do fator de potência em patamares predominantemente superiores ao limite mínimo regulatório de 0,92 ao longo do período monitorado;
- aumento da permanência dentro da faixa de conformidade regulatória, passando de 94,29% no período anterior para 95,43% durante a operação automática;
- redução do tempo de permanência fora do limite regulatório de 5,71% para 4,57% com a atuação da automação;
- operação do sistema com valores médios de fator de potência próximos da unidade em ambos os períodos analisados, evidenciando que a automação atuou prioritariamente na regularização e estabilidade da variável;
- registro supervisão das manobras automáticas dos estágios, confirmando a atuação da lógica implementada em condições reais de carga;
- identificação de atuação do sistema de proteção associada a ocorrência operacional em campo;
- detecção de limitação mecânica em equipamento de manobra, impactando a continuidade da operação automática e motivando a retirada temporária do sistema de serviço.

De forma geral, os resultados obtidos constituem evidências objetivas da implementação da automação e de sua efetividade operacional, demonstrando capacidade de atuação contínua na compensação de potência reativa, garantia de maior permanência dentro dos limites regulatórios e regularização do comportamento do fator de potência frente às variações dinâmicas do perfil de carga da instalação analisada.

Tais resultados fornecem a base experimental necessária para as análises conclusivas apresentadas no capítulo seguinte.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta a consolidação técnica dos resultados obtidos com a implementação da automação do Banco de Capacitores BCP-03, avaliando sua aderência aos objetivos estabelecidos, sintetizando os principais achados operacionais, discutindo as limitações identificadas e indicando possibilidades de continuidade técnica do estudo.

7.1 Avaliação dos Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consistiu no desenvolvimento e na implementação de uma solução de automação para o controle dinâmico do fator de potência por meio da comutação discreta dos estágios do Banco de Capacitores BCP-03, utilizando medições em média tensão e integrando equipamentos já existentes na infraestrutura elétrica da planta industrial.

A partir dos resultados operacionais obtidos e da análise quantitativa comparativa apresentada no capítulo anterior, verifica-se que a solução implementada atendeu ao objetivo proposto, possibilitando a atuação automática dos estágios capacitivos em resposta às variações do fator de potência e mantendo a variável monitorada predominantemente dentro dos limites regulatórios estabelecidos.

Os objetivos específicos definidos no Capítulo 1 foram contemplados ao longo do desenvolvimento do trabalho, incluindo a caracterização do sistema elétrico, a definição da arquitetura de automação, o desenvolvimento da lógica de controle em Controlador Lógico Programável, a integração com o sistema supervisor, a implantação em campo e a validação operacional da estratégia de controle adotada.

7.2 Síntese dos Resultados

Durante o período de operação assistida foi possível verificar o desempenho funcional da automação implementada, observando-se a atuação coordenada dos estágios capacitivos em resposta às variações do fator de potência da planta e a aderência da lógica de controle às condições operacionais reais do sistema.

A análise quantitativa comparativa entre o período anterior à automação e o período de operação automática evidenciou que, embora o sistema já operasse com valores médios elevados de fator de potência, a automação contribuiu para maior permanência dentro dos limites regulatórios.

A conformidade em relação ao limite mínimo de 0,92 passou de 94,29% no período anterior para 95,43% durante a operação automática, acompanhada de redução do tempo

fora do limite de 5,71% para 4,57%. Tais resultados indicam que a automação atuou como mecanismo de regularização contínua do fator de potência, reduzindo a exposição da instalação a condições de não conformidade.

7.3 Contribuições do Trabalho

O trabalho desenvolvido apresentou contribuições relevantes sob os pontos de vista técnico e operacional, dentre as quais destacam-se:

- a implementação de uma lógica de automação funcional para controle do fator de potência em sistemas de média tensão;
- a integração entre automação, sistema supervisório e sistema de proteção elétrica, respeitando a infraestrutura existente;
- a padronização das rotinas de controle e do registro de manobras do banco de capacitores;
- a validação prática da estratégia de compensação reativa baseada em dados reais de operação;
- a demonstração quantitativa de melhoria na permanência do fator de potência dentro dos limites regulatórios;
- a identificação de limitações mecânicas em equipamentos de manobra legados, relevantes para a confiabilidade de sistemas automatizados.

7.4 Limitações do Estudo

Durante o desenvolvimento e a operação assistida do sistema, foram identificadas limitações que impactaram a continuidade da automação em regime plenamente automático.

A principal limitação esteve associada à condição mecânica das chaves a óleo utilizadas na comutação dos estágios capacitivos, a qual restringiu a continuidade da operação automática após ocorrência operacional registrada em campo.

Em função dessa condição, a automação foi temporariamente retirada de operação, permanecendo o banco em regime de operação convencional até a correção da anomalia identificada.

Adicionalmente, destacam-se:

- a impossibilidade de campanhas prolongadas de operação automática;

- restrições operacionais inerentes à rotina da planta industrial;
- limitações associadas ao equipamento de manobra existente.

7.5 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas, recomenda-se para trabalhos futuros:

- a substituição das chaves a óleo por dispositivos de manobra mais adequados a operações frequentes, como chaves ou disjuntores a vácuo;
- a realização de campanhas prolongadas de operação automática após a modernização dos equipamentos de manobra;
- o aprimoramento das estratégias de proteção específicas para bancos de capacitores em média tensão;
- a implementação de rotinas de sincronismo ou mitigação de transitórios de energização.

7.6 Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a automação do Banco de Capacitores BCP-03 constitui solução tecnicamente viável para o controle dinâmico do fator de potência em instalações industriais de média tensão.

A estratégia de controle implementada mostrou-se capaz de sustentar a operação dentro dos limites regulatórios, aumentar a permanência em conformidade e reduzir o tempo de exposição a condições de não atendimento.

O estudo evidencia ainda que a efetividade de sistemas automatizados de compensação reativa está diretamente associada à confiabilidade eletromecânica dos dispositivos de manobra, aspecto relevante para projetos de modernização de subestações industriais.

Dessa forma, o trabalho contribui para a consolidação da automação como ferramenta aplicada à eficiência energética, à confiabilidade operacional e à adequação regulatória de sistemas elétricos industriais baseados em infraestrutura existente.

Referências

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8*. Brasília, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.
- ARTEMYN. *Artemyn's Rainwater Reuse Project seeks to reduce consumption*. 2025. Disponível em: <<https://www.artemyn.com/artemyns-rainwater-reuse-project-seeks-to-reduce-consumption/>.Acessoem:2026.> Citado na página 21.
- BOYER, S. A. *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. 4. ed. Research Triangle Park: ISA, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- CODI. *Manual de Orientação aos Consumidores: Energia Reativa Excedente*. [S.l.]: CODI, 2004. Citado na página 27.
- COTRIM, A. A. M. B. *Instalações Elétricas*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 20, 27 e 53.
- EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Citado na página 20.
- GRAINGER, J. J.; JR., W. D. S. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994. Citado 5 vezes nas páginas 20, 27, 28, 29 e 30.
- GROOVER, M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. 4. ed. New York: Pearson, 2015. Citado na página 32.
- IEC. *IEC 61850 – Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*. Geneva, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- IEEE. *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*. New York, 2014. Citado na página 29.
- IEEE. *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*. 7. ed. New York: IEEE, 2020. Citado na página 24.
- MAMEDE FILHO, J. *Instalações Elétricas Industriais*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 30, 32, 50 e 51.
- MAMEDE FILHO, J. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado na página 32.
- MILLER, T. J. E. *Reactive Power Control in Electric Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.

MODBUS ORGANIZATION. *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. [S.l.], 2012. Citado na página 34.

SAADAT, H. *Power System Analysis*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 20, 24, 27, 28, 29 e 30.

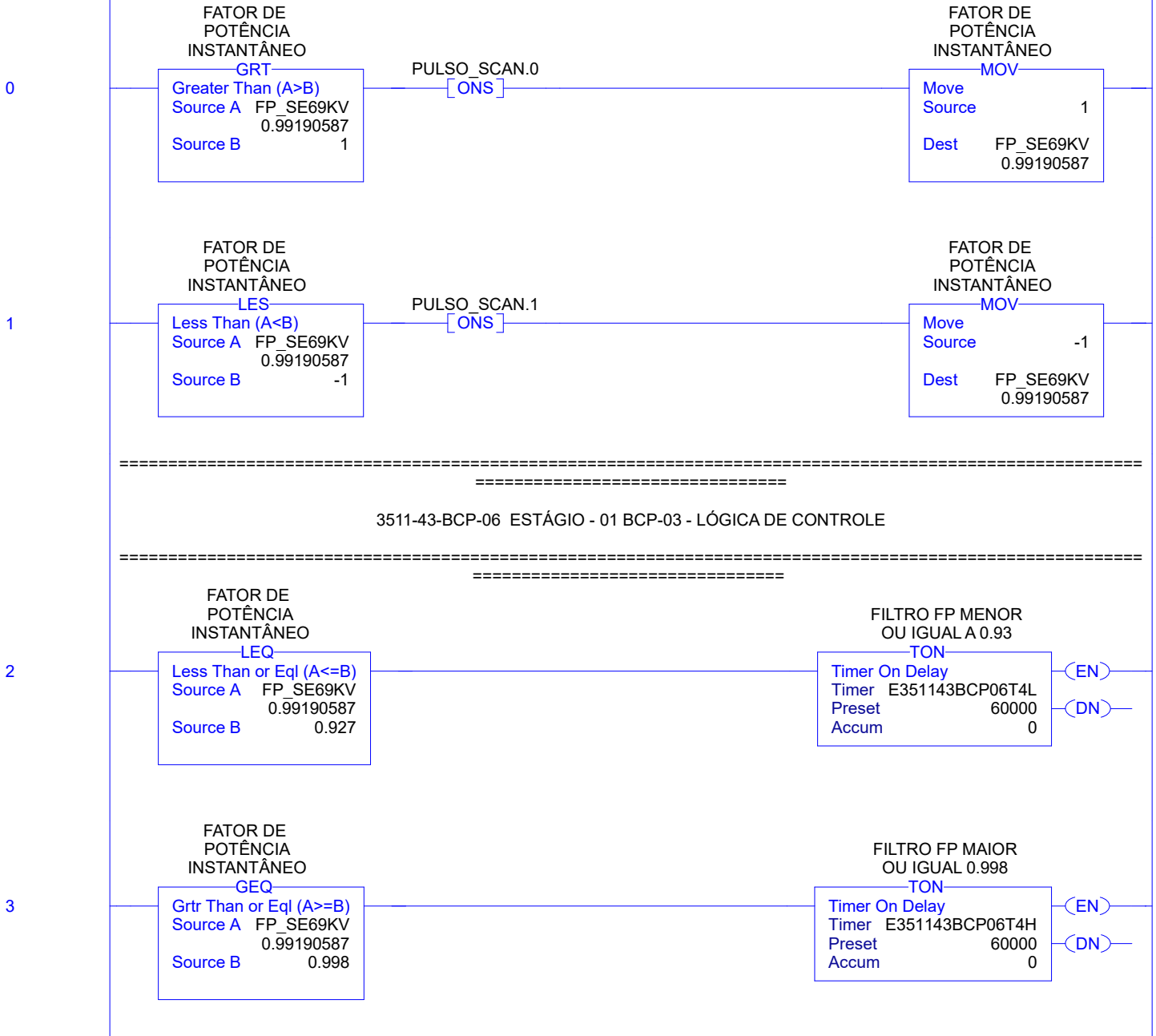
TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. *Computer Networks*. 5. ed. New York: Pearson, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

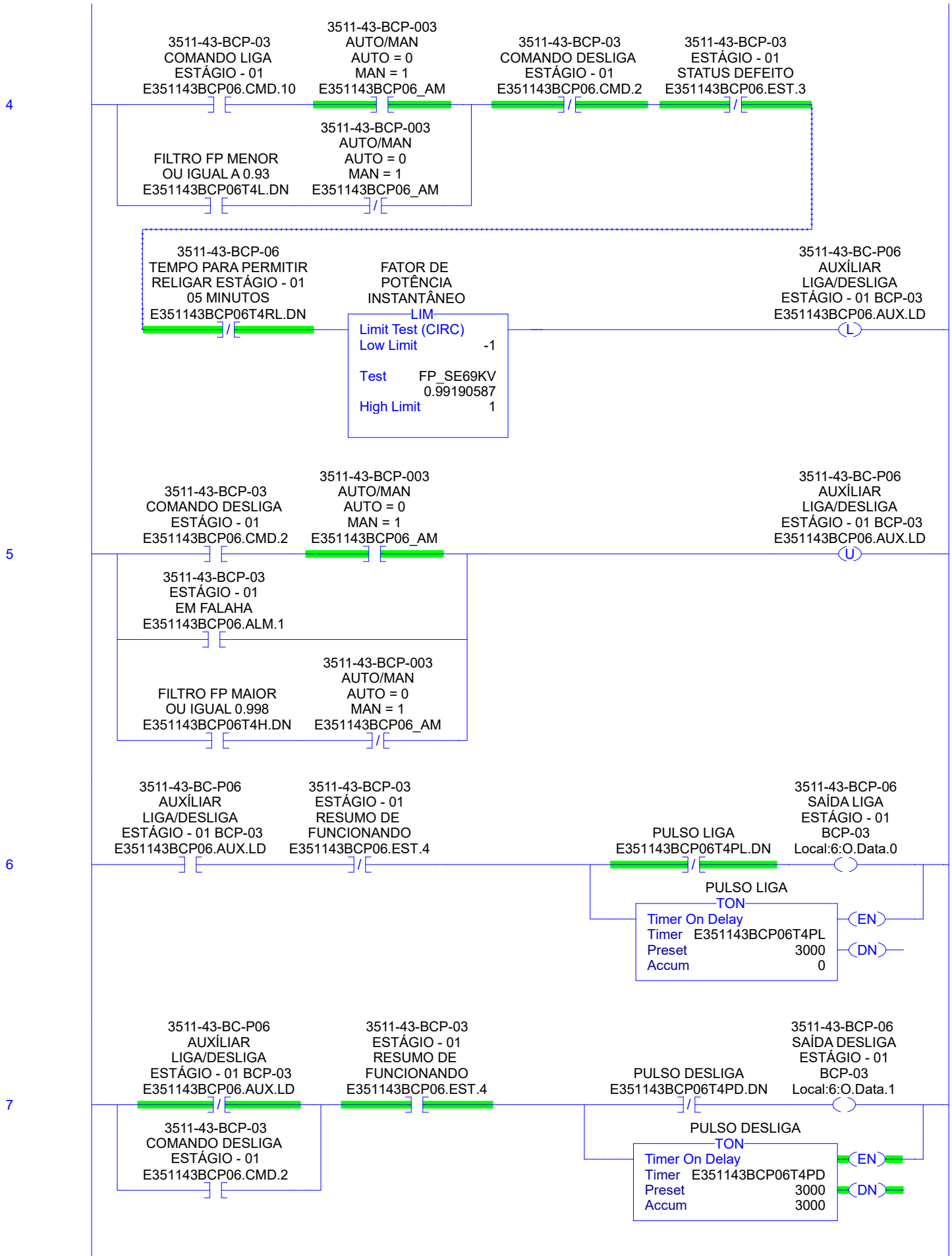
WEG. *Capacitores em Corrente Alternada*. 2017. Documento técnico. Versão 1.3. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 50 e 51.

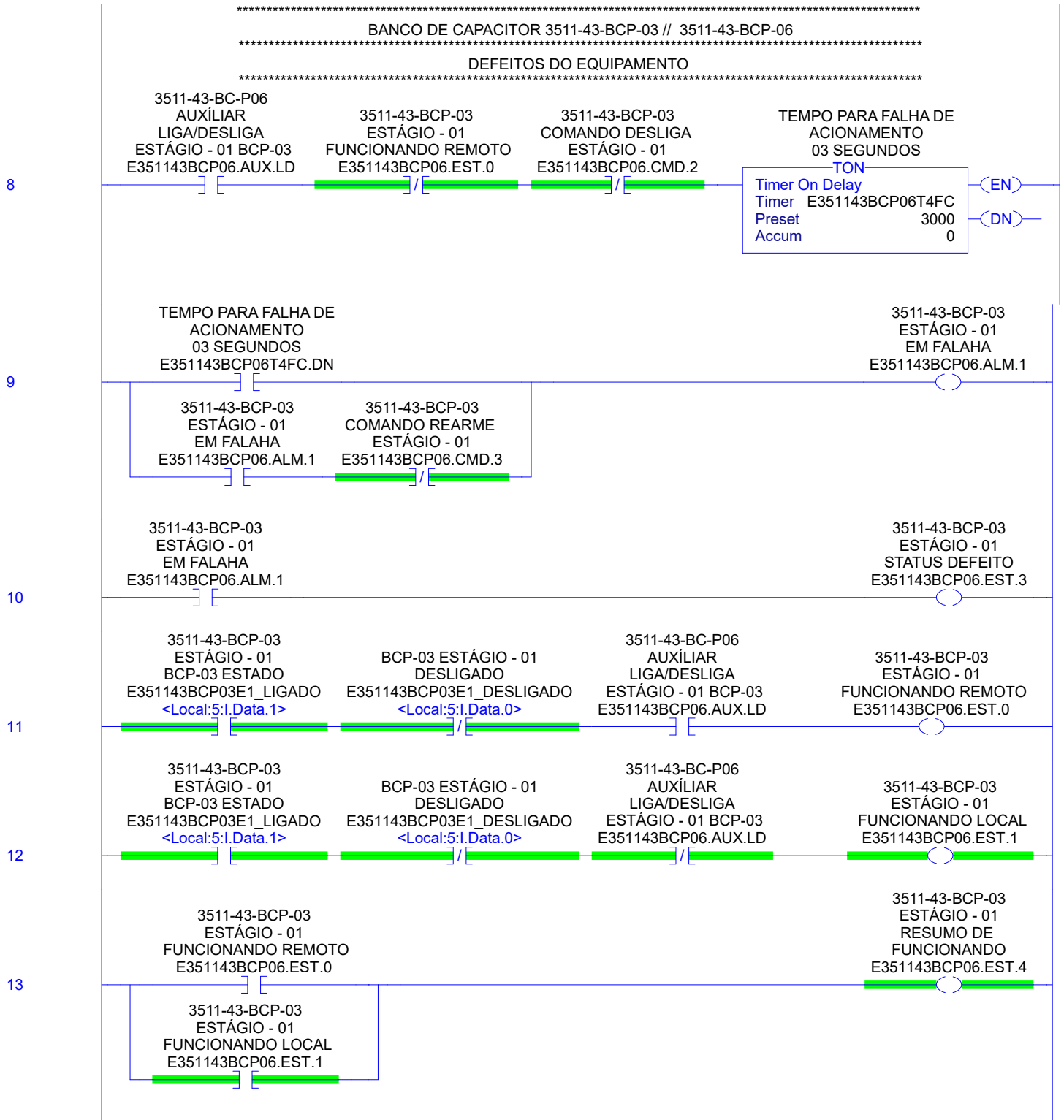
Apêndices

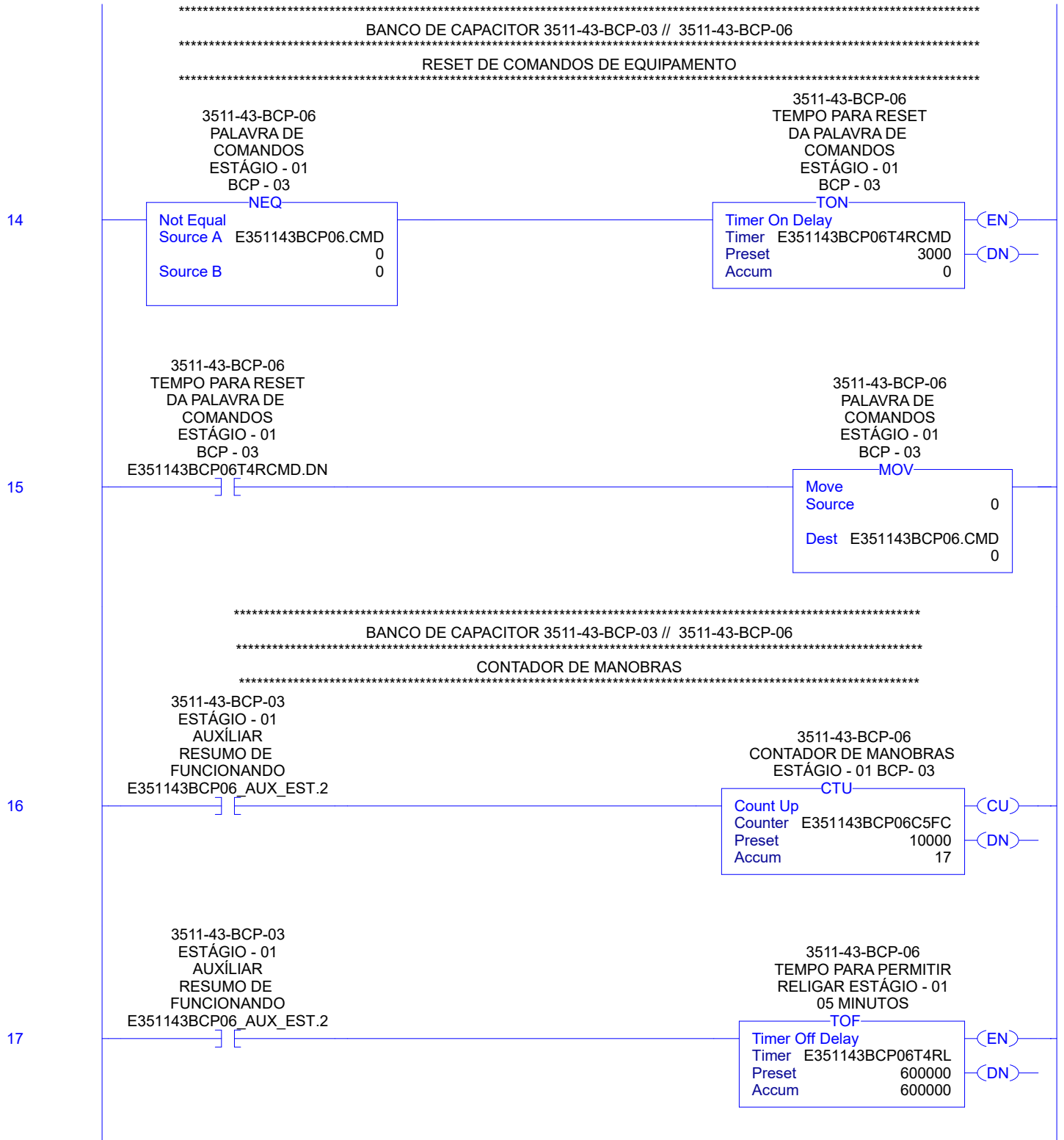
APÊNDICE A – Lógica de programação no PLC

LEITURA DO FATOR DE POTÊNCIA VIA CIETECT - FP_SE69KV

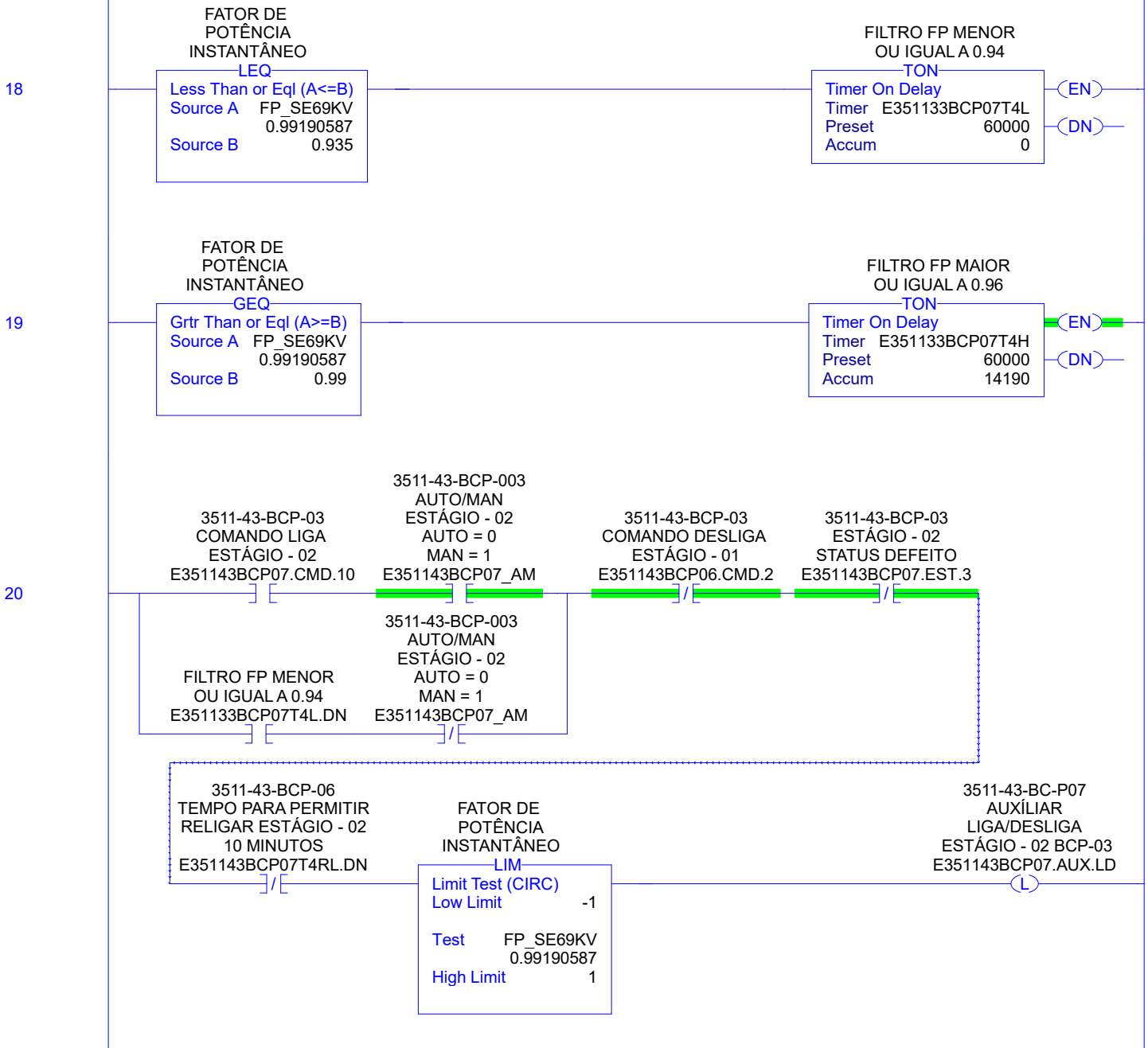


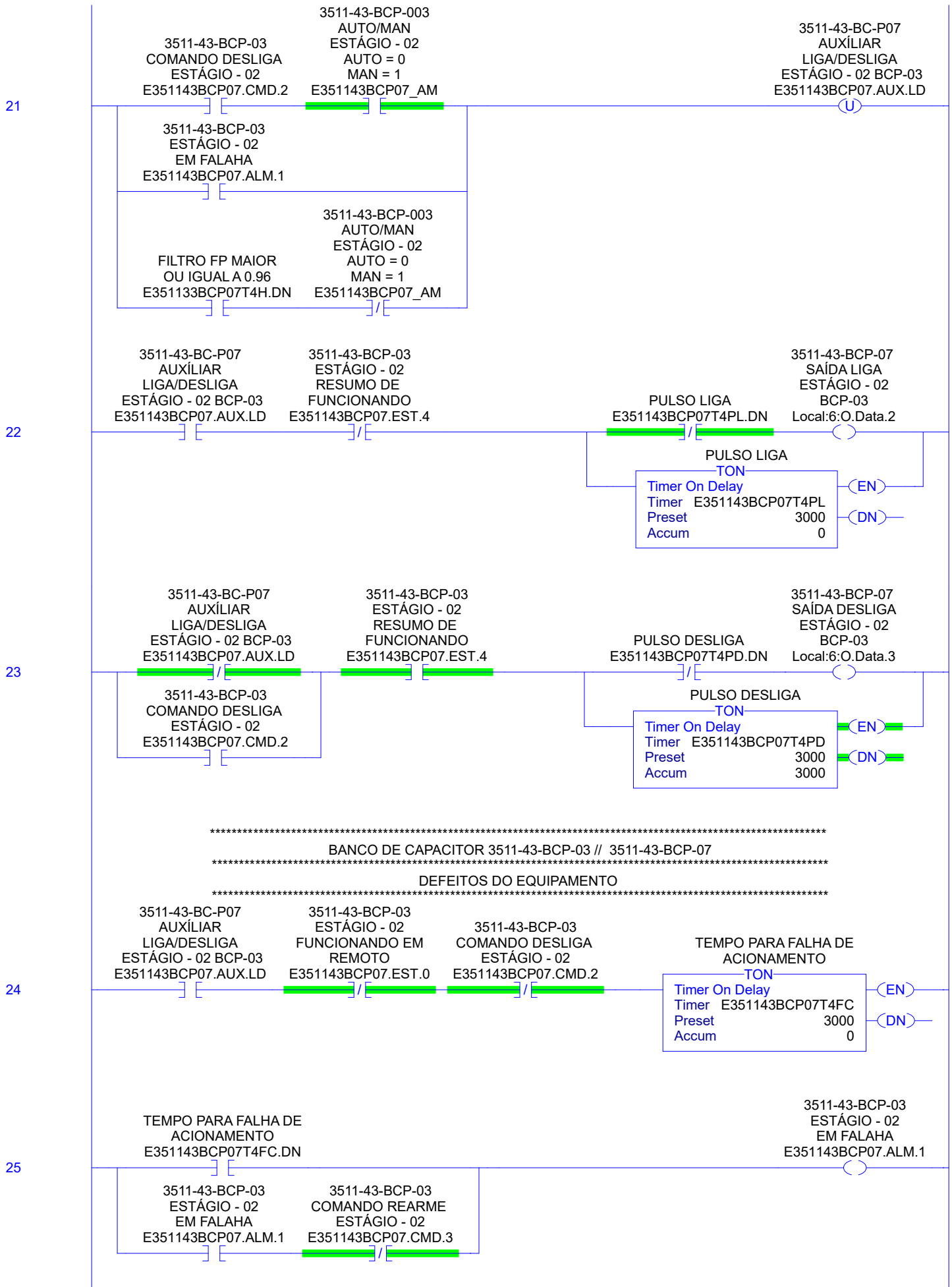


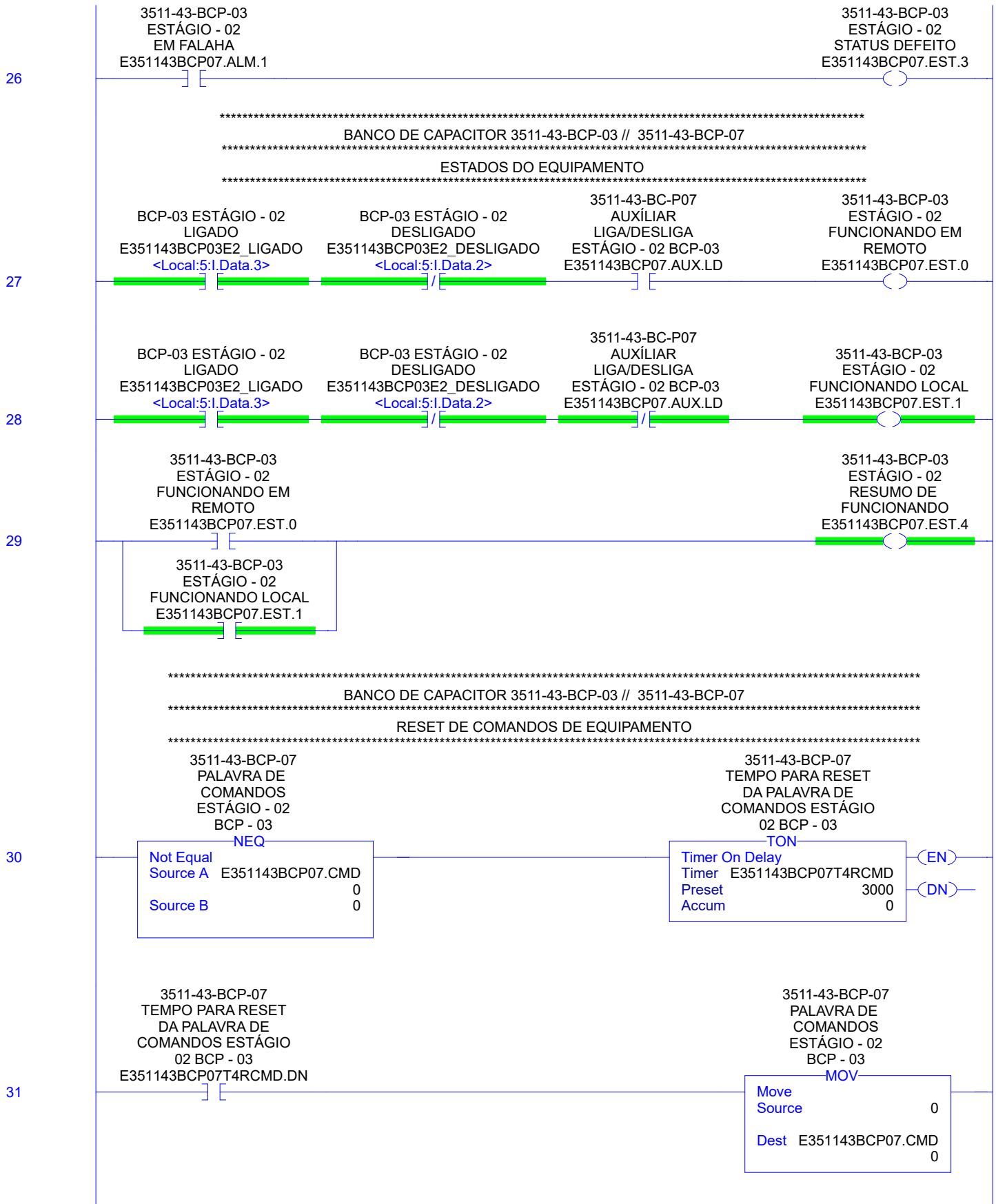


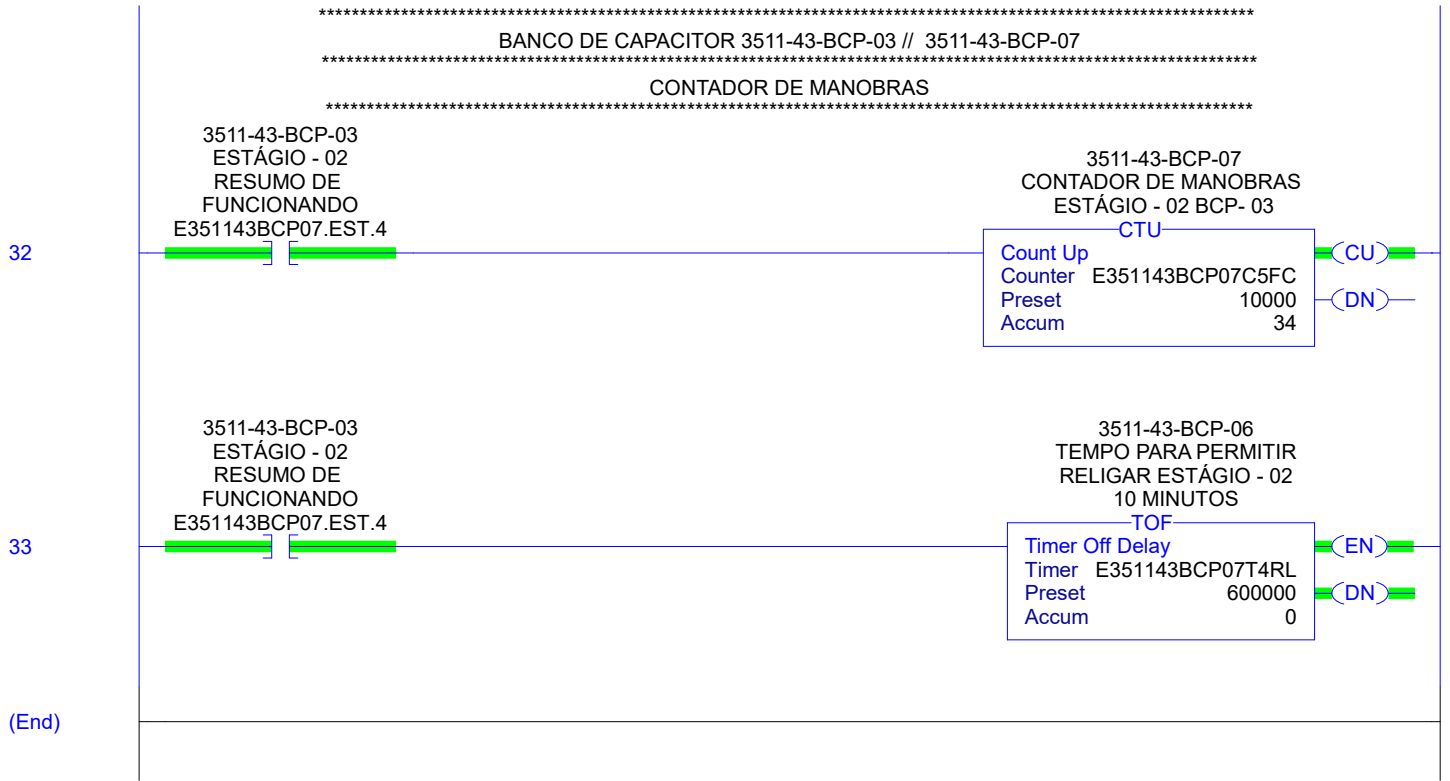


3511-43-BCP-06 ESTÁGIO - 02 BCP-03 - LÓGICA DE CONTROLE









Anexos

ANEXO A – Relatórios e registros do relé de proteção SIPROTEC 7SJ611

K14 76J61 FALHA 1_3_24 Folder 7SJ611 V4.6 Var 2

File path: C:\SIEMENS\DIGSI4\D4PROJ\K14_76_1\P7DI\GV\ST00000003\SAMPLES\FAULT\FR000002.CFG

Start time: 01/03/2024 11:31:20.596

Sample rate: 961 Hz

Value representation:secondary

Record type: COMTRADE

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.	Phase
Cursor 1:	-15,6	iL1	0,02600 A	0,01416 A	67,4°
Cursor 2:	-8,3	iL2	0,01300 A	0,01259 A	-0,3°
C2 - C1	7,3	iL2 - iL1	-0,01300 A	-0,00158 A	-67,69°

